afsset

Mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences

Saisine n°2007/007

RAPPORT

d'expertise collective

« Comité d'Experts Spécialisés liés à l'évaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements »

« Groupe de Travail Radiofréquences »

Octobre 2009

Mots clés

Radiofréquences, téléphonie mobile, exposition, méthodologie, épidémiologie.

GROUPE DE TRAVAIL

Président

M. Jean-François DORE – Directeur de Recherche Émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) - Champs électromagnétiques non ionisants – UV.

Membres

M. Yannick BARTHE – Chercheur au CNRS au centre de sociologie de l'innovation, Ecole des mines de Paris – Sociologie.

M. Mathieu BONIOL – Statisticien au Centre de Recherche Internationale sur le Cancer (CIRC) – Epidémiologie.

M. Jean-Claude DEBOUZY – Directeur du département « effets biologiques des rayonnements-biophysique » de l'institut de recherches biomédicales du service de santé des armées (IRBA-CRSSA) – Champs électromagnétiques non ionisants.

Mme Aïcha EL KHATIB – Chargée de mission à l'Assistance Publique des Hôpitaux de Paris - Hôpital Avicenne – Exposition et pathologies professionnelles.

M. François GAUDAIRE – Ingénieur au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) – Métrologie, méthodes de simulation de l'exposition, champs électromagnétiques non ionisants.

M. Jean-Pierre MARC-VERGNES – Directeur de Recherche Émérite à l'INSERM, affecté à l'unité INSERM U.825 "Imagerie cérébrale et handicaps neurologiques" – Médecine, neurologie, sciences de la cognition, biophysique.

Mme Annie MOCH – Professeur à l'Université Paris X Nanterre – Psychologie environnementale.

Mme Anne PERRIN – Chercheur, Chef de projet à l'Institut de recherches biomédicales du service de santé des armées (IRBA-CRSSA)–Biophysique, biologie cellulaire,mutagénèse, évaluation de risque sanitaire.

M. Marc POUMADERE – Institut Symlog, Paris – Gouvernance des risques.

Mme Maylis TELLE-LAMBERTON – Chercheur à l'Institut de radioprotection et de sûreté nuclaire (IRSN) – Epidémiologie, evaluation de risque sanitaire, biostatistiques.

M. Paolo VECCHIA – Directeur de recherche à l'*Istituto Superiore di Sanità* (ISS, Rome, Italie) – Rayonnements non ionisants.

Mme Catherine YARDIN – Professeur des Universités en Histologie, Cytologie, Praticien Hospitalier, Chef du Service d'Histologie, Cytologie, Cytogénétique, Biologie Cellulaire et de la Reproduction au CHU Dupuytren de Limoges – Médecine, toxicologie, cancérologie, mutagénèse.

RAPPORTEUR

Mlle Alice COLLIN – Chercheur, post-doctorante à l'Institut de recherches biomédicales du service de santé des armées (IRBA-CRSSA) - Physique, dosimétrie biologique, champs électromagnétqiues non ionisants, métrologie.

ADOPTION DU RAPPORT PAR LE COMITE D'EXPERTS SPÉCIALISES

Ce rapport a été soumis pour commentaires au CES :

- Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – 8 octobre 2009

Président

M. Jean-François DORÉ – Directeur de Recherche Émérite à l'Institut National de la Santé Et de la Recherche Médicale (Inserm) - Champs électromagnétiques non ionisants – Ultra-Violets.

Membres

Fabienne ANFOSSO-LÉDÉE – Ingénieur de recherche au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) – Bruit.

Michel BÉRENGIER – Adjoint au Chef de la division Entretien, Sécurité et Acoustique des Routes au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) – Bruit.

Jean-Pierre CÉSARINI – Retraité (Directeur du laboratoire de recherche sur les tumeurs de la peau humaine, fondation A. de Rotschild et Inserm) – Ultra-Violets.

Jean-Claude COHEN – Coordinateur en biométéorologie à Météo France – Météorologie et santé.

Daniel COURANT – Chercheur, chef de projet au Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) – Rayonnements non ionisants (lasers, ultra-violets).

Frédéric COUTURIER – Responsable du département "Études" à l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) – Rayonnements non ionisants.

Jean-Claude DEBOUZY – Directeur du département « effets biologiques des rayonnements-biophysique » de l'institut de recherches biomédicales du service de santé des armées (IRBA-CRSSA) – Champs électromagnétiques non ionisants.

Aïcha EL KHATIB – Chargée de mission à l'Assistance Publique des Hôpitaux de Paris - Hôpital Avicenne – Exposition et pathologies professionnelles.

Emmanuel FLAHAUT – Chargé de recherche au Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) – Nanomatériaux.

Eric GAFFET – Directeur de recherche *Nanomatérials research Group* au Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) – Nanomatériaux.

Martine HOURS – Chargée de recherche à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (Inrets) – Rayonnements non ionisants.

Agnès JOB – Chercheur au Centre de Recherche du Service de Santé des Armées (CRSSA) – Bruit.

Antoine LABEYRIE – Professeur au Collège de France – Environnement et santé.

Jacques LAMBERT – Directeur de recherche à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (Inrets) – Bruit.

Dominique LAURIER – Adjoint au chef de laboratoire d'épidémiologie à l'Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire (IRSN) – Epidémiologie.

Olivier LE BIHAN – Ingénieur études et recherche à l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (Ineris) – Hygiène industrielle et nanomatériaux.

Philippe LEPOUTRE – Responsable du pôle technique auprès de l'Autorité de Contrôle des Nuisances Sonores Aéroportuaires (Acnusa) – Bruit.

Didier MARCHAL – Directeur Hygiène Sécurité Environnement (HSE) Europe de la division *Automotive Experience* de Johnson Controls Inc – Santé au travail.

Annie MOCH – Professeur à l'Université Paris X Nanterre – Bruit.

Philipe PIRARD – Médecin épidémiologiste au Département Santé Environnement à l'Institut national de Veille Sanitaire (IVS) – Epidémiologie.

Serge PLANTON – Ingénieur en chef à Météo France – Météorologie et santé.

Michel RUMEAU – Ingénieur en chef de la section acoustique, adjoint au chef de département de mesures physiques au Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCPP) – Bruit.

René DE SÈZE – Directeur de recherche à l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (Ineris) – Rayonnements non ionisants.

François TARDIF – Chef de laboratoire au Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) – Sécurité au travail et nanomatériaux.

Michel VALLET – Retraité (Directeur de Recherche à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (Inrets)) – Bruit

Paolo VECCHIA – Directeur de recherche à l'*Istituto Superiore di Sanità* (ISS, Rome, Italie) – Rayonnements non ionisants.

Après prise en compte des commentaires, le rapport a été approuvé par les membres du groupe de travail.

Les travaux d'expertise collective ont été adoptés par le CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » le 8 octobre 2009.

PARTICIPATION AFSSET

Coordination scientifique

Mlle Clara GALLAND – Chef de projets scientifiques - Afsset

M. Olivier MERCKEL – Chef de l'unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Afsset.

Mlle Myriam SAIHI – Chargée de projets scientifiques – Afsset

Contribution scientifique

M. Matthieu FINTZ – Chargé de projets scientifiques - Afsset

Antoine DE LOMBARDON – Juriste – Afsset

Ressources bibliographiques

Mlle Sophie GUITTON – Chef de l'unité veille, documentation, archives - Afsset

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI – Afsset.

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Nom	Affiliation	Audience	Date
Association Agir pour l'environnement	N/A	CES agents physiques	29 avril 2008
Association Criirem	N/A	CES agents physiques	29 avril 2008
Association Priartém	N/A	CES agents physiques	29 avril 2008
Association Robin des toits	N/A	CES agents physiques	23 juin 2008
Alain Azoulay	Supélec	GT RF	3 déc. 2008
Lawrie Challis	MTHR	GT RF	3 déc. 2008
Frédéric Couturier, Sylvain Germaine et Arnaud Miquel	Agence nationale des fréquences	GT RF	3 déc. 2008
Dominique Belpomme	ARTAC	GT RF	28 janv. 2009
Gérard Ledoigt	N/A	GT RF	11 mars 2009
James G. Rubin	King's College (London)	GT RF	11 mars 2009
Alain Vian	LASMEA Université Blaise Pascal	GT RF	11 mars 2009
Olivier Borraz et Danielle Salomon	CNRS/CSO et « Risques & Intelligence »	GT RF	1er avril 2009
Michel Setbon	Directeur de recherche, CNRS	GT RF	2 avril 2009
Emmanuel Nicolas et François Jacquin	TDF	Sous-groupe GT RF	3 avril 2009
Peter Wiedemann	Jülich Forshungzentrum	GT RF	1er avril 2009
Jean-François Lacronique, Françoise Boudin, Martine Hours et Michel Petit	Fondation Santé et Radiofréquences	Sous-groupe GT RF	10 avril 2009
Jean-Paul De Haro et Frédéric Surdel	Mairie de Paris	Sous-groupe GT RF	10 avril 2009
Rüdiger Matthes	Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)	Sous-groupe GT RF	24 avril 2009
Aslak Harbo Poulsen	Institute of Cancer Epidemiology Danish Cancer Society	GT RF	28 avril 2009

Jean-François Viel	laboratoire Chrono-Environment, CNRS - Université de Franche-Comté	GT RF	29 avril 2009
Lennart Hardell	Department of Oncology University Hospital Orebro, Suède	Sous-groupe GT RF	7 mai 2009
Olle Johansson	Department of Neuroscience, Karolinska Institute, Suède	GT RF	27 mai 2009
Michael Kundi	Institute of Environmental Health of the Medical University, Autriche	Sous-groupe GT RF	8 juin 2009
Lena Hillert	Departement of Public Health Sciences, Division of Occupational and Environmental Medicine Karolinska Institute, Suède	Contribution écrite	23 avril 2009
Agence suédoise de santé (*National Board of Health and Welfare*)	-	Contribution écrite	2 juillet 2009
Luc Montagnier	Académie des Sciences	Contribution écrite	29 mai 2009
Julie Barnett	University of Surrey	Contribution écrite	11 juillet 2009
André Aurengo	Académie de Médecine	Contribution écrite	2 juin 2009-
ARCEP	-	Contribution écrite	3 juin 2009
Nicolas Treich	Laboratoire d'Economie des Ressources Naturelles Toulouse School of Economics	Contribution écrite	25 mai 2009
Francis Chateauraynaud, Josquin Debaz et Christopher Marlowe	Groupe de Sociologie Pragmatique et Réflexive (GSPR) EHESS	Contribution écrite	12 juillet 2009
AFOM	-	Contribution écrite	5 juin 2009

SOMMAIRE

Présentation des intervenants 3

Expertise collective : synthèse et conclusions 14

Abréviations 33

Liste des tableaux 36

Liste des figures 37

Introduction 39

1 Contexte, modalités de traitement de la saisine et méthodologie d'expertise 42

1.1 Contexte et modalité de traitement 42

1.2 Une controverse publique 43

1.3 L'expertise en situation de controverse 50

1.3.1 Expertise « fermée » *vs*. expertise « ouverte » 51

1.3.2 Le groupe de travail sur les radiofréquences : entre ouverture et fermeture 53

2 Rappels physiques sur les radiofréquences 57

2.1 Principes physiques 57

2.1.1 Généralités sur les champs électromagnétiques 57

2.1.2 Caractéristiques d'une onde électromagnétique 58

2.1.3 Principe de la transmission radioélectrique 59

2.1.4 Conformité et réglementation 61

2.2 Les sources de champs électromagnétiques dans l'environnement quotidien 62

2.2.1 Vue d'ensemble 62

2.2.2 Radiodiffusion et télédiffusion 64

2.2.3 Réseaux de téléphonie mobile 66

2.2.4 Téléphone sans fil domestique - DECT 69

2.2.5 Réseaux locaux sans fil : LAN, *Bluetooth*, *etc*. 69

2.2.6 Réseaux de radiocommunications professionnels de type TETRA 70

2.2.7 Récapitulatif des puissances et portées 70

2.2.8 Evolution des systèmes et perspectives 71

3 Métrologie et évaluation des niveaux d'exposition 74

3.1 Marché et usages des technologies 74

3.2 Interactions onde - matière vivante 75

3.3 Zones de champ proche et de champ lointain 78
3.4 Exposition en champ proche 79
3.4.1 Méthodes utilisées 80
3.4.1.1 Cas des équipements terminaux (émetteurs portables) 81
3.4.1.2 Cas des émetteurs fixes 83
3.4.2 Connaissance actuelle de l'exposition en champ proche 85
3.4.2.1 Téléphonie mobile 85
3.4.2.2 Autres émetteurs radioélectriques 86
3.4.2.3 Cas spécifique des applications industrielles et équipements domestiques 88
3.5 Exposition du public en champ lointain 89
3.5.1 Métrologie 89
3.5.2 Connaissance actuelle de l'exposition du public en champ lointain 91
3.6 Dispositifs de protection contre les champs électromagnétiques radiofréquences 104
3.7 Projets en cours 104

4 Synthèse des études biologiques, cliniques et épidémiologiques relatives aux radiofréquences 105
4.1 Rappels méthodologiques 105
4.1.1 Les études *in vivo* et *in vitro* 105
4.1.2 Les études cliniques 109
4.1.3 Les études épidémiologiques 110
4.2 Bande de fréquences 9 kHz – 10 MHz 113
4.2.1 Terminaux cathodiques de télévision et d'ordinateur (VDU, VDT) 114
4.2.2 Plaques de cuisson domestiques à induction 116
4.2.3 Chauffage, soudure, scellement par induction et chauffage diélectrique 117
4.2.4 Autres données sur les effets cellulaires 119
4.2.5 Utilisations thérapeutiques et médicales 120
4.2.6 Conclusions pour la bande 9 kHz – 10 MHz 120
4.3 Bande de fréquences 10 MHz – 400 MHz 121
4.3.1 Applications FM-RADIO-TV (RTV): (80 - 400 MHz) 121
4.3.1.1 Exposition résidentielle 121
4.3.1.2 Exposition professionnelle 123
4.3.1.3 Autres études 126
4.3.2 Cas particulier des transmissions en ondes courtes (2 - 25 MHz) 127
4.3.3 Applications médicales 127
4.3.4 Conclusions 131
4.4 Bande de fréquences supérieures à 400 MHz 132
4.4.1 Effets biologiques et cliniques des radiofréquences 132
4.4.1.1 Effet sur l'expression génique et la synthèse de protéines 132
4.4.1.2 Effet sur le stress oxydant et la production de radicaux libres 147
4.4.1.3 Effets sur l'ADN 153
4.4.1.4 Effets sur l'apoptose 165
4.4.1.5 Effet sur le développement des cancers chez l'animal 170
4.4.1.6 Effets immunologiques 175
4.4.1.7 Effets sur le système nerveux 177
4.4.1.8 Effets sur le développement 194
4.4.1.9 Effets sur la reproduction 200
4.4.1.10 Effets sur l'audition 204

4.4.1.11 Effets sur le système oculaire 210
4.4.1.12 Effets sur le système cardio-vasculaire 211
4.4.1.13 Effets sur la mélatonine 213
4.4.1.14 Autres effets 215
4.4.1.15 Conclusions sur les effets biologiques et cliniques 221
4.4.2 Epidémiologie 224
4.4.2.1 Stations de base / antennes-relais de téléphonie mobile 224
4.4.2.2 Exposition aux téléphones mobiles et sans-fil 232
4.4.2.3 Radars 249
4.4.2.4 Autres Etudes 251
4.4.2.5 Conclusions sur les études épidémiologiques 253
4.4.3 Hypersensibilité électromagnétique 282
4.4.3.1 Les aspects cliniques 283
4.4.3.2 Les corrélats biologiques, fonctionnels, psychologiques et sociaux 292
4.4.3.3 La prévalence de l'EHS 298
4.4.3.4 Les études de « provocation » 299
4.4.3.5 Les essais de traitement de l'EHS 303
4.4.3.6 Conclusions sur l'EHS 308
4.4.4 Conclusions sur les effets sanitaires des radiofréquences 308

5 Synthèse des principaux rapports 309
5.1 Méthode d'analyse 309
5.2 Rapports d'expertise collective 309
5.2.1 Programmes de recherches subventionnés 309
5.2.1.1 Rapport annuel 2006 du Conseil en santé des Pays-Bas concernant les champs électromagnétiques : *Health Council of the Netherlands* (HCN) 309
5.2.1.2 Rapport d'avancement 2006-2007 de l'OMS concernant le projet international sur les champs électromagnétiques (*The international EMF project*) 310
5.2.1.3 Rapport 2007 du programme de recherche britannique en santé et communication mobile : *Mobile Telecommunications and Health Research Program* (MTHR) 310
5.2.1.4 Rapport 2007 de l'office fédéral suisse de l'environnement concernant les téléphones mobiles 311
5.2.1.5 Rapport 2008 du Programme de recherche allemand sur la téléphonie mobile (DMF) 311
5.2.1.6 Rapport 2008 de la Commission de Radioprotection allemande (SSK : StrahlenschutzKommission) 314
5.2.2 Rapports d'experts 317
5.2.2.1 Rapport irlandais 2007 du Groupe d'Experts sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques (*Expert Group on Health Effects of Electromagnetic Fields*) 317
5.2.2.2 Rapport 2007 du Comité Scientifique des Risques Sanitaires Emergents et Nouveaux de la Commission Européenne : *Scientific committee on emerging and newly identified risks* (SCENHIR) 318
5.2.2.3 Rapport 2008 de l'Administration de l'alimentation et des médicaments sur la sécurité des radiofréquences : *Foods and drugs administration* / *Federal communications commission* (FDA / FCC) 319
5.2.2.4 Rapport de l'Autorité Suédoise de Radio-Protection (SRPA) *Recent Research on EMF and Health Risks* 320
5.2.2.5 Rapport 2008 de l'Académie Nationale des Sciences américaine sur l'identification des besoins de recherche liés aux éventuels effets biologiques ou sanitaires des appareils de communication sans fil : Conseil National de Recherche (*National Research Council*) 320
5.2.2.6 *National Collaborating Center for Environmental Health* / Centre de Collaboration Nationale en Santé Environnementale (Canada) 321
5.3 Autres rapports 322
5.3.1 BioInitiative 322

6 Réglementations relatives aux valeurs limites d'exposition 327
6.1 Valeurs limites d'exposition 327
6.1.1 Méthodologie de développement des valeurs limites d'exposition internationales 328

6.1.2 Structure des lignes directrices Icnirp 328
6.1.3 Valeurs limites recommandées par l'Icnirp 329
6.1.4 Harmonisation des valeurs limites d'exposition 330
6.1.5 Validité actuelle des recommandations de l'Icnirp 331
6.2 Panorama des réglementations internationales 332
6.2.1 Références aux valeurs limites 332
6.2.2 Réglementation française 334
6.2.2.1 Dispositions particulières pour les antennes de stations radioélectriques 334
6.2.2.2 Cas particulier d'initiatives locales : exemple de la charte de Paris. 336
6.2.2.3 Dispositions particulières pour les terminaux mobiles 337
6.2.2.4 Perspectives d'évolution de la réglementation 337
6.2.3 Autres pays (Union européenne, Suisse et Liechtenstein) 339
6.2.3.1 Autriche 340
6.2.3.2 Espagne 341
6.2.3.3 Belgique 342
6.2.3.4 Grèce 343
6.2.3.5 Slovénie 343
6.2.3.6 Liechtenstein 344
6.2.3.7 Luxembourg 344
6.2.4 Deux exemples particuliers : la Suisse et l'Italie 344
6.2.4.1 Cadre de la réglementation italienne 344
6.2.4.2 Principales caractéristiques des réglementations italiennes 345
6.2.4.3 Le décret italien sur l'exposition aux champs électromagnétiques 345
6.2.4.4 L'ordonnance suisse 346
6.2.4.5 Caractéristiques principales de l'ordonnance suisse 346
6.2.4.6 Comparaison des réglementations suisse et italienne 347
6.2.4.7 Les réglementations italienne et suisse et le principe de précaution 347
6.2.4.8 L'ordonnance Suisse et la loi de protection environnementale 348
6.2.4.9 Logique scientifique des réglementations 349
6.2.4.10 Conclusions 350

7 Radiofréquences et société 352
7.1 Risques et controverses 352
7.2 Synthèse des enquêtes d'opinion 353
7.2.1 Baromètre santé environnement 2007 354
7.2.2 Enquête INPES 2009 358
7.2.3 Baromètre IRSN 2008 359
7.2.4 Eurobaromètre spécial sur les champs électromagnétiques 2007 366
7.2.5 Etude de perception des risques de la téléphonie mobile en Suisse 371
7.2.6 Conclusion sur les enquêtes d'opinion 371
7.3 Coûts et bénéfices associés aux RF 372
7.3.1 Analyse coûts / bénéfices 372
7.3.2 Perception des coûts et bénéfices 373
7.4 Aspects psychosociaux et impacts socioculturels liés au développement des technologies RF 375
7.4.1 RF et rapport aux risques technologiques 376
7.4.2 La téléphonie mobile : une diffusion massive et mondiale 379
7.4.3 Les effets biologiques des technologies RF comme objet d'études scientifiques 380
7.4.4 Pratiques et usages de la téléphonie mobile 381
7.4.5 Effets de l'information sur les risques associés aux technologies RF 383

7.4.6 Indépendance de la recherche en évaluation des risques 385
7.5 Le juge face à la question des risques sanitaires des antennes relais 387
7.5.1 Le juge administratif sensible à l'absence de caractérisation des risques liés aux radiofréquences 387
7.5.2 L'efficacité de l'argument de la dangerosité potentielle des antennes-relais devant le juge judiciaire 389

8 Conclusions du groupe de travail 393
Méthodologie d'expertise collective 393
Controverse publique et préoccupations sociales : 394
Exposition aux radiofréquences 395
Aspects réglementaires 397
Etudes des effets biologiques, épidémiologiques et cliniques 397
Etudes biologiques et épidémiologiques dans la bande 9 kHz- 400 MHz 398
Etudes biologiques et épidémiologiques dans la bande 9 kHz- 10 MHz 398
Etudes biologiques et épidémiologiques dans la bande 10 MHz- 400MHz 398
Conclusion générale pour les études biologiques et épidémiologiques dans la bande 9 kHz – 400 MHz 399
Etudes biologiques et cliniques pour les fréquences supérieures à 400 MHz 399
Etudes épidémiologiques pour les fréquences supérieures à 400 MHz 401
Hypersensibilité électromagnétique 401
Effets des radiofréquences sur les enfants 402
Conclusion générale sur les effets sanitaires 402

9 Recommandations du groupe de travail 403
S'agissant des recommandations en matière d'études et de recherche 403
Pour les effets biologiques 403
Pour l'épidémiologie 403
Pour l'hypersensibilité électromagnétique 404
S'agissant des recommandations en matière d'expositions 405
Pour la caractérisation des expositions 405
Pour les niveaux d'exposition 405
D'une manière plus générale 406

10 Bibliographie 408
10.1 Publications 408
10.2 Normes 456
10.3 Législation et réglementation 456
10.4 Sites Internet 457

Annexe 1 : Lettre de saisine 459

Annexe 2 : Synthèse des déclarations publiques d'intérêts des experts par rapport au champ de la saisine 461

Annexe 3 : Liste des documents présentés sur support DVD-Rom annexé au rapport..... 468

afsset
agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences

Saisine Afsset n°2007/007

Ce document synthétise les travaux du groupe de travail et présente les éventuels compléments du Comité d'Experts Spécialisés.

Présentation de la question posée

L'Afsset a été saisie le 14 août 2007 par les ministères en charge de la santé et de l'environnement afin de publier un document à jour des connaissances scientifiques et d'actualiser son avis sur les effets biologiques et sanitaires de la téléphonie mobile, et de l'étendre à l'ensemble du domaine des radiofréquences.

Il était demandé à l'Afsset de porter une attention particulière aux signaux identifiés dans ses précédents rapports (2003 et 2005), concernant notamment la modification de la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique, une étude épidémiologique sur le risque de neurinome associé à l'usage du téléphone mobile, ainsi que le développement et le déploiement de nouvelles technologies (Wi-Fi, télévision mobile personnelle, *etc*.). Par ailleurs, il était préconisé d'identifier avec la plus grande attention les préoccupations de la société civile et de contribuer ainsi au débat public sur ce thème.

Le groupe de travail (GT), dans la réalisation de ses travaux d'expertise, a considéré principalement l'exposition de la population générale aux champs électromagnétiques radiofréquences. Dans quelques cas précis cependant, notamment en l'absence de données disponibles pour l'exposition du public, des informations provenant du milieu professionnel ont été utilisées.

Contexte scientifique

Le développement des technologies radiofréquences et leurs applications associées – c'est-à-dire utilisant des champs électromagnétiques dont la gamme de fréquences est comprise entre 9 kHz et 300 GHz – s'est fortement amplifié ces 20 dernières années, avec l'apparition de nouvelles fonctionnalités pour la téléphonie mobile, l'essor des normes *Bluetooth*, du Wi-Fi et du WiMAX, *etc*. Les sources de champs électromagnétiques radiofréquences se multiplient, et s'accompagnent de multiples questions en termes d'utilisation, de métrologie, d'effets biologiques et cliniques, d'épidémiologie, de réglementation et de sciences humaines et sociales ainsi que d'inquiétudes diverses, en fonction des applications considérées,

portant notamment sur leurs possibles impacts sanitaires. Les recherches scientifiques se sont poursuivies dans ces différents domaines.

L'Afsset a expertisé à plusieurs reprises le domaine des effets sanitaires des champs électromagnétiques radiofréquences, avec la publication d'avis et de rapports d'expertise collective en 2003 et 2005 sur la téléphonie mobile et en 2009 sur les systèmes d'identification par radiofréquences (RFID). A la demande de ses ministères de tutelles, l'Afsset présente ici une mise à jour des connaissances scientifiques relatives à l'ensemble des applications utilisant des champs électromagnétiques radiofréquences, hors RFID.

Organisation de l'expertise

Conformément à la démarche qualité suivie à l'Afsset s'appuyant sur l'utilisation de la norme NF X 50-110 relative à la qualité en expertise, la demande des ministères en charge de la santé et de l'environnement a été confiée au CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » dès son installation en avril 2008. Ce dernier, au cours de sa séance du 29 avril 2008, a mandaté un groupe de travail « radiofréquences » pour la réalisation de l'expertise.

Dès sa première réunion, et avant même la mise en place du groupe de travail, le CES « agents physiques » a auditionné trois des cinq associations françaises positionnées sur la thématique des risques sanitaires de la téléphonie mobile (Priartém, Agir pour l'environnement et le Criirem). La quatrième (Robin des toits) a été auditionnée à la séance suivante. La cinquième, l'association Next-up n'a pas répondu à l'invitation de l'Afsset. Dans un souci de transparence, le président du CES « agents physiques », conjointement avec la Direction Générale de l'Afsset, a proposé aux associations, lors de ces auditions, de nommer un représentant commun à ces quatre associations pour être l'observateur du déroulement des travaux du GT radiofréquences. Alors que le Criirem et Robin des toits ont répondu défavorablement à cette proposition, Daniel Oberhausen, membre de l'association Priartém, a été proposé par Priartém et Agir pour l'environnement. Il a donc été nommé observateur au sein du GT radiofréquences et a ainsi été invité à assister à toutes les réunions ainsi qu'aux différentes auditions, dès le mois de décembre 2008[1].

Le groupe de travail « radiofréquences » coordonné par l'Afsset a été constitué au cours de l'été 2008, suite à un appel à candidatures public. Ce groupe de travail multidisciplinaire est constitué d'experts dans les domaines de la médecine, de la biologie, de la biophysique, de la métrologie des champs électromagnétiques, de l'épidémiologie ainsi que des sciences humaines et sociales.

Afin d'instruire cette saisine sur les effets des radiofréquences sur la santé, le groupe de travail s'est réuni 13 fois (22 jours[2]) entre septembre 2008 et octobre 2009. Lors de ces

[1] Le rôle précis de D. Oberhausen, qui n'est pas intervenu en tant qu'expert au sein du groupe de travail, était d'observer le déroulement des travaux d'expertise. Il a ainsi été convié à toutes les réunions du groupe de travail, ainsi qu'aux différentes auditions programmées pendant le temps de l'expertise. L'observateur a pu s'exprimer, poser des questions, mais n'est pas intervenu dans le travail d'expertise lui-même.

[2] Le GT s'est réuni 4 fois pour une séance d'une journée, et 9 fois pour des séances de deux jours consécutifs.

réunions, ou lors de séances supplémentaires, 19 auditions ont également été réalisées. En complément de ces auditions, 12 contributions écrites ont été sollicitées, dont 8 ont obtenu une réponse, sur des questions plus précises du groupe de travail.

L'état d'avancement de ces travaux a été présenté régulièrement au CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements », et discuté au cours de ses séances de travail. Le rapport produit par le GT tient ainsi compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES ayant pris part aux délibérations.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

Description de la méthode

L'originalité de ce travail d'expertise collective réside notamment dans :

- la prise en compte de l'ensemble des radiofréquences, et non pas seulement la téléphonie mobile ;
- le regard porté sur la question de l'hypersensibilité électromagnétique ;
- la multidisciplinarité du groupe de travail qui intègre notamment des experts du domaine des sciences humaines et sociales ;
- la présence d'un observateur du milieu associatif au sein du groupe de travail.

Pour réaliser cette expertise, le GT s'est appuyé sur une très large revue de la bibliographie scientifique internationale complétée par de nombreuses auditions d'associations, d'experts et de personnalités scientifiques.

L'analyse bibliographique entreprise par le groupe de travail a été aussi exhaustive que possible, en dépit des fortes contraintes temporelles. Les travaux scientifiques pris en compte dans le rapport sont, pour la plupart, issus de publications écrites dans des revues internationales anglophones soumises à l'avis d'un comité scientifique de lecture. Dans un souci d'exhaustivité, les références ainsi retenues ont été confrontées à celles d'autres rapports internationaux (rapports du Scenihr[3] 2007 et 2009, rapport du MTHR[4] 2007, rapport BioInitiative 2007, *etc*.). Ce rapport étant une actualisation des connaissances relatives aux effets sanitaires des radiofréquences, les travaux pris en compte sont, pour l'essentiel, ceux qui ont été publiés entre la sortie du dernier rapport de l'Afsse (début 2005) et le 1er avril 2009 pour ce qui concerne la gamme de fréquences supérieures à 400 MHz (comprenant la téléphonie mobile), ainsi que d'autres travaux antérieurs pour les bandes de fréquences qui n'avaient pas été étudiées auparavant par l'Afsset.

L'expertise des membres du groupe de travail a concerné plusieurs axes :

[3] *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks* - Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux.

[4] *Mobile Telecommunications and Health Research Program* - programme de recherche britannique en santé et communication mobile.

- l'analyse des effets biologiques et sanitaires des champs électromagnétiques, par l'examen de la recherche scientifique dans les domaines de la biologie, de la médecine et de l'épidémiologie ;
- l'évaluation de l'exposition des personnes ;
- l'analyse de la réglementation internationale dans le domaine de l'exposition aux champs électromagnétiques ;
- l'étude de la perception des risques et une analyse de la controverse publique.

Une campagne de mesures a été réalisée dans le cadre de cette étude. Elle a permis d'évaluer les niveaux de champ électromagnétique émis par certaines antennes-relais de téléphonie mobile, et en particulier de mesurer le niveau de champ magnétique basse fréquence à proximité.

Résultats de l'expertise collective

Les travaux d'expertise, les conclusions et les recommandations du groupe de travail « radiofréquences » ont été soumis au CES « Evaluation des risques liés aux Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » sous forme d'un rapport et de la présente synthèse d'expertise collective.

Le CES a adopté les travaux d'expertise collective du groupe de travail ainsi que ses conclusions et recommandations lors de sa séance du 8 octobre 2009 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Afsset. Par ailleurs, le CES a salué l'important travail d'étude et d'expertise réalisé par le groupe de travail, tout en regrettant les contraintes temporelles fortes qui ont pesé sur ce travail.

Conclusions de l'expertise collective

Controverse publique et préoccupations sociales

Les enquêtes d'opinion montrent que les préoccupations que peut nourrir la population au sujet de certaines applications radiofréquences semblent réelles et se renforcent, en dépit d'un fort engouement pour les technologies de télécommunication sans fil. Cependant, ces préoccupations ne concernent pas seulement les éventuels risques sanitaires des champs électromagnétiques, mais portent également sur d'autres aspects comme la qualité de l'information, ou le degré de confiance qui lui est accordé, ou encore les modalités de la prise de décision dans ce domaine. C'est en partie ce qui explique que l'implantation des antennes de stations de base de téléphonie mobile cristallise aujourd'hui les inquiétudes, alors même que l'exposition aux radiofréquences qu'elles occasionnent est beaucoup plus faible que celle liée à l'usage du téléphone mobile.

Mais la controverse publique sur les radiofréquences ne saurait être réduite au supposé décalage entre un risque évalué par la science, et un « risque perçu », qui serait pour sa part mesuré par les sondages d'opinion. Elle met aux prises différents groupes d'acteurs qui tous mobilisent à la fois des arguments scientifiques, éthiques et économiques. Dans ce contexte, le traitement de la controverse publique peut difficilement se résumer à l'amélioration de l'information sur le sujet, mais il doit passer par la mise en place de procédures de concertation et de recherche associant la pluralité des acteurs concernés et susceptibles d'enclencher des mécanismes d'apprentissage mutuel. Au-delà de l'évaluation scientifique du risque, la controverse actuelle sur les radiofréquences pose ainsi plus généralement la

question de la bonne gouvernance de ce type de questions, ce qui nécessite que soient menées de plus amples réflexions sur l'ouverture de l'expertise scientifique à la société ainsi que sur les procédures permettant d'organiser un débat public sur les enjeux scientifiques et techniques.

Exposition aux radiofréquences

Il existe un très grand nombre de systèmes de communication et d'applications, basés sur des liaisons sans fil, qui utilisent les ondes électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences comme support pour transmettre des informations. Bien que tous ces systèmes aient leurs propres spécificités techniques (transmission analogique ou numérique, bandes de fréquences utilisées, type de modulation du signal, protocole de transmission des informations, *etc*.), ils ont pour base commune la physique de la propagation des ondes et le rayonnement d'un champ électromagnétique à partir d'une antenne dans l'environnement. Le tableau ci-dessous présente les principales applications des radiofréquences, en fonction des bandes de fréquences associées.

Bande de fréquences	Services / Applications
9 kHz – 30 MHz	Radiodiffusion Grandes Ondes, Ondes Moyennes et Ondes Courtes - Détecteurs de victimes d'avalanches - Trafic amateur - Systèmes de détection antivol (RFID) - Lecteurs de cartes sans contact (RFID) - Applications médicales (*)
30 MHz – 87,5 MHz	Télédiffusion analogique et numérique (bande I) - Réseaux professionnels (taxis, pompiers, gendarmerie nationale, réseaux radioélectriques indépendants, *etc.*) - Radioamateurs - Microphones sans fil - Radiolocalisation aéronautique - Radars - Applications médicales (*)
87,5 – 108 MHz	Radiodiffusion en modulation de fréquences (bande FM)
108 – 136 MHz	Trafic aéronautique (balisage et bande « air »)
136 – 400 MHz	Télédiffusion analogique et numérique (bandes II et III) - Réseaux professionnels (police, pompier, SAMU, *etc*.) - Fréquences réservées au vol libre (*talkies walkies*) - Trafic amateur (bande « des 2 mètres ») - Trafic maritime (bandes VHF marine) - Radiomessagerie ERMES
400 – 470 MHz	Balise ARGOS - Réseaux professionnels (gendarmerie, SNCF, EDF, *etc.*) - Trafic amateur (bande « 432 ») - Télécommandes et télémesure médicale – Systèmes de commande (automobile (RFID) - Réseaux cellulaires TETRA et TETRAPOL - Applications médicales(*)
470 – 860 MHz	Télédiffusion bandes IV et V (analogique et numérique)
860 – 880 MHz	Bande ISM (Industriel, Scientifique, Médical) : appareils à faible portée de type alarmes, télécommandes, domotique, capteurs sans fil, RFID
880 – 960 MHz	Téléphonie mobile GSM 900 : voies montantes et voies descendantes
960 – 1710 MHz	Radiodiffusion numérique - Réseaux privés - Faisceaux Hertziens
1710 – 1880 MHz	Téléphonie mobile GSM 1800 : voies montantes et voies descendantes
1880 – 1900 MHz	Téléphones sans fil DECT
1920 – 2170 MHz	Téléphonie mobile UMTS
2400 – 2500 MHz	Bande ISM : réseaux Wi-Fi - *Bluetooth* - Four micro-onde
3400 – 3600 MHz	Boucle locale radio large bande de type WiMAX
> 3600 MHz	Radars - Boucle locale radio - Stations terriennes – Faisceaux Hertziens

** Les applications médicales utilisant des champs électromagnétiques radiofréquences concernent les applications thermiques, l'imagerie et l'électrochirurgie.*

Parmi les systèmes utilisant les radiofréquences, on peut citer :

- les réseaux de diffusion de contenu (radiodiffusion, télédiffusion) pour lesquels un émetteur émet à puissance constante pour couvrir une zone plus ou moins étendue dans laquelle se trouvent des récepteurs (radio, télévision, *etc*.) ;
- les réseaux cellulaires (réseaux mobiles professionnels, TETRA, téléphonie mobile GSM 900 et 1800, téléphonie mobile UMTS, *etc*.) pour lesquels des stations de base fixes sont réparties sur un territoire (zone de couverture) afin d'assurer une continuité de service pour des équipements terminaux mobiles. Dans ce cas, les puissances d'émission sont variables en fonction du volume de trafic de communications sur le réseau ;
- les systèmes sans fil de moyennes et courtes portées, de puissances variables selon les technologies : Wi-Fi (liaison internet entre bornes d'accès et ordinateurs), *Bluetooth* (liaison sans fil par exemple entre périphériques informatiques), téléphones sans fil domestiques DECT, systèmes sans fil pour la domotique (gestion d'énergie) et la sécurité (alarme), *etc*.

Les évolutions de ces technologies sans fil sont très rapides et devraient largement se poursuivre dans les prochaines années. Elles concernent à la fois les techniques (nouveaux protocoles de communication, augmentation des débits de données transmises, évolutions technologiques des émetteurs, *etc*.) et les usages (vers plus de mobilité et de « sans fil », développements de nouvelles applications et marchés associés, *etc*.).

Les émetteurs associés à l'ensemble de ces applications utilisant les radiofréquences contribuent au champ électromagnétique ambiant présent dans l'environnement.

Pour caractériser l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques radiofréquences, on utilise deux indicateurs dépendant de la fréquence et des effets associés connus qui peuvent se produire dans le corps. Jusqu'à une fréquence d'environ 10 MHz, on utilise la mesure des courants induits dans le corps humain. A partir de 100 kHz, l'absorption d'énergie électromagnétique, qui peut se traduire par une élévation de température des tissus, est caractérisée par le débit d'absorption spécifique (DAS), qui s'exprime en W/kg. En pratique, il peut être extrêmement complexe de réaliser des mesures de DAS ou de courant induit dans le corps, notamment lorsque l'exposition est faible, comme c'est le cas pour des sources lointaines. Ainsi, pour caractériser l'exposition du public aux champs électromagnétiques radiofréquences, la physique de la propagation des ondes permet de distinguer deux configurations :

- lorsque l'on se trouve à proximité d'un émetteur (en zone de champ proche), la répartition des champs électromagnétiques est complexe et ne peut pas être décrite par des méthodes simples. L'exposition doit être quantifiée par la valeur du DAS ou des courants induits, qui peuvent être soit simulés par méthode numérique, soit mesurés en laboratoire sur des modèles (fantômes).
- Au-delà d'une certaine distance de l'émetteur (en zone de champ lointain), il est plus simple de caractériser l'exposition, au moyen de méthodes de simulation ou par la mesure *in situ* de l'intensité du champ électrique ou du champ magnétique.

Les données disponibles pour connaître l'exposition du public aux champs électromagnétiques radiofréquences sont relativement nombreuses pour les applications utilisant des fréquences supérieures à 400 MHz, mais beaucoup plus limitées pour les fréquences plus basses.

Ainsi, en zone de champ proche, de nombreuses mesures de DAS ont été réalisées en laboratoire pour des émetteurs comme les téléphones mobiles, les téléphones sans fil DECT, les interphones bébé, les cartes Wi-Fi, les clés USB 3G, *etc*. Dans le cadre de la certification obligatoire des terminaux mobiles, pour vérifier le respect des réglementations en vigueur, ces méthodologies de mesure sont encadrées par des normes.

En zone de champ lointain, des mesures *in situ* de champs électromagnétiques permettent d'évaluer l'exposition du public due à l'ensemble des émetteurs qui sont présents dans l'environnement (radiodiffusion, télédiffusion, antennes relais de téléphonie mobile, *etc*.), sans recourir à une évaluation du DAS extrêmement complexe à réaliser dans ces conditions. Les nombreuses mesures réalisées selon le protocole de l'ANFR permettent de caractériser les niveaux d'exposition *maxima* générés par des émetteurs radiofréquences fixes. Ces mesures sont indispensables pour connaître ponctuellement les niveaux d'exposition dans une situation donnée (cour d'école, logement d'un particulier, *etc*.), la répartition entre les différents émetteurs radioélectriques mais aussi, dans le cadre du protocole de l'ANFR, pour vérifier le respect des valeurs limites d'exposition réglementaires. Elles permettent également d'évaluer l'évolution globale des niveaux d'exposition, au travers des synthèses que l'ANFR publie régulièrement. En outre, des campagnes de mesure ont déjà été réalisées avec des exposimètres individuels portables récemment développés qui devraient permettre de suivre l'exposition d'individus au fil du temps (une journée, une semaine, *etc*.).

Le rapport donne les résultats disponibles à ce jour sur les niveaux d'exposition de la population obtenus à partir des études de terrains et de la base de données de l'ANFR : ils sont tous inférieurs aux valeurs limites d'exposition réglementaires, et même souvent très en-dessous de ces valeurs limites.

En marge de la controverse publique sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques, de nombreux produits et systèmes de protection contre les champs électromagnétiques apparaissent sur le marché (*patch* anti ondes, *spray* anti ondes, vêtements métallisés, compensateur d'ondes, *etc*.). L'efficacité de ces produits n'est pas démontrée.

Il ressort de l'analyse des différentes technologies et réseaux de communications sans fil, et des données sur l'exposition de la population, un certain nombre de points :

- l'évolution très rapide des technologies et des usages des systèmes de télécommunications sans fil nécessite une adaptation progressive des normes et des protocoles d'évaluation des niveaux d'exposition (évolutions en cours du protocole de l'ANFR, évolutions des normes de mesure de DAS pour tenir compte des nouveaux usages du téléphone mobile, recherches en cours sur l'évaluation du DAS pour les enfants et fœtus, *etc*.) ;
- la mesure du DAS ou de champs électromagnétiques *in situ* nécessite un niveau d'expertise important en métrologie et en physique : connaissance précise des caractéristiques techniques des équipements et des signaux mesurés, estimation des incertitudes associées, analyse des résultats, *etc*. ;
- concernant les réseaux cellulaires de téléphonie mobile, l'ensemble des études analysées confirme la complexité de la répartition des niveaux d'exposition autour des antennes de stations de base. Cette complexité est notamment due à la grande variabilité des signaux, à la position et à la directivité des antennes, ainsi qu'à la présence d'obstacles (immeubles, relief, *etc*.). De plus, l'architecture de ces réseaux repose sur un équilibre entre les puissances émises par les antennes de stations de

base et les puissances émises par les téléphones mobiles. L'estimation de l'exposition du public nécessite de prendre en compte l'ensemble de ces paramètres ;

- en terme d'intensité de l'exposition, il faut rappeler la très forte prédominance de celle liée aux téléphones mobiles par rapport à celle due aux antennes de stations de base de téléphonie mobile ;
- à la demande du groupe de travail, des mesures en très basses fréquences ont été réalisées au voisinage d'antennes de station de base. Il ressort de ces mesures que les émetteurs radiofréquences et notamment les antennes des stations de base de téléphonie mobile n'émettent pas de rayonnements extrêmement basses fréquences de quelques dizaines de Hertz. Ce résultat est conforme aux caractéristiques de rayonnement attendues de ces antennes. Les seuls rayonnements en basses fréquences mesurables proviennent de l'alimentation de l'émetteur (courant du secteur à 50 Hz ou batterie du téléphone). Le découpage temporel du signal (cas du GSM) ne peut pas être assimilé au rayonnement d'un champ électromagnétique en très basses fréquences.

Aspects réglementaires

Ce rapport présente l'état de la réglementation liée aux effets sanitaires des champs électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences. Cette réglementation se traduit en termes de valeurs limites d'exposition (par exemple pour les courants induits, le DAS ou l'intensité des champs électromagnétiques) pour l'ensemble des radiofréquences. Dans la majorité des pays, comme c'est le cas pour la France, les valeurs limites d'exposition réglementaires retenues sont celles définies par l'Icnirp et recommandées par l'Union européenne, sur la base des effets sanitaires avérés.

Dans certains pays (en Europe : Suisse, Italie, Autriche, *etc*.) des valeurs limites spécifiques différentes ont été mises en place, notamment à des échelons locaux ou régionaux. Dans tous les cas, ces nouvelles définitions de valeurs limites d'exposition sont accompagnées de caractéristiques (notion de moyenne sur une certaine durée, définition de lieux sensibles, focalisation sur certaines bandes de fréquences, *etc*.) qui rendent très difficile la comparaison entre ces réglementations et surtout l'estimation de leur impact sur l'exposition réelle du public.

Il semblerait qu'un simple abaissement de valeurs limites ne soit pas garant de l'apaisement de la controverse sociale (c'est par exemple le cas de la ville de Paris ou de l'Italie).

Au demeurant, l'effectivité de l'abaissement d'une valeur limite suppose aussi d'être vérifiée par des campagnes de mesure.

Etudes des effets biologiques, épidémiologiques et cliniques

L'observation d'un effet biologique, *a fortiori* en conditions expérimentales, ne signifie pas forcément qu'il entraîne un dommage et encore moins qu'il se traduise par un effet sur la santé. Le corps humain est soumis en permanence à un ensemble de *stimuli* internes et externes, entraînant éventuellement des réactions biologiques d'adaptation, ayant un impact sur les cellules, le fonctionnement des organes et la santé. Un impact sur la santé n'intervient que lorsque des effets biologiques entraînés par une agression dépassent les limites d'adaptation du système biologique considéré. Comme par exemple pour les rayonnements ionisants, cela peut se produire de manière aiguë, à la suite d'agressions répétées ou à plus long terme.

Les phénomènes biologiques pris en compte pour prévenir des effets sanitaires dépendent de l'interaction des ondes avec la matière à la fréquence considérée. Ils s'expriment différemment en fonction du type de champ (électrique ou magnétique), et de sa fréquence.

Jusqu'à 100 kHz, il s'agit des champs et courants pouvant entraîner la stimulation de tissus excitables (système nerveux et muscles). Au-dessus de 10 MHz, l'absorption des radiofréquences devient prédominante et l'échauffement, le mécanisme essentiel. Aux fréquences intermédiaires, entre 100 kHz et 10 MHz, on peut observer un mélange des deux phénomènes.

Concernant les bandes de fréquences pour lesquelles les effets dus à l'échauffement sont prépondérants, on distingue les effets thermiques des effets dits « non thermiques » :

- les effets thermiques désignent les effets biologiques qui peuvent être mis en évidence sur des modèles de cultures cellulaires, animaux ou humains lorsque l'on observe une augmentation de température des cellules ou des tissus, consécutive à une exposition aux radiofréquences. Ce sont des effets qui concernent la partie haute du spectre des radiofréquences, au-dessus de 100 kHz, mais surtout à partir de 10 MHz. Ces effets thermiques sont utilisés dans les applications thérapeutiques des radiofréquences.
- Les effets non thermiques, ou « athermiques », apparaîtraient à des niveaux d'exposition non thermique, pour lesquels le corps peut réguler sa température, sans que l'on observe macroscopiquement d'augmentation de celle-ci. Dans le cas expérimental où des cultures cellulaires sont exposées aux radiofréquences, il est question d'effets dits « non thermiques » si aucune élévation de température susceptible de les provoquer ne peut être mesurée.

En raison de leurs spécificités (modes d'action, applications concernées, données disponibles), les effets biologiques des champs électromagnétiques radiofréquences ont été abordés par bandes de fréquences : entre 9 kHz et 400 MHz et au-dessus de 400 MHz.

Etudes biologiques et épidémiologiques dans la bande 9 kHz - 400 MHz

Etudes biologiques et épidémiologiques dans la bande 9 kHz - 10 MHz

Peu d'études expérimentales et épidémiologiques sont disponibles concernant les effets des champs électromagnétiques des fréquences intermédiaires sur la santé. L'analyse de ces études ne permet pas de conclure définitivement quant à l'existence ou non d'effet délétère lié à des expositions aux radiofréquences dans la bande 9 kHz – 10 MHz à des niveaux non thermiques. On retient cependant la difficulté de caractérisation de l'exposition dans cette bande, et la nécessité d'entreprendre des études pilotes de caractérisation des sources d'émission avant de lancer des études épidémiologiques. Il faut noter que les valeurs limites d'exposition professionnelle sont parfois dépassées dans certaines applications industrielles.

En raison de l'accroissement de l'exposition au rayonnement dans cette bande de fréquences, il est important d'entreprendre de nouvelles études, et ceci particulièrement pour des expositions chroniques de faibles puissances permettant de confirmer la bonne adéquation des valeurs limites.

On note également quelques publications mentionnant des effets sur des systèmes cellulaires en division, qui mériteraient d'être poursuivies.

Eu égard au faible nombre de données, il persiste une zone d'incertitude qui empêche de proposer des conclusions définitives. Il apparaît donc nécessaire de réaliser des études épidémiologiques et des recherches *in vitro* et *in vivo*, dans cette bande de fréquences, portant en particulier sur la reproduction et le système nerveux.

Etudes biologiques et épidémiologiques dans la bande 10 MHz - 400MHz

Cette bande de fréquence (10 MHz – 400 MHz) est dominée par les applications industrielles (par exemple : soudage) et médicales (par exemple : traitement de l'arythmie cardiaque auriculaire) . Dans certaines situations, des études ponctuelles ont montré que les valeurs limites d'exposition pour le public ou les professionnels étaient parfois dépassées.

En pratique, l'exposition réelle est souvent inconnue parce qu'hétérogène dans le temps et dans l'espace. Ceci entraîne de sévères limitations pour les enquêtes épidémiologiques que l'évolution des méthodes de modélisation et de calcul a cependant réduites dans les années récentes et que l'utilisation d'exposimètres multi-bandes individuels devrait améliorer.

L'évaluation de l'exposition est encore compliquée par l'existence de résonances dimensionnelles pour lesquelles l'absorption est accrue, ainsi que par l'existence de surexpositions partielles pour des expositions conformes aux valeurs limites « corps entier », ou encore par des dépendances positionnelles et dimensionnelles (par exemple cas des enfants). A l'heure actuelle, d'importants travaux portant sur la dosimétrie dans ces bandes de fréquences sont entrepris.

Les résultats biologiques sont toujours limités et contradictoires. Cependant, certaines observations liées au système cardio-vasculaire (variabilité de la fréquence cardiaque par exemple) et au système nerveux (anomalie de répartition des bandes de fréquences EEG et ECG par exemple), ou à l'apoptose, devraient être approfondies. Il en est de même pour certaines applications médicales : stimulation nerveuse et action anti-tumorale avec, dans ce dernier cas, une action identifiée sur le cytosquelette.

Conclusion générale pour les études biologiques et épidémiologiques dans la bande 9 kHz – 400 MHz

Les quelques études publiées ne suggèrent pas de risque pour la santé humaine à des niveaux d'exposition non thermiques. La plupart de ces études concernent les travailleurs. Les résultats biologiques sont toujours limités et contradictoires.

La majorité des études ne suggèrent pas d'effets sanitaires, à l'exception de quelques résultats, limités à une légère augmentation de malformations morphologiques mineures chez l'animal. Ces effets mineurs et non spécifiques semblent limités à certaines espèces animales et sont difficilement extrapolables à l'homme.

Il apparaît également nécessaire de mieux caractériser l'exposition professionnelle et du public. Dans le cas d'une exposition localisée, le seuil d'apparition des effets est mal connu et devrait être étudié dans les recherches futures.

Etudes biologiques et cliniques expérimentales pour les fréquences supérieures à 400 MHz

Les études originales publiées dans des revues anglophones à comité de lecture du 1er janvier 2005 au 1er avril 2009 ont été systématiquement analysées.

De nombreuses études de qualité sont parues aux cours de ces dernières années. Cependant, une proportion importante des études analysées présente des lacunes méthodologiques, le plus souvent dans la partie dosimétrie (évaluation de l'exposition), mais aussi, parfois, dans la partie biologie. Cela concerne la majorité des études positives, c'est-à-dire qui montrent des effets des radiofréquences, mais aussi certaines études négatives.

D'après le bilan global des analyses, sur 288 articles rattachés aux différentes catégories présentées, 226 articles de recherche ont été analysés, hors revues et articles non anglophones. Il peut être tentant de faire un simple comptage des résultats « positifs » et des résultats « négatifs ». Cependant, comme cela a été précisé précédemment, il est nécessaire de prendre en compte le degré de validité des parties biologique et physique de chaque étude.

D'après les analyses systématiques qui ont été faites dans le cadre de cette expertise, il apparaît que :

Sur les 182 études qui ont été réalisées *in vitro* et *in vivo* sur l'animal, 82 études trouvent des effets biologiques des radiofréquences et 100 n'en montrent pas.

- Parmi les 82 études trouvant des effets, 45 n'ont pas une dosimétrie validée, soit 55 %. Parmi les 37 articles restants, seuls 9 présentent également une méthodologie très satisfaisante pour la partie biologique. Par conséquent, 11 % des études qui montrent des effets ont une méthodologie rigoureuse pour à la fois les parties physique et biologique. Ces effets concernent principalement des fonctions cellulaires observées in vitro (apoptose, endocytose, stress oxydatif, *etc*.).

- Parmi les 100 études ne trouvant pas d'effets, 13 n'ont pas une dosimétrie validée, soit 13 %. Parmi les 87 articles restants, 69 présentent une méthodologie très satisfaisante pour la partie biologique. Par conséquent, 69 % des études qui ne montrent pas d'effet ont une méthodologie rigoureuse, à la fois pour les parties physique et biologie.

44 études ont été réalisées sur l'humain, dont 20 montrent des effets et 24 n'en montrent pas. Le système d'exposition utilisé étant souvent un téléphone du commerce, le DAS maximal ne dépasse pas les limites réglementaires. Il est néanmoins important que l'exposition soit caractérisée rigoureusement pour éliminer la possibilité d'autres effets liés à l'environnement des sujets.

- Parmi les 20 études montrant des effets, 4 équipes ont suivi des protocoles rigoureux pour la partie biologique, soit 20 % des études et seulement 2 équipes ont réalisé les expériences dans des conditions d'expositions parfaitement caractérisées.
- Parmi les 24 études ne trouvant pas d'effet, 17 présentent une méthodologie rigoureuse, soit 71 % des études, mais seulement 3 ou 4 équipes ont réalisé les expériences dans des conditions d'expositions parfaitement caractérisées.

Les résultats des études présentant des lacunes méthodologiques n'ont pas été pris en compte pour formuler des conclusions. Le nombre important de ces travaux s'explique par le fait que les expériences visant à rechercher les effets des radiofréquences sont justement construites de manière à mettre en évidence des effets très faibles et s'appuient donc sur les variations de systèmes biologiques très sensibles susceptibles d'être modifiés au moindre biais, si toutes les précautions ne sont pas mises en œuvre.

Cependant, quelques études dotées d'une méthodologie apparemment correcte trouvent des effets mineurs et hétérogènes, elles pourraient être complétées et reproduites.

Les conclusions du groupe de travail sont donc fondées sur des résultats de travaux rigoureux et sur la concordance de ces résultats obtenus par plusieurs études différentes.

Au vu de l'analyse détaillée et critique des travaux effectuée par le groupe de travail, et compte tenu par ailleurs de l'état antérieur des connaissances, aucune preuve convaincante d'un effet biologique particulier des radiofréquences n'est apportée pour des niveaux d'exposition non thermiques, dans les conditions expérimentales testées.

À ce jour, aucun mécanisme d'interaction onde-cellule n'a été identifié.

Il ressort de cette analyse que, dans les conditions expérimentales non thermiques testées, les radiofréquences supérieures à 400 MHz :

- ne modifient pas les grandes fonctions cellulaires telles que i) l'expression génique ; ii) la production de radicaux libres oxygénés (ROS) ; et iii) l'apoptose notamment des cellules d'origine cérébrale (provenant de gliome ou de neuroblastome humains), les plus exposées en cas d'utilisation d'un téléphone mobile ;
- ne sont pas un facteur de stress pour les cellules, en comparaison des facteurs de stress avérés. Les seuls effets de stress observés sont des effets thermiques associés à des niveaux d'exposition élevés ;
- ne provoquent pas d'effet génotoxique ou co-génotoxique reproductibles à court ou à long terme et ne sont pas mutagènes dans les tests de mutagénèse classiques ;
- ne provoquent pas d'augmentation d'incidence ou l'aggravation de cancers, en particulier pour des expositions chroniques. Les résultats convergent donc vers une absence d'effet cancérogène ou co-cancérogène des radiofréquences pour des expositions non thermiques ;
- n'ont pas d'effet délétère sur le système nerveux, que ce soit en termes de cognition et de bien-être, en termes d'intégrité de la barrière hémato-encéphalique ou en termes de fonctionnement cérébral général ;
- n'ont pas d'effet susceptible d'affecter le fonctionnement du système immunitaire ;
- n'ont pas d'impact sur la reproduction et le développement d'après les études les plus récentes et les mieux paramétrées. Cependant, les résultats ne sont pas homogènes, et plusieurs études devraient être répliquées dans des conditions d'expérimentation fiables, avec notamment des données dosimétriques ;
- n'ont pas d'effet délétère sur le système cochléo-vestibulaire après une exposition aiguë ;

et d'après les résultats d'un nombre limité d'études, les radiofréquences supérieures à 400 MHz :

- ne paraissent pas perturber le système cardio-vasculaire, en particulier la régulation de la pression artérielle et du rythme cardiaque ;
- n'auraient pas d'effet délétère sur le système oculaire ;
- ne modifieraient pas le taux de mélatonine chez l'homme.

Quelques études isolées ont porté sur des effets ponctuels, ce qui ne permet pas de donner une conclusion valide de l'existence de ces effets. Certaines mériteraient d'être reproduites (par exemple sur la modification du débit sanguin cérébral).

Etudes épidémiologiques pour les fréquences supérieures à 400 MHz

Concernant les études épidémiologiques, il n'y a pas à ce jour de preuve de l'augmentation du risque de tumeur intracrânienne lié à l'utilisation régulière du téléphone mobile par un phénomène de promotion. Cependant, une partie de la plus grande étude cas-témoins dans ce domaine, l'étude Interphone, n'a pas encore été publiée. Même s'il est peu vraisemblable

que les résultats globaux diffèrent, il restera à étudier les sources d'hétérogénéité entre toutes les études.

Certains résultats d'études suggèrent la possibilité d'une augmentation du risque de gliomes pour une utilisation d'une durée supérieure à 10 ans. D'autres semblent indiquer une diminution du risque de méningiomes pour une utilisation régulière de moins de 10 ans.

En revanche, les excès de lymphomes et leucémies observés et leur répétition sur trois cohortes de militaires exposés à des radars montrent que l'on ne peut à ce jour écarter la possibilité d'une association entre l'exposition professionnelle aux radars de plus de 2000 MHz et le risque de lymphomes et leucémies. [Certains membres du CES font observer que la population spécifique des militaires est connue pour être exposée à d'autres facteurs de risque de lymphomes et leucémies et que les caractéristiques des radars mis en cause sont spécifiques.] Un certain nombre d'études réalisées sur des populations professionnelles soulèvent des hypothèses d'augmentation de risque de cancer (tumeurs cérébrales, cancers des testicules, et mélanomes oculaires).

Hypersensibilité électromagnétique[5]

Personne ne peut contester aujourd'hui la réalité du vécu des personnes qui attribuent leurs symptômes à l'exposition aux radiofréquences. Mais, aucune preuve scientifique d'une relation de causalité entre l'exposition aux radiofréquences et l'hypersensibilité électromagnétique n'a pu être apportée jusqu'à présent.

La plupart des recherches sur l'hypersensibilité électromagnétique ont pâti, jusqu'à une date récente, d'une approche inadaptée de symptômes subjectifs (qui constituent l'essentiel de cette situation clinique). Un progrès vient d'être accompli avec la quantification de ces symptômes et leur regroupement en composantes. L'harmonisation des méthodes utilisées laisse espérer la mise au point d'un outil diagnostic acceptable. Parallèlement, un faisceau d'indices concordants a été recueilli, suggérant fortement que des facteurs neuro-psychiques individuels interviendraient, au moins en partie, dans la genèse de l'hypersensibilité électromagnétique.

Les seuls résultats positifs obtenus à ce jour sur le plan thérapeutique sont ceux obtenus par des thérapies comportementales ou des prises en charge globales.

Effets des radiofréquences sur les enfants

Une partie de la population nourrit des craintes quant aux effets des champs électromagnétiques radiofréquences sur la santé des fœtus, des enfants et des adolescents. Ces craintes sont justifiées par l'utilisation de plus en plus précoce des techniques de communication sans fil, par la durée bien plus longue de l'exposition à laquelle ces enfants seront soumis et par la vulnérabilité supposée plus grande de leurs tissus. Ces problèmes ont été abordés dans plusieurs parties du rapport. On peut en faire la synthèse suivante.

Des études et recherches dosimétriques spécifiques ont été réalisées ou sont actuellement en cours. Leurs premiers résultats ne sont pas homogènes. Ces études doivent être poursuivies, pour permettre par exemple de mieux évaluer l'impact de la variabilité des différentes morphologies et des caractéristiques physico-chimiques des tissus sur le DAS, et pour valider les modèles, les méthodes de calcul et les méthodes de mesure utilisés.

[5] Lors d'un *workshop* sur ce thème en 2004, un groupe d'expert de l'OMS a proposé de remplacer ce terme d'hypersensibilité électromagnétique par celui d'intolérance environnementale idiopathique attribuée aux ondes électromagnétiques

Des limitations d'ordre éthique évidentes font que les études et expérimentations impliquant la participation directe d'enfants ont été peu nombreuses et resteront peu nombreuses. Certaines ont mis en évidence une amélioration des performances cognitives qui reste à répliquer. Les recherches expérimentales sur l'animal ont été un peu plus nombreuses. Mais l'extrême diversité des modèles utilisés et les lacunes méthodologiques de la plupart de ces études ne permettent pas de formuler une conclusion cohérente sur le sujet. Ces recherches expérimentales doivent être poursuivies. Par ailleurs, une étude épidémiologique cas-témoin sur les tumeurs cérébrales de l'enfant est en cours.

Conclusion générale sur les effets sanitaires

L'actualisation de cette expertise collective a reposé sur l'analyse d'un très grand nombre d'études, dont la majorité a été publiée au cours des cinq dernières années. La validité de ces études a été analysée et n'est pas toujours acquise. Les données issues de la recherche expérimentale disponibles n'indiquent pas d'effets sanitaires à court terme ni à long terme de l'exposition aux radiofréquences. Les données épidémiologiques n'indiquent pas non plus d'effets à court terme de l'exposition aux radiofréquences. Des interrogations demeurent pour les effets à long terme, même si aucun mécanisme biologique analysé ne plaide actuellement en faveur de cette hypothèse.

Recommandations de l'expertise collective

S'agissant des recommandations en matière d'études et de recherche

Pour les effets biologiques

Considérant en particulier :

- les lacunes méthodologiques relatives à la caractérisation de l'exposition en conditions expérimentales observées dans de nombreuses études ;
- l'éventualité d'effets à très long terme sur des pathologies particulières et la nécessité de mieux documenter l'effet des expositions de très longues durées (chroniques) ;
- l'intérêt de poursuivre la recherche de certains effets biologiques éventuels pour des expositions à des niveaux « non thermiques » ;
- qu'un grand nombre d'études qui trouvent des résultats positifs à la suite d'expériences mal conduites n'ont pas lieu d'être reproduites, car d'autres travaux de qualité ont, par ailleurs, déjà répondu aux hypothèses soulevées ;

<u>le CES recommande :</u>

1. de veiller à la qualité méthodologique des études *in vitro* et *in vivo* concernant principalement la partie physique (caractérisation de l'exposition et forme des signaux), mais également la partie biologie (expériences en aveugle, contrôles appropriés, identification des faux positifs, répétition des expériences, puissance statistique suffisante, *etc.*) ;
2. de mener des études notamment sur la reproduction et le développement sur plusieurs générations d'animaux (par exemple sur des animaux dotés d'une prédisposition à des maladies pour lesquelles des gènes humains de susceptibilité sont connus - maladies neuro-dégénératives, certains cancers, maladies auto-

immunes), à comparer toujours avec des animaux normaux et pour des conditions d'exposition réalistes parfaitement caractérisées ;

3. de répliquer quelques études analysées dans ce rapport et qui montrent des effets biologiques probablement physiologiques (notamment sur le débit sanguin cérébral) ;
4. de développer des études sur les bandes de fréquences inférieures à 400 MHz (en particulier pour les effets chroniques de faibles puissances) et celles des plus hautes fréquences.

Pour l'épidémiologie

Considérant en particulier :

- les nombreuses lacunes méthodologiques relatives à la caractérisation de l'exposition des personnes ;
- l'intérêt d'établir une surveillance de l'exposition à destination de la population,
- l'intérêt des études de cohortes ;
- que la question de l'existence de troubles ressentis à proximité d'antennes de stations de base de téléphonie mobile reste ouverte ;
- l'hétérogénéité observée entre les résultats des deux études cas-témoins obtenues par le groupe de recherche de Hardell et les autres études ;

<u>le CES recommande :</u>

1. d'intensifier les efforts pour inclure dans les études épidémiologiques la caractérisation la plus précise possible de l'exposition des populations cibles ;
2. d'évaluer la possibilité d'études épidémiologiques dans les populations de travailleurs exposés aux radiofréquences (comme par exemple les militaires exposés à certains radars, les professionnels intervenant sur les systèmes WiMAX et TMP, les professionnels de la soudure du plastique, *etc.*) dans l'objectif d'identifier des effets éventuels observés pour les populations les plus exposées et d'évaluer la possibilité de l'extrapoler à la population générale ;
3. d'étudier la faisabilité d'une participation française à des études internationales, notamment l'étude de cohorte COSMOS (cohorte internationale sur les effets possible sur la santé de l'utilisation à long terme du téléphone mobile) ;
4. d'examiner la possibilité d'étudier la question des radiofréquences à partir de cohortes épidémiologiques existantes (ELFE, Constances),
5. de répliquer avec une meilleure puissance statistique des études du type de celles menées par Hutter *et al.* et Heinrich *et al.* ;
6. d'entreprendre une ré-analyse des données incluses dans les études du groupe de Hardell, en vue de comprendre leur hétérogénéité par rapport aux autres études ;
7. d'analyser la faisabilité et, éventuellement, d'entreprendre de nouvelles études pour des expositions chroniques de faible puissance aux fréquences inférieures à 400 MHz ;
8. d'effectuer une méta-analyse avec une méthodologie rigoureuse dès que les résultats de l'étude Interphone seront intégralement publiés. Même s'il est peu vraisemblable que les résultats globaux diffèrent, il restera à étudier les sources d'hétérogénéité entre toutes les études.

Pour l'hypersensibilité électromagnétique

Considérant en particulier :

- les progrès récents en matière de quantification des symptômes associés ;
- l'implication de différents facteurs neuro-psychiques individuels dans la genèse de l'hypersensibilité électromagnétique ;
- l'intérêt de mettre en place un protocole d'accueil et de suivi des patients hypersensibles ;

le CES recommande :

1. le développement et l'évaluation d'un outil de diagnostic clinique de l'hypersensibilité électromagnétique basé sur les travaux d'Eltiti *et al.* (2007), de Hillert *et al.* (2008) et de Brandt *et al.* (2009) ;
2. la définition des modalités d'une prise en charge globale des sujets hypersensibles (traitement des autres causes de symptômes fonctionnels, traitement symptomatique des plaintes résiduelles fonctionnelles, prise en charge des facteurs psychiques identifiés, *etc.*) ;
3. l'organisation d'un suivi des patients et, si possible, d'une centralisation de ce suivi ;
4. le développement de l'information et de la formation des professionnels de santé ;
5. le développement de travaux de recherche présentant des protocoles cliniques et d'exposition rigoureux (relations entre l'hypersensibilité électromagnétique et d'autres syndromes fonctionnels ; relation entre l'hypersensibilité électromagnétique et l'électrosensibilité ; modification de l'imagerie fonctionnelle cérébrale, *etc.*).

S'agissant des recommandations en matière d'expositions

Pour la caractérisation des expositions

Considérant en particulier :

- l'intérêt d'identifier les lieux (en intérieur et à l'extérieur) pour lesquels des niveaux d'exposition « atypiques » (c'est à dire dépassant le niveau moyen ambiant) seraient observés ;
- l'intérêt d'une connaissance approfondie des expositions individuelles, y compris en continu et à long terme ;
- l'intérêt de renforcer la description des expositions en vue de disposer d'une possibilité de surveillance ;
- l'intérêt de disposer d'une métrologie précise et reproductible ;
- l'intérêt d'objectiver les niveaux d'expositions réels de la population générale ;

le CES recommande :

1. qu'une attention particulière soit apportée à l'ensemble des protocoles de mesure afin qu'ils soient en phase avec les évolutions techniques. Le groupe de travail encourage en particulier les évolutions en cours du protocole de l'ANFR pour une meilleure prise

en compte des bandes de fréquences Wi-Fi, WiMAX et des signaux impulsionnels (radars) ;

2. de travailler sur la définition et le choix de grandeurs représentatives de l'exposition réelle des personnes aux ondes provenant de l'ensemble des émetteurs radiofréquences ;
3. la poursuite du développement des exposimètres portables, des sondes de mesure fixes et autonomes, de méthodes de simulation et de cartographie de l'exposition et d'études afin de mieux définir leurs conditions d'utilisation ;
4. d'aller vers une description spatiale plus exhaustive de l'exposition aux champs radiofréquences, en milieu urbain notamment ;
5. le renforcement de la description des niveaux d'exposition pour les professionnels les plus concernés.

Pour les niveaux d'exposition

Considérant en particulier :

- le fort développement du recours aux technologies utilisant les radiofréquences qui pourraient conduire à un renforcement des niveaux d'exposition ;
- les préoccupations du public liées à l'exposition aux sources de radiofréquences ;
- le souhait de modérer des niveaux d'exposition aux radiofréquences et les possibilités techniques disponibles permettant cette réduction pour des appareils du type téléphone mobile, veille-bébé, téléphone sans fil DECT, *etc*. ;

<u>le CES informe des possibilités suivantes :</u>

1. la généralisation de la mise à disposition des utilisateurs des indicateurs d'exposition maximale (DAS par exemple) pour tous les équipements personnels utilisant la technologie des radiofréquences (téléphones portables, DECT, veille-bébé, *etc*.) ;
2. l'engagement de réflexions quant à la diminution des niveaux d'exposition de la population générale dans les lieux présentant des valeurs sensiblement plus élevées que le niveau moyen ambiant ;
3. fournir aux utilisateurs d'équipements personnels émetteurs de radiofréquences des mesures simples pour leur permettre de réduire leur exposition, s'ils le souhaitent. Par exemple :
    - favoriser les systèmes qui minimisent la puissance émise des téléphones sans fil DECT ;
    - généraliser la présence d'interrupteur de l'émission Wi-Fi sur les émetteurs de type « modem » ;
    - permettre sans surcoût les accès filaires multiples sur les « modem » Wi-Fi ;
    - le niveau d'exposition diminuant fortement avec la distance à l'émetteur, sur des équipements tels que la base d'un téléphone DECT, des périphériques *Bluetooth* ou des veille-bébé, une distance de quelques dizaines de centimètres entre l'appareil et l'utilisateur permet de diminuer considérablement l'exposition.
4. l'efficacité des dispositifs « anti-ondes » devrait être évaluée et portée à la connaissance du public.

Considérant :

- la demande de réduction, à service rendu égal, des niveaux d'exposition induits par les antennes relais de téléphonie mobile à une valeur qui ne repose sur aucune justification scientifique, demande exprimée notamment à l'occasion de la table ronde « radiofréquences, santé, environnement » du 25 mai 2009 ;
- que certaines villes françaises ont exprimé le souhait d'expérimenter des valeurs limites d'exposition différentes des valeurs limites réglementaires ;

le CES recommande de peser avec soin les conséquences d'une telle réduction, notamment :

en termes de multiplication du nombre des antennes et en termes d'augmentation parallèle possible de l'exposition de la tête aux radiofréquences émises par les téléphones mobiles.

D'une manière plus générale

Considérant en particulier :

- la multidisciplinarité et la complexité de la description d'éventuels effets sanitaires associés aux radiofréquences ;
- la nécessaire indépendance des experts et des équipes de recherche impliqués sur cette thématique ;
- la nécessité d'une veille permanente quant aux nouveaux travaux produits sur un sujet en évolution constante ;
- la nécessaire implication sur les enjeux associés aux radiofréquences de l'ensemble des parties prenantes ;

le CES recommande :

1. la collaboration étroite entre physiciens, spécialistes en dosimétrie biologique et biologistes pour la réalisation des études sur les effets biologiques des radiofréquences ;
2. le financement des travaux de recherche par une structure garantissant l'indépendance et la transparence des études menées ;
3. la mise en place d'une structure permanente, associant l'ensemble des parties prenantes, assurant le suivi des connaissances en matière d'effet des radiofréquences et l'organisation de rencontres de travail régulières entre les scientifiques de toutes disciplines associés à la question ;
4. de favoriser la concertation et le débat autour des nouvelles implantations ou modifications d'émetteurs radiofréquences (téléphonie mobile, télévision mobile personnelle, WiMAX, etc.), en impliquant l'ensemble des acteurs concernés le plus en amont possible du dossier ;
5. de poursuivre au niveau national les enquêtes sur des échantillons représentatifs afin de suivre l'évolution des préoccupations des français vis-à-vis des radiofréquences ;

6. d'améliorer l'information du public, en particulier par la mise en place d'un portail internet notamment destiné aux collectivités locales ;

et le CES propose que l'impact des usages des technologies sans fil sur la qualité de vie soit étudié plus avant.

Maisons-Alfort, le 8 octobre 2009

Au nom des experts du CES « Evaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements »,

le Président du CES

ACB : analyse coûts bénéfices

ACGIH : *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* – Association américaine d'hygiénistes du travail de l'Etat

ACRBR : *Australian Center for RF Bioeffects Research* – Centre australien pour la recherche des effets biologiques des radiofréquences

ADN : acide désoxyribonucléique

ADSL : *Asymmetrical Digital Subscriber Line*

AFOM : Association française des opérateurs mobiles

AM : *Amplitude modulation* - modulation d'amplitude

AMF : Association des Maires de France

Anfr : Agence nationale des fréquences

ANSI : *American National Standards Institute* – Institut américain de normalisation

Arcep : Autorité de régulation des communications électroniques et des postes

ARN : acide ribonucléique

BCCH : *Broadcast Control CHannel* - canal de contrôle de diffusion

BEM : *Boundary Element Method* – Méthode des éléments frontières

BHE : barrière hématoencéphalique

BLR : boucle local radio

BLU : bande latérale unique

CB : *citizen band* : canaux banalisés

CDC : *Centers for Desease Control* – Centre de contrôle et de de prévention des maladies

CDMA : *Code Division Multiple Access*

CEI : Commission électrotechnique internationale

CENELEC : comité européen de la normalisation électrotechnique

CEM : Compatibilité électromagnétique

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer

CSA : Conseil Supérieur de l'Audovisuel

CSTEE : Comité scientifique sur la toxicologie, l'écotoxicologie et l'environnement

DAB : *Digital audio broadcasting* - Radio-diffusion numérique

DAS : Débit d'absorption spécifique

DECT : *Digital Enhanced Cordless Telecommunications*

DMBA : 7,12-dimethylbenz[α]anthracene

DMF : *Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms* – programme de recherche allemand sur les communications mobiles

DVB : *Digital Video Broadcast* – Télé-diffusion numérique

DVB-H : *Digital Video Broadcast* - Handheld – Télé-diffusion numérique portable

DVB-T : *Digital Video Broadcast* - Terrestrial – Télé-diffusion numérique terrestre

EDGE : *Enhanced Data Rates for Global Evolution*

EBF : extrêmement basse fréquence

EEG : électro-encéphalogramme

ELF : *Extremely Low Frequency – extrêmement basse fréquence*

EHS : électro-hyper-sensibilité

EM : Electromagnétique

FDA : *Food and Drug administration* – administration américaine des aliments et médicaments

FDMA : *Frequency Division Multiple Access – Accès multiple par division de fréquence*

FDTD : *Finite difference Time domain* – différences finies dans le domaine temporel

FEM : *Finite Element Method* – Méthode des éléments finis

FH : Faisceaux hertziens

FI : fréquence intermédiaire

FM : *Frequency modulation* - Modulation de Fréquence

FSK : *Frequency Shift Keying* – décalage de modulation de fréquence

GFSK : *Gaussian filtered Frequency Shift Keying* - décalage gaussien de modulation de fréquence

GPS : *Global Positioning System – système global de positionnement*

GSM : *Global System for Mobile communications – système global de communications mobiles*

HF : Hautes fréquences

HSEM : hypersensibilité électromagnétique

HSP : Heat shock Protein – protéine de choc thermique

Icnirp : *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* – Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants

IEEE : *Institute of electrical and electronics engineers* – organisation des ingénieurs en électricité et électronique

IEI : intoléance environnementale idiopathique

INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des risques

INIRC : *International Non-Ionizing Radiation Committee* – comité international sur les rayonnements non-ionisants

INPES : institut national de prévention et d'éducation pour la santé

IMC : indice de masse corporelle

IPCS : *International Programme on Chemical Safety* : Programme international sur la sécurité des substances chimiques

IRM : Imagerie par résonance magnétique

IRPA : *International Radiation Protection Association* : association internationale pour la protection contre les rayonnements

IRSN : institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

ISM : Industriel, Scientifique et Medical

ISO : *International Organization for standardization* – Organisation internationale de normalisation

LAN : *Local Area Network – réseau local*

LPE : Loi de protection environnementale

LPS : Lipoplysaccharide

LTE : *Long Term Evolution* – Evolution à long terme

MTHR : *Mobile Telecommunications and Health Research Program* - programme de recherche britannique en santé et communication mobile

MVNO *: Mobile Virtual Network Operator – Opérateur de réseau mobile virtuel*

NCRP *: National Council on radiation protection and measurements* – Conseil national pour la mesure et la protection contre les rayonnements – Etats-unis

NRPB : National Radiation Protection Board – organisme de radioprotection britannique

OCDE : organisation de coopération et de développement économique

OFSP : Office Fédéral de Santé Publique Suisse

OMS : Organisation mondiale de la santé

OR : *Odds ratio* – Rapport des cotes

ORNI : Ordonnance du 23 décembre 1999 sur la protection contre le rayonnement non ionisant (Suisse)

PAR : puissance apparente rayonnée

PIRE : puissance isotrope rayonnée équivalente

PMR : *Private Mobile Radio* – réseau de radiocommunications professionnel

PSK : *Phase Shift Keying* – décalage de modulation de phase

RF : Radiofréquences

RFID : *RadioFrequency Identification* – identification par radiofréquences

RMN : Résonance magnétique nucléaire

RNRT : Réseau national de recherche en télécommunications

ROS : *Reactive oxygen species* – substances oxygénées réactives

RR : risque relatif

RT-PCR : *Reverse transcriptase polymerase chain reaction* – réaction en chaîne par polymerisation – transcirption inverse

RTTE : *Radio and Telecommunications Terminal equipment* – équipement terminal de radio et télécommunications

SAR : *Specific absroption rate* – débit d'absorption spécifique

SCENIHR : *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks* - Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux

SCM : sensibilité chimique multiple

SHS : ciences humaines et sociales

SIG : Système d'Information Géographique

SIR : *Standard Incidence Ratio* – rapport d'incidence standard

SMV : sciences de la matière et de la vie

SSK : *StrahlenshutzKommission* – Commission de protection contre les rayonnements (Allemagne)

SMT : stimulation magnétique transcrânienne

T : Tesla

TA : Tension artérielle

TCH : *Traffic channel* – Canal de trafic

TDF : Télévision de France

TDMA : *Time Division Multiple Access* – Accès multiple par répartition temporelle

TETRA : *Terrestrial Trunked Radio* – réseau radio à resources partagées

TMP : Télévision mobile personnelle

TNT : Télévision numérique terrestre

TRX : *transceivers* – transmetteur

UE : Union européenne

UHF *:* Ultra High Frequency – *Ultra haute fréquence*

UICC : union internationale contre le cancer

UMTS : *Universal Mobile Telecommunication System* – système de communication mobile universel

VDU : *Visual Display Unit* – écran d'affichage

VDT : *Visual Display Terminal* – terminal d'affichage

VHF : *Very high Frequency* – très huate fréquence

WiMAX : *Worldwide Interoperability for Microwave Access* – Interopérabilité mondiale pour l'accès microonde

WLAN : *Wireless Local Area Network* – Réseau local sans fil

Tableau 1 : utilisation du spectre des radiofréquences 63

Tableau 2 : nombre de stations radioélectriques - source ANFR - mars 2009 64

Tableau 3 : réseaux de radiodiffusion et télédiffusion 65

Tableau 4 : ordre de grandeur des puissances et portées d'émission de quelques émetteurs radiofréquences 71

Tableau 5 : grandeurs physiques caractérisant l'interaction onde / matière, en fonction de la fréquence 76

Tableau 6 : exemples de valeurs de DAS de téléphones mobiles 85

Tableau 7 : exemples de valeurs de DAS (en W/kg) d'émetteurs Wi-Fi 86

Tableau 8 : exemples de valeurs de DAS d'interphones bébé - source OFSP [Kramer, 2005] 87

Tableau 9 : exemples de valeurs de DAS d'équipements Bluetooth ([Kühn, 2006]) 87

Tableau 10 : bandes de fréquences de mesure selon le protocole de l'ANFR (DR15-v2.1) 90

Tableau 11 : emploi du temps pendant l'enregistrement de l'exposition aux radiofréquences 101

Tableau 12 : Récapitulatif des résultats publiés sur les analyses INTERPHONE nationales de l'utilisation des téléphones portables[1] 254

Tableau 13: Téléphone mobile et risque de tumeurs cérébrales malignes - Gliomes 256

Tableau 14: Téléphone mobile et risque de méningiomes 263

Tableau 15: Téléphone mobile et risque de neurinomes du nerf acoustique 268

Tableau 16: Téléphone mobile et risque de tumeurs des glandes parotides 274

Tableau 17: Téléphone mobile et risque de tumeurs (adénomes) de l'hypophyse 276

Tableau 18: Téléphone mobile et risque d'autres tumeurs : Lymphomes, Cancers du testicule, Tumeurs (Mélanomes) de l'œil 277

Tableau 19: Etudes épidémiologiques identifiant spécifiquement des populations exposées à des champs de fréquences supérieures à 2 GHz 279

Tableau 20 : Fréquence (en %) des symptômes attribués à une exposition à des champs électromagnétiaques 286

Tableau 21 : Sources de champs électromagnétiques (en %) considérées comme cause de symptômes fonctionnels 288

Tableau 22 : Proportion de médecins généralistes croyant que l'exposition aux champs électromagnétiques a un effet défavorable sur la santé 292

Tableau 23 : Liste des publications relatant un essai thérapeutique dans l'EHS et indiquant leur citation dans les trois revues portant sur le sujet. 304
Tableau 24 : Niveaux de référence pour l'exposition des travailleurs et du public en général 329
Tableau 25 : Réglementations dans différents pays 332
Tableau 26 : Comparatif des réglementations en Espagne, Europe et Catalogne 341
Tableau 27 : Comparatif entre l'ordonnance de la région de Bruxelles et le projet de décret Wallon 343
Tableau 28 : Perception des risques environnementaux pour la santé des Français (en pourcentage ; n = 6 007 ; pour monoxyde n = 5 758 ; pour légionelle n = 5 590) 356
Tableau 29 : Sentiment d'information sur les thèmes environnementaux et leurs éventuels effets sur la santé (en pourcentage ; n = 6 007) 357
Tableau 30 : Confiance dans l'expertise scientifique sur les différents thèmes environnementaux. Personnes se déclarant « très ou plutôt confiants » (en pourcentage) 358
Tableau 31 : Les risques auxquels les français se sentent exposés (« Dans chacun des domaines suivants, considérez-vous que les risques pour les Français en général sont ») 360
Tableau 32 : La confiance accordée aux autorités par les français pour les protéger (« Avez-vous confiance dans les autorités françaises pour leurs actions de protection des personnes dans les domaines suivants ? ») 362
Tableau 33 : La vérité des informations sur les dangers (« Pour chacun des domaines suivants, estimez-vous que l'on dit la vérité sur les dangers qu'il représente pour la population ? ») 364

Figure 1 : spectre du rayonnement électromagnétique 57
Figure 2 : rayonnement d'un émetteur radioélectrique 59
Figure 3 : principe d'une transmission radioélectrique 60
Figure 4 : exemples de modulation d'un signal transmis 61
Figure 5 : exemple de spectre mesuré de radiodiffusion FM et de télévision analogique 65
Figure 6 : réseau cellulaire de téléphonie mobile 66
Figure 7 : bandes de fréquences de la téléphonie mobile GSM 67
Figure 8 : canaux et voie balise en téléphonie mobile GSM 68
Figure 9 : bandes de fréquences de la téléphonie mobile UMTS 68
Figure 10 : signal Wi-Fi - source Supélec [Supélec- Wi-Fi] 70
Figure 11 : évolution du nombre d'abonnés à la téléphonie mobile dans le monde 74
Figure 12 : zones de champ proche et de champ lointain 79
Figure 13 : méthodes de mesure pour l'évaluation du DAS (source ANFR) 82
Figure 14 : exemple de périmètres de sécurité radioélectrique autour d'antennes de station de base de téléphonie mobile installées sur des toits terrasses 84
Figure 15 : équipements de mesure des champs électromagnétiques - sources constructeurs 90
Figure 16 : exemple de résultat de mesure selon le protocole de l'ANFR 93
Figure 17 : distribution des résultats de mesures selon le protocole ANFR réalisées entre 2006 et 2008 (source ANFR) 94
Figure 18 : exemple de mesure de champ électrique autour d'un pylône de station de base de téléphonie mobile (source ANFR) 95
Figure 19 : niveau de champ électrique mesuré à proximité d'émetteurs radiofréquences – source : [Kramer, 2005] et [Kühn, 2006] 98
Figure 20 : niveau de champ électrique mesuré à proximité d'émetteurs Wi-Fi – 100
Figure 21 : enregistrement de l'exposition individuelle aux radiofréquences avec un exposimètre portable pendant 24 heures (source : université Lyon 1). 102

Figure 22 Illustration schématique du niveau de preuve associé aux principaux types d'études épidemiologiques _____ 111

Figure 23 Réaction en chaîne des différents mécanismes de défense spécifiques (*illustration d'après X. Leverve, Conférences d'actualisation de la SFAR,* 2004, Elsevier SAS, p*. 295-302*). ____ 149

Figure 24 : représentation graphique des résultats d'études de provocation (d'après Röösli, 2008) 301

Figure 25 : Moyenne des mesures obtenues dans la région de Valence, Espagne (en V/m) _____ 342

Figure 26: Evolution de la perception des risques liés aux stations de base de téléphonie mobile _ 361

Figure 27 : Evolution de la confiance accordée aux autorités par les français pour les protéger des stations de bases de téléphonie mobile depuis 2004_____ 363

Figure 28 : Evolutions de la confiance dans les informations diffusées sur les dangers liés aux stations de base de téléphonie mobile depuis 2002 _____ 365

Figure 29 : Acceptabilité des installations à risques (« Accepteriez-vous de vivre près de ») _____ 365

Figure 30 : Evolution de l'acceptabilité des installations à risques _____ 366

Figure 31 : Pour chacun des facteurs suivants, pouvez-vous me dire dans quelle mesure vous pensez qu'ils affectent votre santé - % UE25 _____ 367

Figure 32 : D'après ce que vous savez, parmi les objets suivants lesquels peuvent émettre des champs électromagnétiques ? - UE25 (Plusieurs réponses possibles) _____ 368

Figure 33: Etes vous préoccupé(e) par les possibles risques pour la santé liés aux champs électromagnétiques ? (Réponses : Très préoccupé(e) + plutôt préoccupé(e)) _____ 369

Figure 34 : Comparaison de la perception des risques et bénéfices associés à différentes technologies (Henson *et al.* 2008) _____ 374

Figure 35 : localisation de différentes technologies en fonction du 1er et du 3ème axe d'une analyse factorielle (Henson *et al.* 2008)_____ 375

Figure 36 : Publications *peer-reviewed* relatives aux effets biologiques des radiofréquences (période 1990-2007) [Veyret, 2008] _____ 380

Figure 37 : Méthodologie d'évaluation et de surveillance intégrée [Kuzma *et al,* 2008]_____ 386

Introduction

La gamme des rayonnements électromagnétiques naturels et artificiels est vaste : elle comprend les rayonnements ionisants et les rayonnements non ionisants, dont les radiofréquences représentent une partie, de 9 kiloHertz (kHz) à 300 gigaHertz (GHz). L'utilisation des ondes électromagnétiques non ionisantes s'est développée de façon continue depuis la mise en place du réseau de distribution électrique au début du siècle dernier. Il s'en est suivi l'apparition d'une quantité d'appareils d'usage courant. Les radiofréquences ont été mises à profit, en particulier pour la radiodiffusion, puis la télédiffusion. Des applications domestiques, médicales et industrielles se sont également développées : four à micro-ondes, plaques à induction, radars, résonance magnétique nucléaire, *etc*.

Au cours des dernières décennies, une véritable révolution a eu lieu dans le domaine des technologies sans fil avec l'apparition de la téléphonie mobile, du Wi-Fi, du *Bluetooth*, et des étiquettes RFID, pour ne citer que les plus connues, qui connaissent un développement de grande ampleur.

L'usage des radiofréquences est réglementé, notamment pour l'utilisation du spectre des fréquences, et pour l'exposition des personnes qui en résulte. Des valeurs limites d'exposition ont ainsi été établies en fonction des effets connus sur la santé, résultant de leur interaction avec le corps humain. Néanmoins, en raison du développement rapide et massif de ces technologies, des questions se posent sur leurs éventuels effets à long terme, à faible niveau.

Afin d'apporter des éléments de réponse, des études ont été conduites dans le monde entier depuis plus d'une vingtaine d'années. De nombreux domaines de recherche sont concernés par cette thématique relative au risques potentiels liés aux radiofréquences : en physique pour l'étude des interactions ondes-matière, en biologie, en épidémiologie et en médecine pour celle des effets biologiques et sanitaires ou, plus récemment, en sciences humaines et sociales.

Pour répondre aux questions soulevées par les usages des radiofréquences, l'Afsset a expertisé à plusieurs reprises le domaine de leurs effets sanitaires, en 2003 et 2005, avec la publication d'avis et de rapports d'expertise collective sur la téléphonie mobile et en 2009 sur les systèmes d'identification par radiofréquences (RFID). La mise à jour de ces avis fait partie intégrante des missions de l'Afsset, qui a élargi, à la demande de ses ministères de tutelles, le champ d'expertise de la mise à jour des connaissances scientifiques relatives à la téléphonie mobile « à l'ensemble des applications utilisant des champs électromagnétiques radiofréquences », hors RFID.

Un groupe de travail (GT), coordonné par l'Afsset, a été installé par le comité d'experts spécialisés (CES) « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » dans le courant de l'été 2008, suite à un appel à candidatures public. La première réunion de ce groupe s'est tenue au mois de septembre 2008.

L'une des nouveautés de cette expertise collective réside dans l'élargissement des compétences du groupe d'experts – dont la composition figure au début de ce rapport – au domaine des sciences humaines et sociales. La composition pluridisciplinaire du groupe de travail a constitué l'une des richesses de cette l'expertise, d'autant plus que le contexte socio-politique de la thématique des radiofréquences est complexe et en constante

évolution, tant sur le plan juridique, que politique avec, par exemple, la mise en place de la Table Ronde « radiofréquences, santé et environnement » en mai 2009.

La seconde nouveauté de cette expertise réside dans la mise en application de la charte dite de « l'ouverture à la société », co-signée par l'Afsset, l'Ineris et l'IRSN et plus particulièrement du troisième engagement relatif à « la transparence des travaux en rendant publics dès que possible leur résultat final et les méthodes mises en œuvre pour les obtenir ». Cette ouverture s'est notamment concrétisée par une démarche de la direction générale de l'Afsset qui, conjointement avec le Président du CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements », a proposé aux quatre associations actives dans le domaine des champs électromagnétiques[6] de désigner l'un de leurs membres pour être observateur au sein du groupe de travail. Celui-ci a assisté à toutes les réunions et a été invité à toutes les auditions du groupe de travail depuis décembre 2008 jusqu'à la fin des travaux.

Ces innovations dans la démarche d'expertise collective de l'Afsset ont permis aux membres du groupe de travail de confronter leurs méthodes et leurs points de vue afin d'enrichir le champ de l'expertise. En effet, la lettre de saisine demandait explicitement de prendre en compte les « attentes de la société civile », attentes évaluées et analysées en tant que telles dans le rapport et également abordées grâce à la prise en compte de différents éléments de contexte clefs, interconnectés, regroupant les aspects économiques, patrimoniaux, familiaux, politiques, judiciaires ou citoyens.

Le présent rapport du groupe d'experts s'inscrit aussi dans un contexte national et international très riche d'activités de recherche et une demande sociale forte surtout en ce qui concerne les stations de base de la téléphonie mobile. Ce rapport fait donc le point sur les travaux scientifiques, parus depuis janvier 2005, qui n'ont pas été pris en compte dans le précédent rapport de l'Afsset [Afsset, 2005] et qui concernent tous les travaux de recherche dans le domaine des effets biologiques et sanitaires des champs électromagnétiques non ionisants de la gamme des radiofréquences, exceptés les RFID.

Pour réaliser cette expertise, le GT s'est appuyé sur une très large revue de la bibliographie scientifique internationale complétée par de nombreuses auditions (*cf*. liste des personnes auditionnées avant le sommaire du rapport) d'associations, de gestionnaires de programmes de recherche sur les radiofréquences en France et en Europe, d'experts et de personnalités scientifiques de renom de différents domaines, depuis la technologie de fonctionnement des applications, jusqu'aux études épidémiologiques et sociologiques.

Le rapport introduit la question de la controverse publique autour des radiofréquences en situant la méthodologie d'expertise retenue parmi les différentes approches possibles aujourd'hui. Puis, après un rappel des principes physiques fondamentaux à la bonne compréhension du sujet, il fait le point sur les différentes techniques de caractérisation de l'exposition aux radiofréquences et fait état des principales données d'exposition disponibles. Le choix de séparer la présentation des méthodes utilisées pour déterminer l'exposition des personnes de celle des effets biologiques et sanitaires dans deux chapitres distincts s'est imposé, en raison de la complexité des notions de mesure d'exposition abordée, accrue par le fait qu'elles dépendent fortement des fréquences considérées.

A la suite du chapitre consacré à l'exposition, le rapport présente l'état des connaissances en matière d'études biologiques (études *in vitro* et *in vivo*), cliniques et épidémiologiques relatives aux radiofréquences. Si les données disponibles se sont avérées peu nombreuses pour les fréquences inférieures à 400 MHz – un élément déjà soulevé par le rapport de

[6] Agir pour l'Environnement, Criirem, Priartém et Robin des Toits

l'Afsset sur les RFID en janvier 2009 -, un très grand nombre d'études a été considéré pour traiter des fréquences supérieures à 400 MHz.

Le rapport fait ensuite la synthèse des différents rapports parus sur ces sujets dans le monde depuis 2005, dans le chapitre 5.

Le chapitre suivant présente la réglementation française dans le domaine de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences, en la replaçant dans le contexte des recommandations et lignes directrices internationales, et des autres réglementations nationales, principalement en Europe.

Pour tenir compte des questions spécifiques aux attentes sociales sur le sujet mentionnées dans la lettre de saisine de l'Afsset, le dernier chapitre est consacré à l'identification et à l'analyse des préoccupations de la société civile sur ce thème. En particulier, des enquêtes d'opinion sont analysées, ainsi que les aspects psycho-sociaux et les impacts socio-culturels du développement des technologies radiofréquences. Enfin, les derniers développements judiciaires liés aux implantations d'antennes-relais sont exposés.

En complément aux conclusions générales du rapport apportées par le groupe de travail sur la question de l'impact sanitaire des radiofréquences, des recommandations sont exposées. A la lumière de l'analyse de l'ensemble des études scientifiques identifiées, un certain nombre de pistes de recherche jugées importantes pour une meilleure compréhension du problème sont ainsi présentées.

1 Contexte, modalités de traitement de la saisine et méthodologie d'expertise

1.1 Contexte et modalité de traitement

Différentes dispositions législatives[7] et de programmation[8] demandant à l'Agence française de sécurité sanitaire environnementale (Afsse) de publier régulièrement un document de mise à jour des connaissances scientifiques, dans le domaine spécifique des rayonnements non ionisants de haute fréquence (radiofréquences), utilisés par les systèmes de téléphonie mobile, ont entraîné la publication de deux rapports d'experts coordonnées par l'Afsse : *Téléphonie mobile et santé* du 21 mars 2003 et *Téléphonie mobile et santé* d'avril 2005. C'est à la suite de ces rapports que les ministères chargés de l'environnement et de la santé ont demandé à l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset[9]) en août 2007 de mettre à jour « les connaissances scientifiques sur les effets biologiques et sanitaires de la téléphonie mobile et de les étendre à l'ensemble du domaine des radiofréquences ».

Conformément à la démarche qualité suivie à l'Afsset s'appuyant sur l'utilisation de la norme NF X 50-110 relative à la qualité en expertise, cette demande a été confiée au CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » dès son installation en avril 2008. Ce dernier a mandaté un groupe de travail (GT) « radiofréquences » pour la réalisation des travaux d'expertise.

Le groupe de travail « radiofréquences » coordonné par l'Afsset a été constitué au cours de l'été 2008, suite à un appel à candidatures public. Ce groupe de travail multidisciplinaire dont la composition détaillée figure au début de ce rapport (l'analyse des déclarations publiques d'intérêt figure en annexe 2), a été constitué d'experts dans les domaines de la médecine, de la biologie, de la biophysique, de la métrologie des champs électromagnétiques, de l'épidémiologie, de la sociologie et de la psychosociologie de l'environnement. Le groupe de travail a été constitué d'experts francophones, le recours à des scientifiques non francophones, un temps envisagé, posant différents problèmes (fluidité des discussions, rédaction du rapport, disponibilité des experts, *etc*.).

Dès sa première réunion, le CES « agents physiques » a auditionné trois des cinq associations françaises positionnées sur la thématique des risques sanitaires de la téléphonie mobile (Priartem, Agir pour l'environnement et le Criirem). La quatrième (Robin des toits) a été auditionnée à la séance suivante. L'association Next-Up n'a pas répondu à l'invitation de l'Afsset. Dans un souci de transparence, le président du CES « agents physiques », conjointement avec la Direction Générale de l'Afsset, a proposé aux associations, lors de ces auditions, de nommer un représentant commun à ces quatre associations pour être l'observateur du déroulement des travaux du GT « radiofréquences ». Alors que le Criirem et Robin des toits ont répondu défavorablement à cette proposition, Daniel Oberhausen, membre de l'association Priartém, a été proposé par Priartém et Agir pour l'environnement. Il a donc été nommé observateur au sein du GT « radiofréquences »

---

[7] Loi n° 2001-624 du 17 juillet 2001 portant diverses dispositions d'ordre social, éducatif et culturel.

[8] Plan d'action des pouvoirs publics présenté au Comité national de sécurité sanitaire le 17 décembre 2003.

[9] L'Afsse a évolué vers l'Afsset, en incorporant des missions d'expertise en santé au travail, par le décret 2006-676 du 8 juin 2006.

et a ainsi été convié à assister à toutes les réunions ainsi qu'aux différentes auditions, dès le mois de décembre 2008[10].

Afin d'instruire cette saisine sur les effets des radiofréquences sur la santé, le GT s'est réuni en séance plénière 13 fois (22 jours[11]) entre septembre 2008 et septembre 2009 et l'état d'avancement de ses travaux a été présenté régulièrement au CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements », et discuté au cours de ses séances de travail. Le rapport produit par le GT tient ainsi compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES ayant pris part aux délibérations.

Pour réaliser cette expertise, le groupe de travail s'est appuyé sur une très large revue de la bibliographie scientifique internationale complétée par de nombreuses auditions (*cf.* liste des personnes auditionnées avant le sommaire du rapport) d'associations, d'experts et de personnalités scientifiques. Lors des réunions du groupe de travail ou lors de séances supplémentaires (5 séances complémentaires de tout ou partie du groupe de travail uniquement dédiées aux auditions), 19 auditions ont été réalisées. En complément de ces auditions, 13 contributions écrites ont été sollicitées, (9 ont obtenues des réponses) sur des questions plus précises du groupe de travail.

Les travaux scientifiques pris en compte dans ce rapport sont pour la plupart issus de publications écrites dans des revues internationales anglophones soumises à l'avis d'un comité scientifique de lecture. Quelques documents dérogeant à cette règle ont été pris en compte notamment dans le domaine des sciences humaines et sociales où les études et recherches sur le sujet des radiofréquences sont moins nombreuses. Dans un souci d'exhaustivité, les références ainsi retenues ont été confrontées à celles d'autres rapports internationaux (rapport du SCENIHR 2009, livre bleu de l'Icnirp 2009, rapport du MTHR 2007, rapport BioInitiative 2007, *etc*.). Ce rapport étant une actualisation des connaissances relatives aux effets sanitaires des radiofréquences, les travaux pris en compte sont, pour l'essentiel, ceux qui ont été publiés entre la sortie du dernier rapport de l'Afsset (début 2005) et le 1er avril 2009 pour ce qui concerne la gamme des fréquences supérieures à 400 MHz (comprenant la téléphonie mobile) ainsi que d'autres travaux antérieurs pour les gammes de fréquences qui n'avaient pas été étudiées auparavant par l'Afsset.

1.2 Une controverse publique

Au cours des années récentes, la controverse publique autour de l'impact sanitaire des radiofréquences a connu une ampleur inédite. Tandis que les publications scientifiques et les rapports d'experts se sont multipliés à l'échelle internationale, la question a également donné lieu à des débats au niveau national qui ont largement pris place en dehors de l'univers scientifique. En France, la question des ondes électromagnétiques est ainsi régulièrement soulevée dans l'enceinte parlementaire ; elle fait par ailleurs l'objet d'une importante couverture médiatique et s'invite désormais dans l'arène judiciaire. Surtout, elle a conduit les pouvoirs publics à mettre en place des dispositifs visant à organiser le débat et à favoriser le

[10] Le rôle précis de D. Oberhausen, qui n'est pas intervenu en tant qu'expert au sein du groupe de travail, était d'observer le déroulement des travaux d'expertise. Il a ainsi été convié à toutes les réunions du groupe de travail, ainsi qu'aux différentes auditions programmées pendant le temps de l'expertise. L'observateur a pu s'exprimer, poser des questions, mais n'est pas intervenu dans le travail d'expertise lui-même.

[11] Le GT s'est réuni 4 fois pour une séance d'une journée, et 9 fois pour des séances de deux jours consécutifs.

dialogue entre les différentes « parties prenantes ». À l'initiative du Gouvernement, une table ronde a été organisée en avril-mai 2009 sur le thème « Radiofréquences, santé, environnement ». De son côté, la Ville de Paris a initié une conférence de citoyens sur le thème « ondes, santé, société », dont les conclusions ont été rendues publiques en juin dernier.

Toutes ces initiatives s'appuient sur un constat auquel il est aujourd'hui difficile d'échapper : la question de l'impact sanitaire des radiofréquences suscite une controverse publique qui, à ce titre, se caractérise par une grande hétérogénéité d'acteurs. Elle a pris place au sein de ce que certains sociologues proposent d'appeler un « *forum* hybride » [Callon, Lascoumes et Barthe, 2001], c'est-à-dire un espace où des acteurs variés (élus, scientifiques, associations, syndicats, industriels, *etc*.) entendent prendre part à la discussion des choix techniques qui engagent le collectif et définir le type de savoirs et de considérations sur lesquels ces choix doivent reposer. Dans un tel contexte, l'expertise scientifique est susceptible de fournir une contribution de première importance au débat, mais il va de soi qu'elle ne saurait prétendre l'épuiser.

Un processus dynamique

Comme la plupart des controverses publiques engendrées par les risques collectifs, celle portant sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques connaît un processus dynamique : se déployant dans le temps et dans l'espace, elle se transforme au gré des incertitudes et des interrogations qui accompagnent l'innovation technologique. Ainsi, aux débats sur les effets des champs électromagnétiques basse fréquence, particulièrement vifs aux États-Unis dans les années 1980, ont succédé à partir du milieu des années 1990 des polémiques relatives aux champs haute fréquence, et en particulier ceux émis par les téléphones mobiles et leurs stations de base. On date généralement le début de cette controverse sur les radiofréquences au célèbre procès engagé aux États-Unis contre les constructeurs à la suite du décès d'une patiente atteinte d'une tumeur au cerveau (fin des années 1980). À partir de cette date, un effort de recherche important est consenti afin de mettre au jour les effets sanitaires éventuels de la téléphonie mobile. En Europe, ce sont pourtant moins les risques liés à l'utilisation du téléphone mobile que le déploiement des antennes-relais qui va d'abord focaliser l'attention et faire naître les premières inquiétudes à la fin des années 1990. Alors que des milliers d'antennes ont déjà été déployées, les nouvelles implantations suscitent au niveau local des oppositions de plus en plus fréquentes.

Toutefois, comme le montrent particulièrement bien les travaux menés par Borraz et Salomon ([Borraz, Devigne & Salomon, 2004] ; [Borraz, 2008]), les préoccupations qui s'expriment à propos des antennes ne sont pas seulement, dans un premier temps en tout cas, d'ordre sanitaire. Elles renvoient tout autant à des questions esthétiques, patrimoniales, ou encore de démocratie locale – les riverains concernés dénonçant de manière récurrente le manque d'information et de concertation préalables. Reste que ces mobilisations locales autour des antennes constituent alors un terreau sur lequel vont venir se greffer les préoccupations sanitaires. Les messages d'alerte lancés depuis plusieurs années par certains chercheurs à propos des dangers liés aux champs électromagnétiques rencontrent auprès des groupes mobilisés un écho favorable. Et ce qui était jusque-là appréhendé comme un conflit d'aménagement va progressivement être requalifié comme un « risque sanitaire » devant avant tout faire l'objet d'une prise en charge au sein des dispositifs de sécurité environnementale et sanitaire. Les premiers rapports d'expertise scientifique produits sur le sujet (*cf*. le rapport dit « Zmirou » de 2001) tendent paradoxalement à renforcer les inquiétudes. Les controverses qui se développent sur le sujet en Europe se cristallisent ainsi sur les questions sanitaires, et ce d'autant plus que certains travaux de recherche, bien que contestés au sein de la communauté scientifique, tendent à confirmer l'existence d'une menace. L'analyse de la presse nationale relative aux risques liés à l'usage

du téléphone mobile [Martha *et al.*, 2006] illustre la focalisation progressive du débat sur les effets sanitaires des ondes électromagnétiques, au détriment d'autres enjeux comme les risques liés à l'utilisation du téléphone au volant ou les différents types de nuisances engendrées par le développement massif de cette technologie (incivilité, nuisances sonores, esthétique des antennes, *etc*.), ou encore les bénéfices et avantages de son utilisation.

Au cours de ce processus dynamique, le mouvement contestataire a gagné en force et s'est organisé. En France, des associations nationales de protection de l'environnement, comme *Agir pour l'environnement*, ont pris le relais des mobilisations locales suscitées par l'implantation des antennes. D'autres associations, spécifiquement consacrées à la téléphonie mobile, ne tardent pas à voir le jour. Après la création de *Priartém* en 2000, de nouveaux acteurs associatifs apparaissent sur la scène de la contestation : le *Criirem*, *Next-Up*, *Robin des toits*. L'action de ces associations permet au mouvement contestataire de couvrir l'ensemble des registres et des problèmes posés. Comme ce fut le cas dans d'autres mouvements sociaux, par exemple la lutte contre le sida, on assiste à une sorte de « division du travail protestataire », les uns s'efforçant d'élaborer une contre-expertise à partir de mesures et de données scientifiques, les autres étant davantage préoccupés par la situation des personnes dites « électro-sensibles ». De la diffusion de certaines données scientifiques au recours au procès, en passant par la recherche d'alliés au sein du monde politique ou médical, les modes d'action et les postures diffèrent mais apparaissent complémentaires. Ce mouvement associatif n'est pas seulement porteur de revendications précises, comme l'abaissement des valeurs limites d'exposition pour les antennes-relais ou la reconnaissance et la prise en charge de l'hypersensibilité électromagnétique, il contribue plus généralement à définir un paradigme alternatif dans ce domaine : d'abord en privilégiant une conception élargie de la santé qui inclut le bien-être et la qualité de vie, ensuite en revendiquant la légitimité de formes de savoirs ancrés dans l'expérience et le monde vécu, et enfin en valorisant l'adoption de mesures de précaution compte tenu des incertitudes et des doutes que la science ne parvient pas à lever.

Des incertitudes persistantes

Ces incertitudes persistantes se présentent comme l'un des produits de la controverse en même temps qu'elles en constituent le moteur principal. Sur le plan scientifique, l'évaluation de l'impact sanitaire des radiofréquences se trouve en effet confrontée à une série de difficultés qui paraissent insurmontables. A cet égard, il importe de souligner que le cas des radiofréquences n'a rien de spécifique : ce sont à peu près les mêmes difficultés que l'on rencontre dans la plupart des controverses en santé environnementale où il est question d'exposition à de faibles doses et d'effets potentiels à long terme, qu'il s'agisse de composés chimiques ou de radioactivité. Ici comme ailleurs, si la controverse perdure, c'est que la science se montre impuissante à trancher. D'un côté, elle n'apporte pas de preuve indiscutable d'un effet et, de l'autre, elle est dans l'incapacité de prouver l'inexistence d'un tel effet. Ainsi, en dépit de l'abondante littérature produite sur le problème qui est au cœur de la controverse publique sur les radiofréquences - celui d'éventuels effets sanitaires non thermiques susceptibles d'apparaître en dessous des valeurs limites réglementaires – l'inquiétude demeure. Dans ce domaine de recherche particulier, les tâtonnements inhérents à toute recherche scientifique se trouvent amplifiés par la complexité d'un sujet qui traverse plusieurs disciplines. Rappelons les trois principaux écueils qui se présentent.

- La première et la principale source de difficultés concerne *l'évaluation de l'exposition* aux radiofréquences. L'estimation de cette exposition, que ce soit pour les études en laboratoires ou les études épidémiologiques, est délicate. Elle peut se faire soit par des mesures ou des simulations (étude biologiques), soit par l'interrogation des utilisateurs sur leurs comportements (études épidémiologiques). Cependant, ces deux méthodes comportent des limites :

- la métrologie nécessite des outils et appareils de mesures le plus souvent complexes, dont l'utilisation requiert une grande maîtrise. La mauvaise utilisation de ces matériels peut conduire à une interprétation hasardeuse des résultats obtenus. Par ailleurs, pour de nombreuses raisons (notamment éthiques et pratiques), certaines de ces mesures ne peuvent se faire directement sur l'homme mais en laboratoire, la transposition des résultats obtenus en conditions expérimentales à l'homme pouvant engendrer un certain nombre de biais. (*cf.* chapitre 3 « Métrologie et évaluation des niveaux d'exposition »).
- Les simulations numériques reposent sur des modèles approchant toujours plus le réel, mais par définition imparfaits.
- les interrogatoires auprès des utilisateurs impliquent de faire appel à leur mémoire sur de multiples facteurs (type d'usage du téléphone, utilisation de l'oreillette, type d'appareils, durée des appels, *etc*.) et souvent *a posteriori*. Celle-ci étant faillible, les résultats des études épidémiologiques qui suivent cette procédure sont toujours susceptibles d'être faussés par des biais et contestés pour l'imprécision des données sur lesquelles elles s'appuient. La récolte des données d'exposition est cependant toujours délicate, surtout si elle est effectuée *a posteriori*.

- La deuxième source de difficultés concerne *l'évaluation des effets de cette exposition* et notamment le choix des pistes à explorer. Evaluer de tels effets suppose en effet d'abord de savoir quoi chercher, c'est-à-dire de déterminer le type de pathologies qui pourraient résulter de cette exposition. Pour orienter leurs recherches, les scientifiques s'appuient généralement sur des critères de plausibilité biologique et concentrent leurs travaux en épidémiologie sur certains types de cancers. On sait que le décalage temporel entre une exposition et l'apparition des pathologies qui peuvent en résulter, c'est-à-dire la période de latence, peut dans certains cas être très long. Or, le développement massif de la téléphonie mobile étant relativement récent, on ne dispose pas aujourd'hui du recul suffisant pour conclure avec certitude à l'absence d'effets sanitaires. Pour ce faire, il serait sans doute nécessaire de mener de vastes études épidémiologiques dites « de cohorte ». Mais, hormis le temps et l'investissement que ce genre d'enquêtes nécessite, la multiplication des sources d'exposition aux radiofréquences complique singulièrement la tâche qui consiste à définir une population « non exposée ». Par ailleurs, autre source de difficultés, les résultats des études menées en laboratoire sur des mannequins ou sur des animaux posent la délicate question de leur possible extrapolation à des sujets humains. Les études en population peuvent aussi poser des problèmes d'extrapolation : des fortes puissances aux faibles puissances, des expositions aiguës aux expositions chroniques ou d'une gamme de fréquence à une autre. En raison de ces difficultés, beaucoup d'études souffrent d'un manque de qualité. Quels que soient leurs résultats, elles sont alors vulnérables aux critiques qui ne manqueront pas d'en souligner les biais ou le manque de portée.

- Enfin, la troisième source de difficultés provient de l'évolution incessante des *sources d'exposition*. Le secteur des télécommunications sans fil se caractérise par un dynamisme spectaculaire et une innovation perpétuelle. Or, la rapidité avec laquelle de nouvelles technologies sont mises sur le marché, le plus souvent sans débat préalable et sans régulation, condamne la recherche scientifique à s'adapter tant bien que mal à un paysage qui change constamment et qui modifie sans cesse les conditions d'exposition.

L'existence de ces incertitudes, cultivées, amplifiées ou niées selon les cas par les acteurs de la controverse publique, ne signifie pas l'absence de faits robustes sur lesquels il est possible de s'appuyer et que toute expertise scientifique sur le sujet se doit de mettre en avant. Elle ne signifie pas non plus qu'il faille abandonner les recherches au motif que certains des résultats jusqu'ici produits ne parviennent pas à susciter un accord. Au contraire, l'appréciation la plus précise possible de la nature et du degré de ces incertitudes

permet de dégager les directions dans lesquelles la recherche devra s'engager dans les années futures. Mais, en attendant, ces incertitudes persistantes, à la fois scientifiques et sociales, montrent qu'il serait quelque peu illusoire d'attendre de la science qu'elle statue définitivement sur la question des effets sanitaires des radiofréquences.

Des frontières questionnées

Quoi qu'il en soit, l'existence de ces incertitudes oblige dans l'immédiat à tenter de changer notre regard sur la controverse publique qui se déploie au sujet des radiofréquences. Prendre acte de ces incertitudes suppose en effet de rompre avec une manière classique d'appréhender les conflits qui entourent le développement des sciences et des technologies.

Traditionnellement, ces conflits sont considérés comme le fruit d'un décalage entre les risques « réels » – mesurés par la science – et les risques « perçus » par le public. L'explication des oppositions est alors rapportée à des « biais de perception » qu'il s'agit de comprendre en sollicitant notamment les sciences sociales. Selon les disciplines convoquées, le foyer de l'explication se déplace (système de valeurs, conditions sociales, appartenances culturelles, niveau d'éducation, influence des médias, peur du changement, *etc*.) mais dans tous les cas, le raisonnement s'appuie sur l'idée d'une frontière rigide séparant les « experts » et le « public ». Il résulte généralement de ce type de diagnostic des prescriptions portant sur l'information du public, sur la pédagogie dont il convient de faire preuve ou sur la prudence qui doit accompagner la communication sur les risques.

Or, on dispose aujourd'hui d'un grand nombre de travaux en sciences sociales qui permettent de questionner cette manière d'appréhender les choses et qui montrent que ce modèle du « déficit cognitif » [Wynne, 1992] ou encore de « l'instruction publique » [Callon, 1998] se révèle très peu adapté aux situations d'incertitude et aux controverses qu'elles génèrent. Le cas des radiofréquences en fournit une bonne illustration.

D'une part, la controverse publique sur les radiofréquences ne se réduit pas à une opposition entre, d'un côté, des « profanes » qui seraient pétris de croyances et manipulés par des médias transformés en « marchands de peur » et, de l'autre, une communauté scientifique qui serait parvenue à un consensus sur la question des effets sanitaires des ondes électromagnétiques. Cette vision ne résiste pas à l'examen, puisque ce sont au contraire les désaccords scientifiques qui alimentent pour une bonne part la controverse publique sur le sujet. Le fait que des publications scientifiques soient mobilisées au sein du mouvement associatif afin d'asseoir la légitimité de certaines revendications est un indice de la porosité de la frontière qui sépare la science et la politique. Aussi, plus qu'une opposition entre la science et ce qui n'en serait pas, ou encore entre risque « réel » et risque « perçu », la controverse publique met en scène un affrontement entre différents groupes d'acteurs porteurs d'une approche différente de la question, chacun s'appuyant à la fois sur des données scientifiques, des convictions éthiques ou des considérations économiques qu'il s'efforce d'articuler. Et si l'on peut observer aujourd'hui une polarisation des débats et une radicalisation de l'affrontement, loin d'être la cause de la controverse, la controverse publique est bien plutôt le produit de sa dynamique, laquelle a conduit les acteurs à nouer des alliances avec d'autres acteurs afin de renforcer et de radicaliser leurs positions (audition O. Borraz et D. Salomon, 1er avril 2009). On assiste alors à un basculement dans la polémique, avec les figures de dévoilement et de dénonciations qui accompagnent ce type de régime [Chateauraynaud et Torny, 1999]. Le « public », dans ce contexte, n'est qu'un *artefact* dont usent, en se présentant comme les porte-parole légitimes de ses préoccupations supposées, les différents acteurs en conflit [Cambrosio et Limoges, 1991].

D'autre part, dans le cas des radiofréquences, la frontière qui sépare « experts » et « profanes » est questionnée par la forme même que prennent parfois les mobilisations. En effet, les groupes qui se mobilisent pour dénoncer les dangers des radiofréquences revendiquent des formes de savoirs qui s'enracinent dans l'expérience concrète, qui s'appuient sur des témoignages et des sensations de mal-être. Les enquêtes menées par certaines associations ont précisément pour but d'agréger ces témoignages et de mettre en forme ces données issues de l'expérience, au terme d'un processus que certains auteurs ont qualifié d'« épidémiologie populaire » [Brown, 1992]. Les résultats de cette « recherche de plein air » sont alors mobilisés pour contester la « recherche confinée » [Callon *et al.*, 2001] des laboratoires et réclamer qu'une place plus grande soit accordée aux groupes concernés dans les investigations engagées.

La question de gouvernance qui est posée dans la controverse sur les radiofréquences n'est donc pas tant celle de l'information qu'il conviendrait de diffuser afin d'apaiser les craintes que celle des dispositifs et des procédures à mettre en place afin de « tirer parti de la controverse », pour reprendre la formule classique de A. Rip [Rip, 1986], et d'enclencher un processus d'apprentissage. Si l'on suit ce qui vient d'être dit, un tel processus suppose sans doute de s'affranchir de la séparation trop commode entre « aspects scientifiques » et « aspects sociaux » au profit d'une mise en regard des différentes approches « socio-techniques » en présence. Il suppose également d'imaginer des procédures d'enquête collaborative associant « experts » et « profanes », et par là susceptibles de bénéficier de toutes les formes de savoirs qui émergent à l'occasion des débats.

De la précaution

La controverse publique sur les radiofréquences ne pose pas seulement la question des procédures de concertation à mettre en place et des modalités de la recherche scientifique qui doivent être privilégiées dans ce domaine. Corrélativement, elle fait bien entendu surgir la délicate question de la prise de décision en situation d'incertitude. C'est pourquoi, il n'est guère surprenant de constater que le principe de précaution occupe une place centrale dans les débats sur le sujet. Pour les uns, les données disponibles au sujet des effets sanitaires doivent conduire à prendre des mesures de précaution, telle que l'abaissement des valeurs limites d'exposition, tandis que pour les autres, l'état des connaissances ne justifie pas de telles mesures. En réalité, cette opposition résulte au moins autant d'une divergence d'appréciation des données scientifiques existantes que d'une différence d'interprétation concernant le principe de précaution. Si bien que loin de mettre fin à la controverse, l'invocation de la notion de précaution contribue à l'alimenter.

Le principe de précaution a fait couler beaucoup d'encre depuis ses premières apparitions dans le droit international ([Déclaration de la conférence internationale sur la protection de la mer du Nord, 1987] ; [Déclaration de Rio, 1992]) et force est de constater qu'il demeure très largement incompris. C'est pourquoi, dans l'espoir de dissiper quelques malentendus, il peut être utile de commencer par rappeler la définition qu'en donne la Loi constitutionnelle du 1er mars 2005 relative à la Charte de l'environnement, dans son article 5 : « *Lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veillent, par application du principe de précaution et dans leurs domaines d'attributions, à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin de parer à la réalisation du dommage.* »

À partir de cette définition, et au-delà des ambiguïtés qu'elle laisse subsister, on se contentera de formuler deux remarques destinées à chasser quelques idées reçues en la matière :

- tout d'abord, et contrairement à ce qui est parfois suggéré, l'adoption du principe de précaution ne relève pas de décisions politiques qui pourraient être prises indépendamment de toute considération scientifique. Au contraire, c'est précisément en fonction d'un certain état des connaissances – en l'occurrence une situation d'incertitude scientifique – que le principe de précaution peut être mobilisé. L'expertise scientifique, en évaluant cet état des connaissances et en qualifiant les incertitudes, participe donc directement du processus de décision pouvant conduire à l'adoption de mesures de précaution.

- Ensuite, et même s'il paraît trivial de le rappeler, le principe de précaution est destiné à prendre en charge des situations où le risque, compte tenu des connaissances du moment, *n'est pas avéré*, mais seulement suspecté. Rien n'est donc plus éloigné de la démarche de précaution que le fait d'attendre d'obtenir des certitudes scientifiques au sujet d'une menace pour adopter des mesures visant à s'en prémunir.

À propos des radiofréquences, on notera que certains psychologues ont défendu l'idée que l'adoption de mesures de précaution, loin de rassurer, tendait à accréditer l'existence d'un risque et, ce faisant, renforçait l'anxiété du public [Wiedemann et Schütz, 2005]. Ce type de raisonnement est régulièrement repris par les adversaires du principe de précaution. Cependant, en suivant la définition et les remarques qui précèdent, il convient de rappeler que la question du potentiel « anxiogène » du principe de précaution (ou, à l'inverse, celle de ses vertus apaisantes), si tant est que cette qualité puisse être sérieusement évaluée, ne devrait tenir aucune place dans le débat sur la pertinence des mesures à prendre. En effet, seule l'évaluation de la plausibilité de la menace peut conduire à envisager, le cas échéant et au nom d'un impératif de sécurité sanitaire, des mesures de précaution.

Le « principe de précaution » dans plusieurs textes nationaux et internationaux

Troisième Conférence sur la mer du Nord, 1990

« Les participants […] continueront à appliquer le principe de précaution, c'est-à-dire à prendre des mesures pour éviter les impacts potentiellement dommageables des substances persistantes, toxiques et susceptibles de bioaccumulation même lorsqu'il n'existe pas de preuve scientifique de l'existence d'un lien entre les émissions et les effets ».

Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement, 1992

« Pour protéger l'environnement, des mesures de précaution doivent être largement appliquées par les Etats selon leurs capacités. En cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement. »

Traité sur l'Union européenne (traité de Maastricht), 1992

« La politique de la Communauté dans le domaine de l'environnement […] est fondée sur les principes de précaution et d'action préventive, sur le principe de la correction, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement et sur le principe du pollueur-payeur ».

Loi Barnier (France), 1995

« le principe de précaution, selon lequel l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable ».

Protocole de Carthagène sur la biosécurité, 2000

« Conformément à l'approche de précaution, […] l'objectif du présent protocole est de contribuer à assurer un degré adéquat de protection pour le transfert, la manipulation et l'utilisation sans danger des organismes vivants modifiés résultant de la biotechnologie moderne qui peuvent avoir des effets défavorables sur la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique, compte tenu également des risques pour la santé humaine, en mettant plus précisément l'accent sur les mouvements transfrontières ».

Charte de l'environnement (France), 2005

« Lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veillent, par application du principe de précaution et dans leurs domaines d'attributions, à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin de parer à la réalisation du dommage ».

1.3 L'expertise en situation de controverse

En situation de controverse publique, le rapport à l'expertise scientifique est marqué par un paradoxe [Limoges, 1993]. D'un côté, ce type de situation renforce les attentes qui peuvent être nourries au sujet de l'expertise scientifique. Il est généralement attendu du travail des experts qu'il permette d'apaiser les inquiétudes, voire de trancher certains conflits en fournissant aux décideurs des énoncés « indiscutables » sur lesquels ils pourront s'appuyer. Mais, d'un autre côté, en situation de controverse publique, tout rapport d'expertise fait également l'objet de la plus grande suspicion et donne immanquablement lieu à de sévères critiques [Barthe et Gilbert, 2005]. Des doutes sont alors émis sur l'indépendance des experts et sur l'impartialité dont ils se prévalent, ce qui a pour effet de jeter le discrédit sur leurs énoncés. Ainsi, bien souvent, l'expertise scientifique participe davantage à l'extension de la controverse et à la polarisation des débats qu'elle ne permet d'en sortir.

Ce paradoxe a été à l'origine de nombreuses réflexions portant sur l'organisation et les pratiques de l'expertise scientifique. Il en a résulté toute une série de propositions et d'initiatives visant à promouvoir des procédures et des dispositifs susceptibles de renforcer la crédibilité de l'expertise. Toutefois, ces initiatives ne vont pas toutes dans la même direction et l'expertise est actuellement traversée par deux dynamiques contradictoires [Dodier, 2003] : d'un côté, une dynamique d'« enclavement », qui se manifeste par la volonté de protéger les experts de ce qui est perçu comme des pressions extérieures à la science, de l'autre, une dynamique opposée de « désenclavement », qui se traduit au contraire par une ouverture de l'expertise aux débats et aux acteurs qui s'expriment dans l'espace public à propos des risques examinés. Ces deux dynamiques correspondent à deux grands modèles d'expertise que l'on qualifiera, pour simplifier, d'« expertise fermée » et d'« expertise ouverte ». Prises dans une tension entre les deux dynamiques qui viennent d'être évoquées, la plupart des expériences d'expertise se situent en réalité sur un *continuum* entre ces deux pôles.

1.3.1 Expertise « fermée » *vs*. expertise « ouverte »

L'expertise dite « fermée » se traduit par un ensemble de procédures visant à prendre des distances vis-à-vis de la controverse publique. Face à ce qui est perçu comme une menace pour l'autorité scientifique, il s'agit de « purifier » le travail d'expertise. Ce processus de purification peut prendre plusieurs formes :

- Il transparaît tout d'abord au niveau de la composition du comité d'experts : seuls des scientifiques professionnels ou encore des médecins seront sollicités pour en faire partie et aucune place ne sera réservée à des acteurs extérieurs à la sphère scientifique. Qui plus est, les scientifiques sollicités devront fournir des garanties d'indépendance par rapport aux groupes directement concernés par l'enjeu examiné, ceci en déclarant d'éventuels conflits d'intérêts.

- L'entreprise de « purification » de l'expertise se traduit ensuite par le type de données prises en compte dans l'évaluation. Dans le cadre d'une expertise fermée, seules les études ayant fait l'objet d'une publication dans des revues scientifiques à comité de lecture (*peer review system*) seront analysées. Dans le cas de la téléphonie mobile, c'est par exemple l'option qui fut retenue dans le rapport Zmirou[12]. En outre, toute étude qui, bien qu'elle ait été publiée dans ces revues, n'aura pas fait l'objet d'une réplication, sera écartée dans la formulation de l'avis car les faits qu'elle pourrait mettre en avant ne seront alors pas considérés comme « avérés ».

- Enfin, l'expertise fermée s'en tient à l'évaluation strictement scientifique des risques, en privilégiant généralement les données quantitatives et sans examiner d'autres aspects du problème. Elle correspond à ce que l'on appelle le « modèle standard de l'expertise » [Joly, 2005] fondé sur une séparation nette entre l'évaluation d'un risque, qui serait exclusivement du ressort de la science, et sa gestion, qui relèverait pour sa part exclusivement des instances politiques. Dans cette perspective, l'expertise fermée ne se donne pas pour objectif de formuler des recommandations aux décideurs, mais seulement d'aboutir à un avis consensuel concernant l'état des connaissances scientifiques. Une fois ce consensus obtenu, si la controverse publique perdure, elle sera mise sur le compte du décalage entre risque réel et risque perçu et de la déformation de l'information scientifique dont les médias seraient responsables.

L'expertise dite « ouverte » renvoie à un modèle alternatif qui découle d'une remise en cause de la volonté de « purification » qui caractérise l'expertise fermée. En se détournant des enjeux et des acteurs de la controverse publique, cette dernière se voit en effet reprochée son manque de pertinence politique. En outre, l'expertise fermée, en privilégiant une conception restrictive des données méritant examen et en excluant par conséquent d'autres types de savoirs, est accusée d'être à la fois partielle, partiale et de méconnaître certaines hypothèses qu'il conviendrait d'explorer. Du même coup, l'autorité dont elle se prévaut est souvent contestée et incite paradoxalement à la défiance ; les énoncés qu'elle produit sont alors d'autant plus discutés qu'ils se présentent comme étant « indiscutables ». Par opposition à ce modèle d'expertise, une seconde option est donc parfois mise en avant où il ne s'agit plus de s'écarter de la controverse, mais, dans la mesure du possible, de l'intégrer au processus d'expertise. Cette ouverture peut là encore s'appuyer sur différents procédés :

[12] *Les téléphones mobiles, leurs stations de base et la santé - État des connaissances et recommandations.* Rapport au Directeur Général de la Santé. Paris, 2001 : 391 p.

- En ce qui concerne la composition du comité d'experts, cela peut se traduire par l'intégration de scientifiques préalablement impliqués dans le débat public sur le risque en question et qui apparaissent de ce fait comme des acteurs majeurs de la controverse. Une autre possibilité est d'inclure dans le comité des représentants associatifs ou, plus généralement, des porte-parole de différents groupes concernés. C'est par exemple la stratégie qui fut adoptée dans le cadre du Groupe radioécologie Nord-Contentin mis en place au sujet des rejets radioactifs de l'usine de La Hague. Quel que soit le dispositif, l'objectif d'indépendance de l'expertise n'est pas abandonné, mais cette indépendance est désormais censée résulter de la collégialité de l'expertise et surtout de procédures favorisant la confrontation des points de vue, l'expression des opinions minoritaires et le respect du principe du contradictoire [Joly, 2005].
- L'ouverture de l'expertise peut se traduire ensuite par une plus grande souplesse dans le type de données examinées. Il s'agit alors d'élargir l'évaluation à des études qui, bien que n'ayant pas fait l'objet d'une procédure de *peer review*, sont néanmoins jugées dignes d'intérêt, soit parce qu'elles sont régulièrement mobilisées dans l'espace public, soit parce qu'elles fournissent des données susceptibles de formuler de nouvelles hypothèses ou d'identifier des zones d'incertitude à explorer. C'est ainsi que différents groupes d'experts mis en place en Europe au sujet de la téléphonie mobile ont estimé nécessaire d'intégrer des rapports ou des études non validées par les pairs. En Grande-Bretagne par exemple, le rapport Stewart de 1999 a même pris en compte tout un ensemble de données qualifiées d'« anecdotiques », comme des courriers envoyés par des particuliers se plaignant de pathologies variées liées aux antennes-relais (Audition O. Borraz et D. Salomon, 1er avril 2009). De plus, cette ouverture à un ensemble plus large de données peut conduire les experts à traiter non seulement de la question des risques sanitaires au sens strict mais également des enjeux qui peuvent leur être associés, qu'ils soient économiques, éthiques, ou sociaux.
- L'expertise ouverte, enfin, ne se contente pas de procéder à une évaluation scientifique des risques, mais entend participer à leur gestion et au processus de décision en formulant des recommandations explicites. Ce faisant, elle prend acte de la porosité qui caractérise la frontière entre science et politique, notamment quand il s'agit de situations de forte incertitude et de controverses. De plus, ces recommandations vont bien au-delà de la question des risques avérés ; elles concernent la prise en charge des incertitudes, tant au niveau des recherches à entreprendre que des mesures provisoires à adopter. En cherchant à identifier les incertitudes et en les reconnaissant clairement, l'expertise ouverte est ainsi conduite à se prononcer sur le principe de précaution et, plus généralement, à établir différents scénarios qui viendront alimenter l'espace de choix du décideur. Cette ouverture peut correspondre à une demande explicite du commanditaire, mais elle renvoie également à la volonté parfois exprimée par certains experts d'assumer une forme d'engagement citoyen en participant plus activement au traitement de certaines questions qui s'imposent dans l'espace public.

Il est rare qu'une situation d'expertise corresponde parfaitement à l'un ou au l'autre de ces modèles. Il s'agit le plus souvent d'une hybridation entre expertise fermée et expertise ouverte, certaines procédures ou pratiques ayant tendance à jouer dans le sens d'une fermeture tandis que d'autres favorisent au contraire une certaine ouverture. Il s'agit donc le plus souvent d'une question de degré. La distinction entre ces deux pôles a surtout le mérite de fournir des repères permettant d'évaluer certaines modalités d'expertise. Ici, nous l'utiliserons pour organiser un rapide retour sur certaines particularités du groupe d'experts dont ce rapport est issu.

1.3.2 Le groupe de travail sur les radiofréquences : entre ouverture et fermeture

- Une volonté d'ouverture

La mise en place du groupe de travail de l'Afsset sur les radiofréquences est intervenue dans un contexte favorable à l'organisation d'une expertise « ouverte ». En effet, le 9 octobre 2008, l'Afsset, ainsi que deux autres organismes publics d'expertise (l'Ineris et l'IRSN), ont adopté une charte dite de « l'ouverture à la société ». Considérant qu'un processus de décision plus ouvert et pluraliste imposait un processus d'expertise lui aussi plus ouvert, les signataires de cette charte ont pris trois engagements afin d'« améliorer l'évaluation des risques à travers un dialogue renforcé avec la société » :

- « accompagner les acteurs de la société dans l'acquisition des compétences nécessaires à leur implication et prendre en compte leur contribution dans le processus d'évaluation ;
- mettre en partage les connaissances scientifiques disponibles mais aussi les incertitudes, les ignorances, les questionnements et les controverses ;
- accroître la transparence de nos travaux en rendant publics dès que possible leur résultat final et les méthodes mises en œuvre pour les obtenir. »

Afin de mettre en pratique cette volonté d'ouverture dans le cadre du GT « radiofréquences », plusieurs options étaient disponibles : la première consistait à intégrer au sein du groupe des scientifiques connus pour leurs prises de position sur le sujet et ayant contribué par leurs travaux à alimenter la controverse à propos d'éventuels effets sanitaires des radiofréquences, soit en mettant en avant de tels effets, soit au contraire en affirmant publiquement l'innocuité des champs électromagnétiques. Dans le même esprit, il aurait également été possible de solliciter des porte-parole associatifs pour que ces derniers fassent partie intégrante du comité, ce qui était un moyen de s'assurer, conformément aux termes de la charte, que leur contribution soit prise en compte dans le processus d'évaluation.

Ce n'est pas cette option qui fut retenue, et c'est seulement sur sa compétence et son impartialité que chacun des membres du groupe de travail a été désigné, et non en raison de son rôle dans la controverse. En réalité, ce choix était contraint : les expertises de l'Afsset s'incrivent dans un cadre réglementaire ainsi que dans celui de la norme NF X 50-110 relative à la qualité en expertise. Par ailleurs, le choix de mettre en place un groupe international n'a pu être retenu pour des raisons pratiques[13]. En revanche, la volonté d'ouverture à la société et à la controverse publique sur les radiofréquences s'est traduite par l'audition des principaux acteurs du débat sur le sujet, qu'il s'agisse de chercheurs ou de représentants associatifs. Ce respect affiché de la pluralité des points de vue peut donc être considéré comme une marque d'ouverture.

Parallèlement à cette politique d'audition, deux innovations caractérisent l'expertise réalisée au sein du groupe de travail sur les radiofréquences : la présence d'un observateur d'une part, et celle de représentants des sciences sociales d'autre part.

- La présence d'un observateur

[13] En particulier, afin d'assurer une bonne fluidité des débats, et de simplifier l'élaboration du rapport. En revanche, de nombreuses personnalités scientifiques étrangères ont été auditionnées, en anglais. Tous les membres du groupe ont bénéficié d'une transcription intégrale de leurs propos.

Le manque de transparence ainsi que l'existence d'éventuels conflits d'intérêts sont les deux reproches les plus communément adressés à l'expertise, et les précédents rapports de l'Afsset relatifs à la téléphonie mobile ne furent pas indemnes de critiques à ce sujet. Soucieuse de répondre à ces critiques, et sur proposition du président du groupe, l'Afsset a invité les associations à désigner parmi leurs membres un « observateur » qui, bien que n'étant pas membre du groupe d'experts, pourrait suivre au plus près son travail en assistant à toutes les réunions ainsi qu'aux auditions. Bien qu'il n'ait pas été autorisé à participer aux choix effectués au cours de l'expertise sur le contenu du rapport, cet observateur a eu la possibilité à tout moment de livrer son point de vue ou encore de poser des questions aux personnes auditionnées, ce dont il ne s'est pas privé.

La présence d'un observateur issu du milieu associatif est un des signes d'ouverture à la société. L'avantage de ce type d'initiative est de contribuer à démythifier le travail d'expertise en donnant à voir son élaboration concrète, ses inévitables tâtonnements, les difficultés rencontrées, le travail parfois considérable qu'impose l'évaluation de la littérature scientifique, les critères sur lesquels reposent certains des choix effectués au cours du processus et enfin les débats et les éventuels désaccords que ne manquent pas de susciter certaines questions au sein du groupe.

On notera cependant que le fait d'intégrer un observateur ne présente pas que des avantages en ce qui concerne le bon déroulement d'une expertise. L'observateur, en participant d'une certaine manière aux débats sans se sentir pour autant engagé par les avis qui peuvent en résulter, occupe une position particulière qui peut être mal comprise ou mal perçue par les autres membres du groupe. Dans un premier temps, cette présence peut d'ailleurs restreindre la liberté de ton des échanges, et l'on retrouve alors le problème classique des effets ambivalents de la transparence de l'expertise. Cependant, avec le temps, on peut estimer que cette autocensure supposée tend à disparaître. C'est du moins ce qu'a montré la teneur des discussions qui se sont déroulées au sein du groupe de travail sur les radiofréquences.

- *La contribution des sciences sociales*

La présence de représentants des sciences sociales au sein du groupe a constitué une autre innovation de cette expertise sur les radiofréquences. Cette innovation était d'autant plus originale que les chercheurs en sciences sociales étaient dotés du même statut que les autres experts, faisaient partie intégrante du même groupe et pouvaient par conséquent intervenir librement sur toutes les questions relatives aux radiofréquences. En fonction des disciplines auxquelles ils appartiennent et des traditions théoriques dans lesquelles ils s'inscrivent, ces derniers ont envisagé de manière différente la contribution qu'ils pouvaient apporter.

Les uns se sont concentrés sur les problèmes de perception des risques, sur l'attitude du public vis-à-vis des radiofréquences et sur les questions posées par la communication sur le sujet. S'appuyant sur des enquêtes d'opinion ou encore sur des études de psychologie expérimentale, ils ont cherché à cerner les attentes et les réactions du public ainsi que les enjeux relatifs à l'information et à la communication sur le sujet.

Les autres se sont plutôt attachés à clarifier quelques-uns des problèmes posés par le contexte controversé et incertain de cette expertise. Plutôt que de s'intéresser aux perceptions du public, il s'agissait de fournir un point de vue réflexif sur l'expertise « en train de se faire » et de faire émerger un certain nombre de questions ou de critiques sur les

modalités du travail ou sur la manière dont certaines incertitudes étaient ou non prises en compte.

Ces approches ont été jugées complémentaires par l'ensemble des membres du groupe.

De même que la transparence, il convient de noter que l'exploitation des données des sciences sociales dans ce type d'expertise peut produire des effets ambivalents. D'un côté, quelle que soit leur contribution, il paraît clair que ces disciplines garantissent une certaine ouverture à la société. Mais, d'un autre côté, dès lors qu'on les cantonne à l'étude des perceptions du public en les envisageant exclusivement sous l'angle d'un décalage par rapport à une vérité scientifique considérée comme indiscutable, elles contribuent à réactiver le « mythe du fossé grandissant » [Bensaude-Vincent, 2000] qui séparerait la science et le « public ». En confortant l'idée d'un public passif et en proie à des croyances irrationnelles, elles participent alors à un processus de fermeture de l'expertise.

- Le rapport à la littérature grise

La question de la prise en considération de la littérature grise, c'est-à-dire de travaux n'ayant pas fait l'objet d'une publication dans une revue scientifique à comité de lecture, est un point central, comme on l'a vu, pour juger de la plus ou moins grande ouverture d'une expertise.

Cette question a fait l'objet de débats au sein du groupe de travail sur les radiofréquences. Certains membres du groupe ont défendu l'idée de restreindre l'évaluation aux seules publications qui, ayant été validées par les pairs, méritaient selon eux d'être qualifiées de scientifiques. D'autres ont plaidé la cause de l'ouverture à la littérature grise, arguant du fait que le manque de connaissances scientifiques disponibles sur certains aspects du sujet invitait à prêter attention à un plus large éventail de travaux (rapports, thèses, études non publiées). Ces derniers ont également souligné le fait que répondre aux attentes de la société supposait de se pencher également sur des documents régulièrement mobilisés dans la controverse publique comme le rapport Bioinitiative (cf. chapitre 5), et cela même si les publications originales sur lesquelles repose ce rapport ont été prises en compte par ailleurs dans l'évaluation (celles concernant les radiofréquences, et pour la période qui intéresse ce présent rapport).

Compte tenu de la diversité des opinions sur cette question sensible, aucune position collective n'a été arrêtée et c'est une approche pragmatique qui a au contraire été privilégiée : sur certains aspects et compte tenu de la masse de données disponibles, l'évaluation s'est limitée aux publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture. Sur d'autres aspects, comme le problème de l'hypersensibilité électromagnétique, l'approche a été moins restrictive.

Si cette approche pragmatique a été privilégiée, c'est notamment en raison des contraintes de temps qui pesaient sur le groupe, liées notamment à la pression des commanditaires, et qui ont empêché dans certains cas d'élargir encore davantage la nature des études à évaluer.

La question des sources de financement des études est souvent évoquée. Elle a fait l'objet d'une publication [Huss *et al.*, 2007]. Elle n'est qu'une partie du problème de la validité scientifique des études. Traiter ce sujet complexe représente un travail spécifique qui n'a pas été réalisé dans le cadre de cette expertise.

Qu'il s'agisse de la contribution des sciences sociales, du rôle de l'observateur, du rapport à la littérature ou de la prise en compte des incertitudes, des débats ont eu lieu au sein du

groupe de travail sur les radiofréquences. Ces débats ont opposé, parfois de manière implicite et dans des configurations différentes selon les aspects abordés, les partisans d'une expertise fermée et ceux d'une expertise plus ouverte. C'est pourquoi l'on trouvera des traces de l'une et l'autre de ces positions dans le rapport qui suit.

2 Rappels physiques sur les radiofréquences

2.1 Principes physiques

2.1.1 Généralités sur les champs électromagnétiques

Les rayonnements électromagnétiques sont une forme de transport d'énergie sans support matériel. Très divers par la quantité d'énergie qu'ils transportent et leurs possibilités d'interactions avec la matière, ils peuvent être décrits par deux modèles physiques complémentaires, soit comme un flux de photons (modèle corpusculaire), soit comme une onde électromagnétique (modèle ondulatoire). L'ensemble des rayonnements électromagnétiques (le spectre électromagnétique) et leurs principales origines ou applications est illustré en Figure 1.

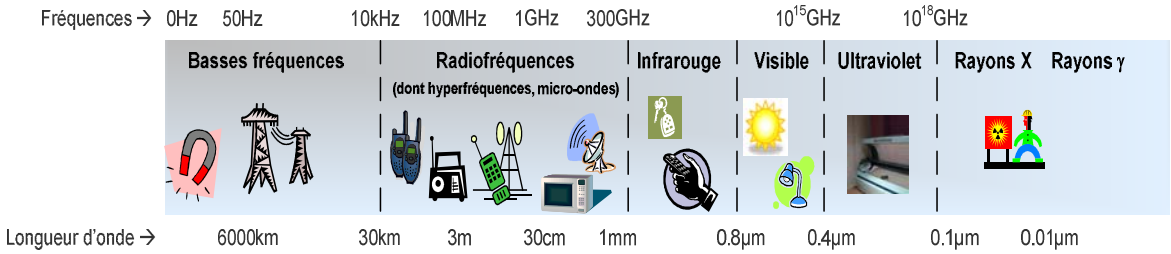


Figure 1 : spectre du rayonnement électromagnétique

Il faut distinguer dans ce spectre les rayonnements ionisants des rayonnements non ionisants. Contrairement aux rayonnements non ionisants, les rayonnements ionisants (rayons X et Gamma notamment) sont suffisamment énergétiques pour provoquer des modifications des molécules de la matière vivante par ionisation[14].

Les rayonnements non ionisants comprennent les champs électromagnétiques statiques (fréquence nulle), les champs électromagnétiques basses fréquences, les champs électromagnétiques radiofréquences, les rayonnements infrarouges, la lumière visible et une partie des rayonnements ultraviolets.

Il existe des champs électromagnétiques d'origine naturelle dus par exemple à la présence de charges électriques dans l'atmosphère et aux courants électriques qui circulent à la surface de la terre. La valeur du champ électrique terrestre statique est ainsi de l'ordre de quelques dizaines de Volts par mètre, jusqu'à quelques dizaines de milliers de Volts par mètre par temps d'orage. Le champ magnétique terrestre statique est de l'ordre de 40 µT à la latitude de la France.

Ce rapport est limité au domaine des radiofréquences, c'est-à-dire à l'ensemble des champs électromagnétiques non ionisants rayonnés à des fréquences comprises entre 9 kHz et 6 GHz environ.

[14] L'ionisation est le processus par lequel une ou plusieurs charges électriques sont enlevées ou ajoutées à des atomes ou à des molécules, transformant ces derniers en ions. Ce processus nécessite beaucoup d'énergie. Les tissus biologiques sont des milieux ionisés et leur fonctionnement est en partie lié à des échanges d'ions.

2.1.2 Caractéristiques d'une onde électromagnétique

Le champ électromagnétique définit les propriétés électriques et magnétiques de l'espace (dans l'air, dans la matière ou dans le vide). Lorsque ces propriétés varient dans le temps et l'espace, par exemple sous l'influence d'une source de rayonnement électromagnétique (antenne de télédiffusion, radar, *etc.*), on définit alors une onde électromagnétique qui se propage. La vitesse de propagation de l'onde électromagnétique est communément appelée « vitesse de la lumière ». L'onde électromagnétique est caractérisée par plusieurs grandeurs physiques dont les principales sont :

- La fréquence - *f*

Elle correspond au nombre d'oscillations par seconde des ondes électrique et magnétique. Elle s'exprime en Hertz (Hz) et ses multiples[15].

- La longueur d'onde - λ

La longueur d'onde est inversement proportionnelle à la fréquence : plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est petite. Elle s'exprime en mètre et ses multiples[16].

- L'intensité du champ électrique - *E*

Elle représente la valeur du champ électrique en un point donné. Elle s'exprime en Volt par mètre (V/m).

- L'intensité du champ magnétique - *H*

Elle représente la valeur du champ magnétique, qui s'exprime en Ampère par mètre (A/m). On parle également d'induction magnétique *B* qui s'exprime en Tesla (T). Dans l'air, l'induction et le champ magnétique sont reliés par une relation simple : 1 A/m = 1,27 µT.

- La puissance d'émission - *P*

La notion de puissance d'un émetteur, qui s'exprime en Watts ou en décibels[17], est complexe et peut être décrite sous différentes formes. On définit ainsi la puissance électrique qui est fournie à l'émetteur (ou puissance injectée). Cependant, pour évaluer le rayonnement d'un émetteur dans l'environnement, il est indispensable de prendre aussi en compte le diagramme de rayonnement[18] de l'émetteur, qui est généralement donné sous la forme d'une valeur de gain maximum exprimé en dBi (décibel isotrope). Ce gain représente la façon dont l'énergie rayonnée est concentrée, dans une direction donnée. On parle alors de PIRE (Puissance Isotropique Rayonnée Equivalente) ou de PAR (Puissance Apparente Rayonnée)[19] qui représentent le produit de la puissance émise et du gain de l'antenne.

Dans le cas d'un émetteur omnidirectionnel, la puissance est émise uniformément dans toutes les directions de l'espace. Dans le cas d'un émetteur directionnel, la puissance est émise principalement dans certaines directions (cf. Figure 2). Dans l'espace, en l'absence de tout obstacle, l'onde se propage de façon rectiligne dans toutes les directions et l'énergie se répartit sur une surface de plus en plus grande.

---

[15] 1 kHz = 10^3 Hz – 1 MHz = 10^6 Hz – 1 GHz = 10^9 Hz

[16] 1 µm = 10^{-6} m – 1 mm = 10^{-3} m – 1 cm = 10^{-2} m – 1 km = 10^3 m

[17] Expressions de la puissance en décibels :

Puissance en Décibel-Watts (dBW) = $10\times\log_{10}$ (puissance en Watts).

Puissance en Décibel-milliWatts (dBm) = $10\times\log_{10}$ (Puissance en milliWatts).

[18] C'est-à-dire la répartition dans l'espace du rayonnement autour de l'émetteur.

[19] La PIRE et la PAR sont deux façons différentes d'exprimer la puissance rayonnée autour d'un émetteur. La PIRE est la puissance rayonnée exprimée par rapport à une antenne de référence isotropique. La PAR est la puissance rayonnée exprimée par rapport à un dipôle de référence (avec un diagramme de rayonnement non isotrope).

Par analogie avec les ondes électromagnétiques dans le domaine de la lumière visible, un émetteur directionnel est par exemple une lampe torche qui éclaire principalement dans un faisceau très directif et un émetteur omnidirectionnel une ampoule à incandescence qui éclaire dans toutes les directions de l'espace.

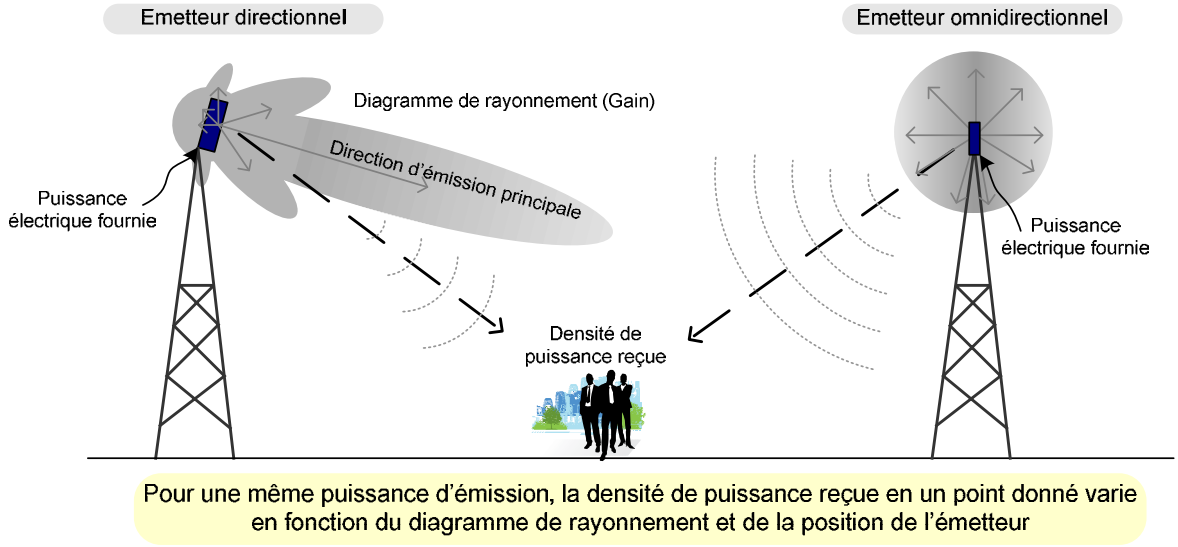


Figure 2 : rayonnement d'un émetteur radioélectrique

- La densité de puissance - *S*

La densité de puissance représente la puissance par unité de surface en un lieu donné par rapport à l'émetteur. Elle est inversement proportionnelle au carré de la distance depuis la source. Ceci explique que, dans une direction donnée, la densité de puissance décroisse très rapidement dans le voisinage d'une antenne et que la puissance émise doive être d'autant plus importante que la zone à couvrir est grande.

La densité de puissance, dans les zones de champ lointain (*cf.* chapitre 3.3), est proportionnelle au produit du champ électrique et du champ magnétique. Elle s'exprime en Watts par mètre carré (W/m^2).

2.1.3 Principe de la transmission radioélectrique

Un très grand nombre d'applications, dont les services de diffusion et de télécommunications, utilisent les ondes électromagnétiques comme support pour transmettre et véhiculer de l'information entre un émetteur et un récepteur. Ces informations peuvent être des données, de la voix, des images, aujourd'hui de la vidéo et sont liées à différents services : radio et télédiffusion, réseaux de téléphonie mobile, téléphones sans fil, réseaux indépendants (police, secours-incendie), bornes d'accès internet Wi-Fi, radars aériens et maritimes, périphériques informatiques sans fil, *talkies-walkies*, interphones bébé, télécommandes pour la domotique, automobile, systèmes d'alarmes sans fil *etc*.

Le principe d'une transmission radioélectrique repose sur la transformation du signal à transmettre (voix, données, vidéos) en une onde électromagnétique qui se propage jusqu'au récepteur.

Ainsi, le système électronique d'émission transforme le signal à transmettre en signaux électriques, que l'antenne d'émission envoie dans l'espace sous forme d'onde électromagnétique. L'antenne de réception transforme alors les ondes reçues en un signal électrique et en données numériques ou analogiques correspondant au signal émis (*cf.* Figure 3).

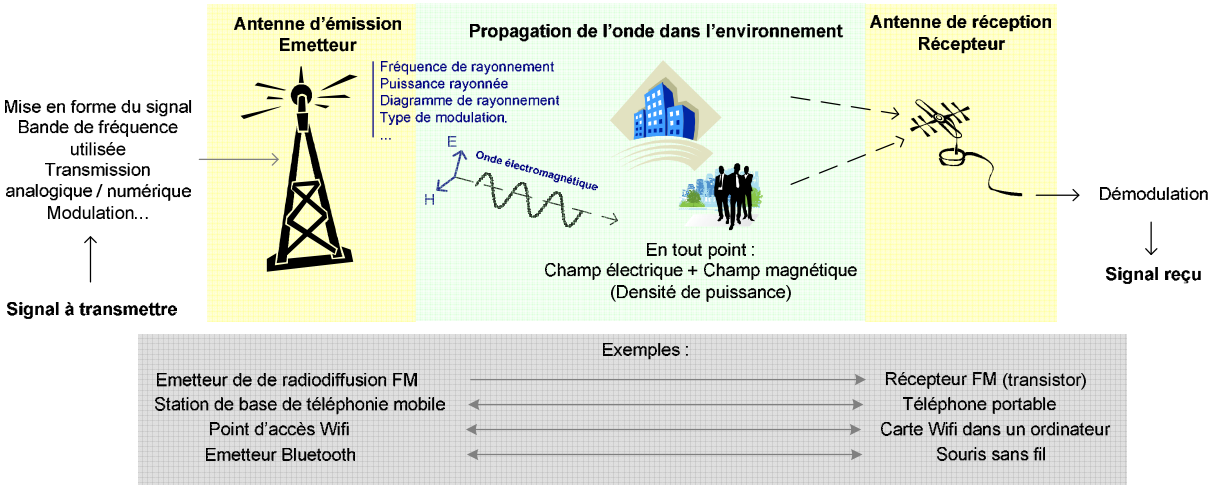


Figure 3 : principe d'une transmission radioélectrique

En fonction du signal à transmettre et donc de l'application ou du service associé, l'information est transmise entre l'émetteur et le récepteur selon des protocoles de communication et des techniques de modulation et de démodulation différents. Ces protocoles et types de modulations sont adaptés en fonction des caractéristiques des données à transmettre, des performances souhaitées (débit, rapport signal à bruit[20]), des contraintes techniques (bande de fréquences utilisée, puissance d'émission maximale, distance entre l'émetteur et le récepteur, *etc*.).

On peut citer comme exemples de protocoles de communication :

- la norme GSM qui permet la transmission de voix et de données au travers d'un réseau de téléphonie mobile dans deux bandes de fréquences situées autour de 900 MHz et 1800 MHz.
- Le protocole Wi-Fi qui permet de gérer des systèmes informatiques sans fil et l'accès internet haut débit, à des fréquences d'émission situées autour de 2 400 MHz.
- La norme TETRAPOL qui régit en France les réseaux de communication utilisés par les forces de sécurité.

Deux grandes classes de modulation existent (*cf*. Figure 4) :

- Modulation analogique : le signal est transmis en faisant varier un des paramètres physiques de l'onde électromagnétique. Ceci est par exemple utilisé en radiodiffusion analogique avec l'utilisation de la modulation de fréquence dans la bande de fréquence 87,5 MHz – 108 MHz (« bande FM »).
- Modulation numérique : les données sont transmises sous forme de valeurs binaires. De nombreuses techniques de modulation numérique plus ou moins complexes existent et sont développées en fonction des nouvelles applications.

[20] C'est-à-dire le rapport entre le signal « utile » et le bruit électromagnétique ambiant. Plus le rapport « signal/bruit » est grand, meilleure sera la communication.

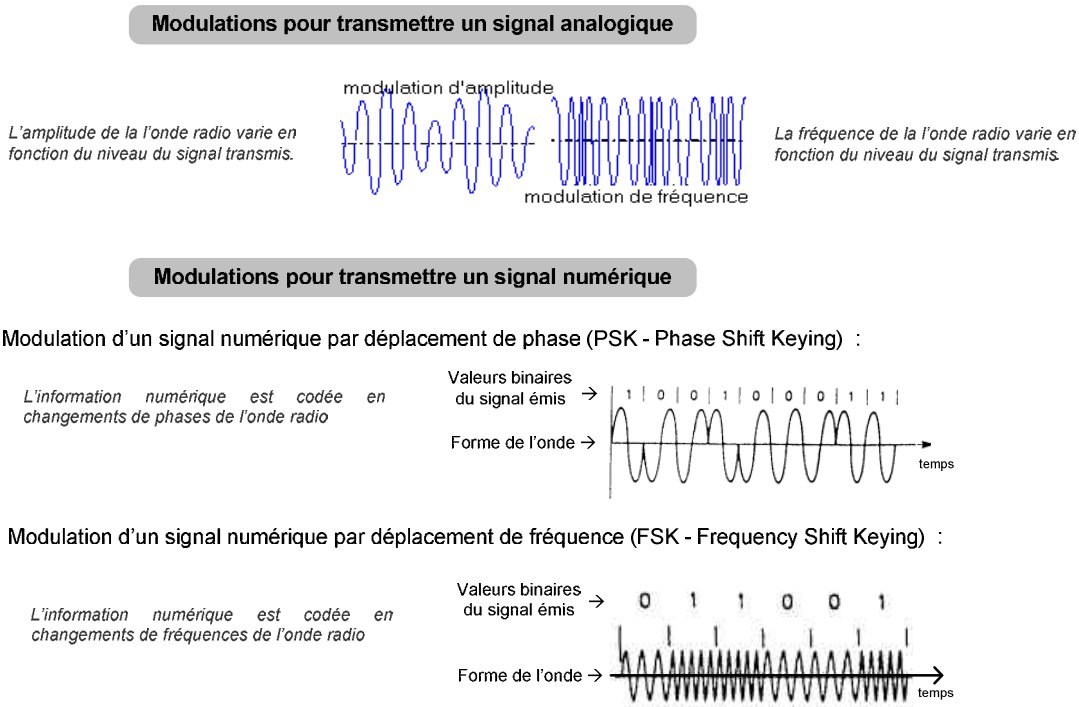


Figure 4 : exemples de modulation d'un signal transmis

2.1.4 Conformité et réglementation

Les équipements radioélectriques liés aux systèmes de communications par radiofréquences doivent être conformes à deux types de réglementations qui sont distinctes et indépendantes l'une de l'autre :

- Réglementation liée à l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques

Cette réglementation est présentée en détail dans le chapitre 6 de ce rapport.

- Conformité en termes de compatibilité électromagnétique (CEM)

Tout équipement électrique ou électronique, y compris donc les équipements radioélectriques, doit satisfaire aux normes de compatibilité électromagnétique données dans la directive européenne 2004/108/CE transposée en droit français par le décret n°2006-1278 du 18 octobre 2006. Ces normes reposent sur les deux principes suivants :

- un équipement électrique ou électronique ne doit pas produire des perturbations électromagnétiques à un niveau tel que cela empêcherait le fonctionnement normal des équipements situés à proximité ;
- réciproquement, un équipement doit pouvoir fonctionner normalement en présence du niveau de champ électromagnétique qu'il peut rencontrer dans son environnement.

Ainsi, les normes de test pour vérifier la compatibilité électromagnétique entre les appareils standards fixent 3 V/m comme le niveau de champ électromagnétique que doivent pouvoir supporter ces appareils sans que leur fonctionnement ne soit perturbé de manière inacceptable. Des niveaux plus élevés existent (10 V/m, 30 V/m ou plus) pour assurer la protection d'appareils sensibles (médicaux, militaires, *etc.*).

Le cas particulier de la conformité électromagnétique des dispositifs médicaux implantables actifs (stimulateurs cardiaques, défibrillateurs implantables, *etc.*) est traité spécifiquement par la directive 90/385/CE [Directive 90/385/CE] et les normes EN 45502 [norme EN 45502].

Compatibilité électromagnétique et valeurs limites d'exposition

L'application correcte des normes harmonisées publiées au journal officiel de l'Union européenne permet le respect de la compatibilité électromagnétique (CEM) au sens de la directive 2004/108/CE. Ces normes définissent des seuils minimaux de bon fonctionnement dans un environnement électromagnétique. Pour des appareils standards, les tests consistent à vérifier leur bon fonctionnement notamment en présence de champs électriques à différentes fréquences, jusqu'à 3 V/m, sans préjuger de leur non fonctionnement pour des valeurs de champs supérieures. Pour des appareils dits plus sensibles, les niveaux de champs testés peuvent être plus élevés : 10 V/m, 30 V/m ou plus.

La traduction en droit national des directives européennes constitue le cadre réglementaire à respecter, par l'intermédiaire de lois, de décrets, *etc*. Les normes n'ont généralement pas de caractère obligatoire, elles représentent simplement des outils pour vérifier la conformité exigée au plan européen ou national.

Sur le plan réglementaire, les seules obligations pour les appareils radioélectriques sont donc :

- pour les émetteurs de télécommunication : respecter les niveaux de référence ou les restrictions de base dans les zones accessibles au public (*cf*. chapitre 6) ;
- pour tous les appareils : ne pas être perturbés par des champs supérieurs à des niveaux définis dans les normes CEM (3 V/m, 10 V/m, *etc*. selon les appareils), et ne pas perturber les autres appareils au-delà de ce que leur fonctionnement permet.

Il faut noter que la directive 2004/108/CE exclut de son champ d'application les appareils concernés par la directive 1999/5/CE, et notamment les systèmes de télécommunications hertziens.

Il n'existe donc aucune obligation pour les émetteurs radioélectriques, comme les antennes-relais de téléphonie mobile, d'émettre un champ inférieur à 3 V/m. Cette valeur, par ailleurs, n'est en fait associée qu'au champ testé en vue de prévenir les interférences de fonctionnement les plus usuelles.

2.2 Les sources de champs électromagnétiques dans l'environnement quotidien

2.2.1 Vue d'ensemble

Il existe un grand nombre de systèmes sans fil qui utilisent des émetteurs radiofréquences, et participent ainsi au niveau de champ électromagnétique ambiant mesurable dans l'environnement – *cf*. Tableau 1.

Tableau 1 : utilisation du spectre des radiofréquences

Bande de fréquences	Services / Applications
9 kHz – 30 MHz	Radiodiffusion Grandes Ondes, Ondes Moyennes et Ondes Courtes - Détecteurs de victimes d'avalanches - Trafic amateur - Systèmes de détection antivol (RFID) - Lecteur de cartes sans contact (RFID) - Applications médicales (*)
30 MHz – 87,5 MHz	Télédiffusion analogique et numérique (bande I) - Réseaux professionnels (taxis, pompiers, gendarmerie nationale, réseaux radioélectriques indépendants, *etc*.) - Radioamateurs - Microphones sans fil - Radiolocalisation aéronautique - Radars - Applications médicales (*)
87,5 – 108 MHz	Radiodiffusion en modulation de fréquences (bande FM)
108 – 136 MHz	Trafic aéronautique (balisage et bande « air »)
136 – 400 MHz	Télédiffusion analogique et numérique (bandes II et III) - Réseaux professionnels (police, pompier, SAMU, *etc*.) - Fréquences réservées au vol libre (*talkies walkies*) - Trafic amateur (bande « des 2 mètres ») - Trafic maritime (bandes VHF marine) - Radiomessagerie ERMES
400 – 470 MHz	Balise ARGOS - Réseaux professionnels (gendarmerie, SNCF, EDF…) - Trafic amateur (bande « 432 ») - Télécommandes et télémesure médicale – Systèmes de commande (automobile (RFID) - Réseaux cellulaires TETRA et TETRAPOL - Applications médicales*)
470 – 860 MHz	Télédiffusion bandes IV et V (analogique et numérique)
860 – 880 MHz	Bande ISM (Industriel, Scientifique, Médical) : appareils à faible portée de type alarmes, télécommandes, domotique, capteurs sans fil, RFID
880 – 960 MHz	Téléphonie mobile GSM 900 : voies montantes et voies descendantes
960 – 1710 MHz	Radiodiffusion numérique - Réseaux privés - Faisceaux Hertziens
1710 – 1880 MHz	Téléphonie mobile GSM 1800 : voies montantes et voies descendantes
1880 – 1900 MHz	Téléphones sans fil DECT
1920 – 2170 MHz	Téléphonie mobile UMTS
2400 – 2500 MHz	Bande ISM : réseaux Wi-Fi - *Bluetooth* - Four micro-onde
3400 – 3600 MHz	Boucle locale radio large bande de type WiMAX
>3600 MHz	Radars - Boucle locale radio - Stations terriennes – Faisceaux Hertziens

** Les applications médicales utilisant des champs électromagnétiques radiofréquences concernent les applications thermiques, l'imagerie et l'électrochirurgie. Ces applications sont détaillées dans le chapitre 4.2.4.*

Pour l'ensemble de ces applications, et dans le contexte de l'exposition du public, il faut distinguer deux configurations d'émetteurs :

- Émetteurs fixes qui émettent en permanence : c'est le cas par exemple des émetteurs de radio et télédiffusion ou des antennes de station de base de téléphonie mobile.
- Émetteurs portables dont l'émission est ponctuelle et liée à un usage déterminé comme par exemple des *talkies-walkies*, un téléphone mobile, une carte Wi-Fi sur un ordinateur portable.

En France, l'Agence Nationale des fréquences (ANFR) gère la réglementation et les autorisations de l'ensemble des émetteurs fixes installés sur le territoire français. Début 2009, environ 140 000 stations émettrices sont recensées dans les bases de données de

l'ANFR - Tableau 2. Ce nombre tient compte des émetteurs de l'Aviation Civile, des ministères de l'Intérieur et de la Défense mais ne tient pas compte des radioamateurs[21].

Tableau 2 : nombre de stations radioélectriques - source ANFR - mars 2009

Nombre total de stations radioélectriques implantées en France (*) :	**140 000**
dont : stations de base de téléphonie mobile (Bouygues Telecom, Orange et SFR)	70 000
Radio et télédiffusion (TDF)	12 000
Autres stations : réseaux radio professionnels, ministères de l'Intérieur et de la défense (police, pompier, SAMU, *etc*.)	58 000

(*) Beaucoup de sites d'émission sont mutualisés : plusieurs stations radioélectriques d'opérateurs différents sont installées sur un même support (pylône, château d'eau, etc.)

Sur l'ensemble du spectre radiofréquences, de très nombreuses bandes de fréquences sont réservées pour des applications militaires. Le présent rapport ne porte pas sur ces bandes de fréquences militaires classifiées.

Les principaux émetteurs radioélectriques et applications associées qui contribuent au niveau de champ électromagnétique ambiant sont décrits succinctement ci-dessous.

2.2.2 Radiodiffusion et télédiffusion

Les stations des réseaux de radio et de télédiffusion sont essentiellement des émetteurs, et les appareils récepteurs (télévisions, radios) ne fonctionnent qu'en mode réception. Ces appareils domestiques n'émettent donc aucun rayonnement aux fréquences considérées. Les émissions d'une station-émettrice de radio ou de télédiffusion peuvent être reçues par un grand nombre de récepteurs qui reçoivent et décodent simultanément le même signal. Ce nombre n'est limité que par la distance à laquelle le récepteur pourra recevoir un signal de niveau et de qualité suffisants, distance qui correspond à la zone de couverture de la station émettrice.

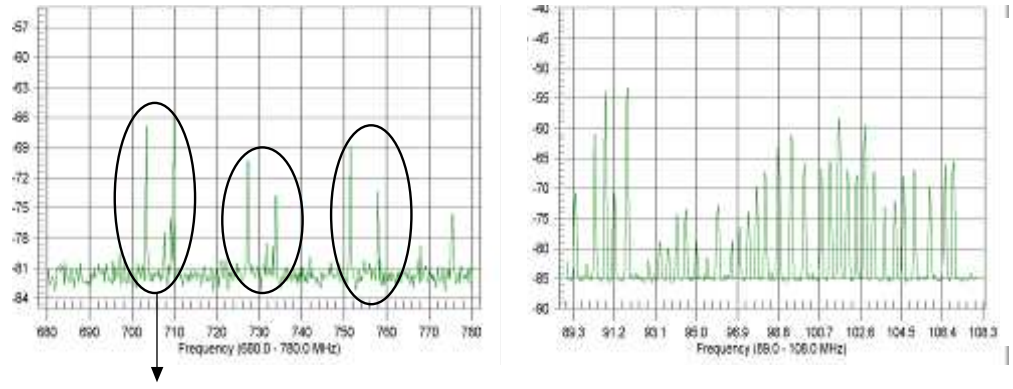
De nombreux émetteurs de radio et télédiffusion sont installés sur le territoire français afin de couvrir l'ensemble de la population. Ces émetteurs ont été installés progressivement entre les années 1950 et 1990 pour l'ensemble des réseaux de diffusion : couverture progressive du territoire pour la télévision analogique, réseaux de radiodiffusion grandes ondes, ondes moyennes et ondes courtes, réseaux de radiodiffusion FM (*cf.* Tableau 3).

21 A noter que l'arrêté du 30 janvier 2009 modifiant l'arrêté du 21 septembre 2000 prévoit l'obligation de déclarer auprès de l'ANFR dans un délai de deux mois à compter de son installation, toute station radioamateur dont la puissance apparente rayonnée est supérieure à 5 W.

Tableau 3 : réseaux de radiodiffusion et télédiffusion

Service / Application	Gammes de fréquences	Puissance d'un émetteur	Portée d'un émetteur	Modulation du signal
Radiodiffusion				
Grandes ondes	150 – 255 kHz	10 kW à 2 MW	200 km à 6 000 km (en fonction des conditions météo)	
Ondes moyennes	520 – 1 620 kHz			Modulation d'amplitude
Ondes courtes	2,3 – 26,1 MHz			
Bande FM – cf. Figure 5	87,5 – 108 MHz	10 W à 10 kW	20 km	Modulation de fréquences Largeur de canal 100 kHz
Télédiffusion				
Bande I Bande III Bande IV Bande V	47 – 68 MHz 174 – 223 MHz 470 – 606 MHz 614 – 860 MHz	20 W à 30 kW	100 km	Modulation OFDM

Les sites d'émission de radio et télédiffusion sont des points hauts : tour Eiffel pour la région parisienne, pylônes de grande hauteur en zone dégagée, pylônes en altitude, *etc*. Il y a en France environ 3 000 sites d'émission de télédiffusion et 2 500 sites de radiodiffusion dont de nombreux en milieu urbain pour les émetteurs de radio FM. Les puissances des émetteurs sont données à titre indicatif dans le Tableau 3. La Figure 5 présente des exemples de spectre électromagnétique caractéristiques de signaux de radiodiffusion FM et de télévision analogique.



Signal émis par un émetteur de télévision analogique **Signaux émis par des émetteurs de radiodiffusion FM**

Figure 5 : exemple de spectre mesuré de radiodiffusion FM et de télévision analogique

La société TDF, en tant qu'opérateur de réseaux hertziens et d'infrastructures mutualisées, gère l'ensemble de ces sites pour le compte des chaînes de télévision ou stations de radio. La mutualisation consiste à accueillir sur ces sites des émetteurs d'autres opérateurs (téléphonie mobile, réseaux professionnels privés, *etc*.). Actuellement, l'ensemble des

émetteurs de télévision sont en cours de modification dans le cadre du passage progressif au tout numérique (Télévision Numérique Terrestre – *cf*. chapitre 2.2.8).

2.2.3 Réseaux de téléphonie mobile

Les réseaux de téléphonie mobile sont des réseaux cellulaires construits à partir d'un ensemble de stations de base qui sont constituées d'antennes d'émission et de réception et des systèmes électroniques associés. Chaque station de base émet sur une zone de couverture définie (une cellule) et assure la communication avec les téléphones mobiles qui sont situés à l'intérieur de cette cellule (*cf.* Figure 6). Les stations de base et les équipements terminaux (téléphone mobile) sont à la fois émetteurs et récepteurs.

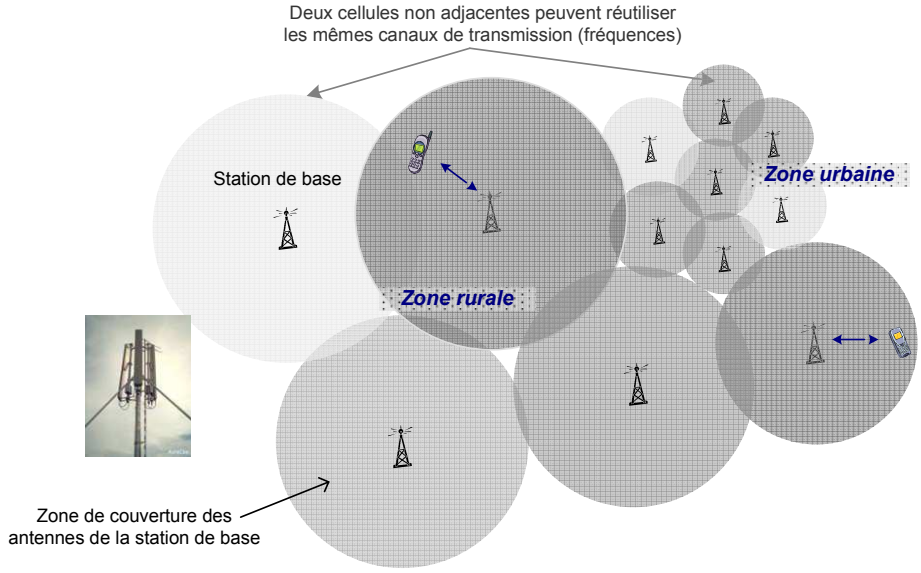


Figure 6 : réseau cellulaire de téléphonie mobile

Il y a actuellement en France 58,9 millions d'abonnés (donnée Arcep au 30 juin 2009), répartis principalement entre trois opérateurs de téléphonie mobile : Bouygues Telecom, Orange et SFR[22]. Chacun de ces opérateurs gère son propre réseau de stations de base.

Deux protocoles distincts et complémentaires existent en téléphonie mobile : le GSM et l'UMTS :

- Réseaux GSM 900 et GSM 1800

Le réseau GSM permet de transmettre de la voix et des messages courts de type SMS.

Dans le système GSM, il y a deux bandes de fréquences porteuses utilisées pour les communications entre l'antenne et le téléphone : autour de 900 MHz pour le GSM 900 et autour de 1 800 MHz pour le GSM 1800. A l'intérieur de ces bandes de fréquences, une bande plus étroite de largeur 200 kHz (dite « canal de trafic » ou *TRX*) est attribuée pour la communication entre une antenne de station de base et un téléphone (*cf*. Figure 7). Au cours d'une même communication, le canal attribué peut changer, comme par exemple dans le cas où le téléphone se déplace et traverse plusieurs cellules successives (*handover*[23], ou saut de fréquence).

---

[22] La part des MVNO (opérateurs de réseau mobile virtuel) représente environ 5 % des abonnés en France.

[23] Le *handover* est l'ensemble des opérations techniques mises en œuvre pour permettre à un téléphone mobile de changer de cellule sans interruption de la communication. Lorsqu'un téléphone mobile se déplace, la qualité de la liaison avec la station de base va s'affaiblir et le téléphone va « choisir » de communiquer avec une nouvelle station de base plus proche. Cela implique un changement de cellule (cf. Figure 6) et donc de fréquence (nouvelle voie balise – *cf.* Figure 8).

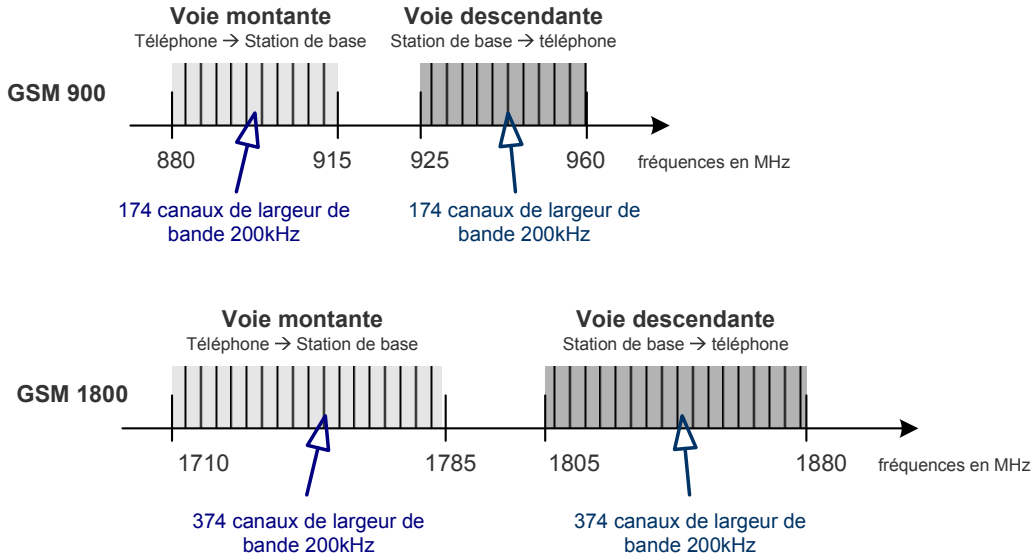


Figure 7 : bandes de fréquences de la téléphonie mobile GSM

A l'intérieur de chaque canal, il existe de plus un découpage temporel qui permet de partager le même canal de 200 kHz entre plusieurs utilisateurs (TDMA - *Time Division Multiple Access* - technique de répartition temporelle à accès multiple) : une communication entre un téléphone et l'antenne de station de base est transmise sous forme d'impulsions à raison d'une impulsion de durée 576 µs toutes les 4,6 ms. La fréquence des impulsions est donc de 217 Hz (217 impulsions par seconde). Ainsi, sur un même canal, huit utilisateurs peuvent téléphoner simultanément. Un téléphone n'émet donc qu'un huitième du temps[24]. Le nombre de canaux disponibles sur une antenne est choisi par l'opérateur en fonction du nombre d'utilisateurs potentiels à l'intérieur de la cellule. De plus, à chaque antenne est associé un canal spécifique dit « voie balise » (ou BCCH) qui émet à puissance constante quel que soit le nombre de communications simultanées et qui permet à l'antenne d'être repérée et identifiée par les téléphones présents dans la cellule (*cf*. Figure 8).

Un système de contrôle de puissance au niveau du téléphone et de l'antenne de station de base optimise les niveaux de puissances émises afin d'éviter les interférences entre utilisateurs et de réduire les consommations énergétiques (batterie du téléphone). Ainsi, plus la réception est de bonne qualité (par exemple lorsque le téléphone est proche de l'antenne), plus les puissances émises par l'antenne et par le téléphone sont faibles.

[24] Pour des applications de transfert de données supportées par le protocole GSM (GPRS – *General Packet Radio Service*), il est possible que 2 canaux ou plus soient utilisés simultanément. Dans ce cas, la puissance moyenne maximale est limitée. Ces applications ne sont pas utilisées en mode « voix ».

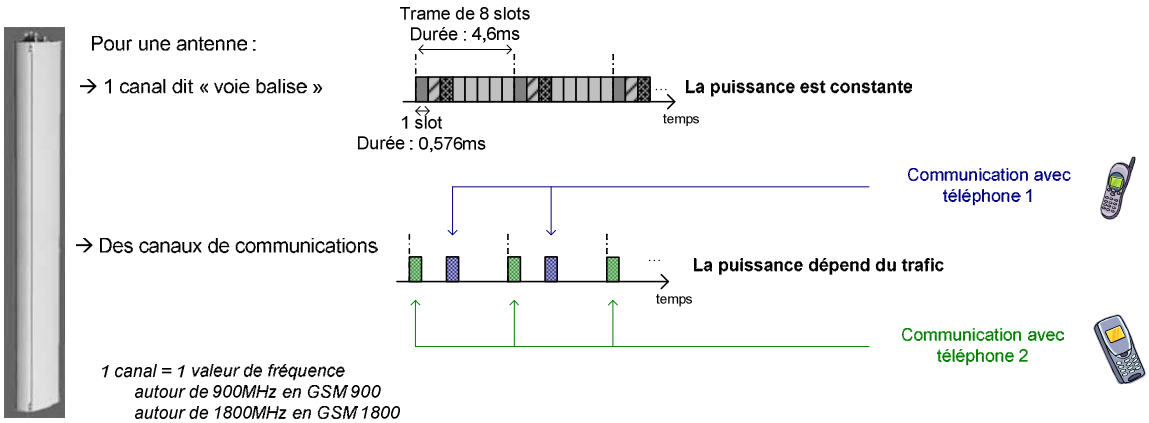


Figure 8 : canaux et voie balise en téléphonie mobile GSM

Des évolutions et adaptations techniques du système GSM sont apparues au cours du temps afin d'augmenter les débits utilisables sur une communication et donc de permettre des applications multimédia ou internet (technologies GPRS et EDGE par exemple).

- Réseau UMTS

L'UMTS est la norme de téléphonie mobile cellulaire dite de troisième génération (3G). Avec des débits de transmission très supérieurs à la 2eme génération (GSM), de l'ordre du Mbit/s, elle permet de nouveaux usages des téléphones mobiles : connexion internet mobile, consultation de courriers électroniques, services multimédias, partage de vidéo, *etc*. On retrouve aussi cette technologie dans les clés ou cartes 3G utilisées pour des connexions internet mobiles sur ordinateur portable.

La technologie 3G, basée sur un partage de puissance entre utilisateurs, est très différente de celle du GSM. Les bandes de fréquences d'émission (canaux) sont situées autour de 2,1 GHz avec une largeur de 5 MHz. Chaque canal est partagé par plusieurs utilisateurs en utilisant une technique d'étalement de spectre (CDMA, accès multiple par répartition de code) en large bande (*cf.* Figure 9).

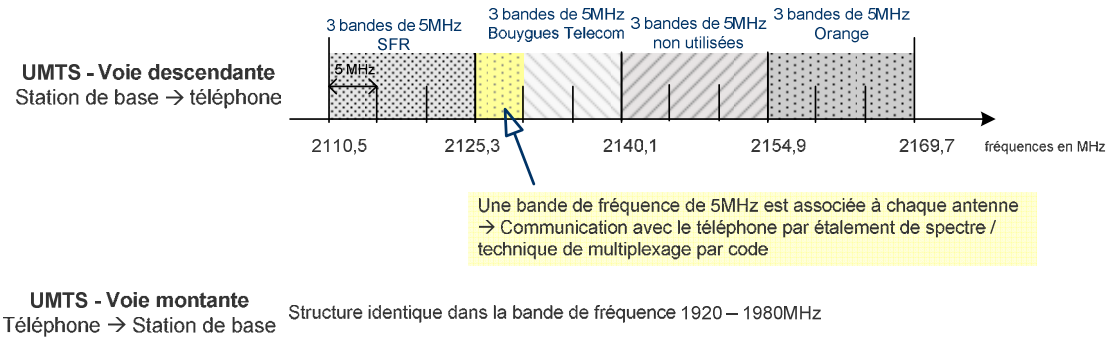


Figure 9 : bandes de fréquences de la téléphonie mobile UMTS

Un total d'environ 70 000 stations de base en France permet de couvrir l'ensemble du territoire pour les trois opérateurs de téléphonie mobile et pour les deux réseaux existants (GSM et UMTS). Environ 5 000 stations de base supplémentaires doivent être installées par les opérateurs pour le réseau UMTS, afin de respecter les obligations de couverture qui leur sont imposées.

Chaque station de base est constituée de plusieurs antennes-relais en fonction des réseaux (GSM 900, GSM 1800, UMTS) et de la zone à couvrir. Les antennes sont de différents types (antenne omnidirectionnelle ou panneau directionnel) et sont placées en hauteur sur des

pylônes, toit terrasse, château d'eau, façade d'immeuble ou à l'intérieur de bâtiments. Dans le cas le plus fréquent (utilisation de panneaux directionnels), une station de base est constituée de plusieurs panneaux avec des orientations différentes afin de couvrir l'ensemble de la zone et des réseaux.

La taille d'une cellule et donc le rayon d'émission d'une antenne de station de base dépend du nombre de communications transmises et donc de la densité de population : quelques dizaines de mètres pour les *pico* cellules situées à l'intérieur des bâtiments (stations de métro, centres commerciaux, *etc*.), quelques centaines de mètres pour une *micro* cellule en milieu urbain, quelques dizaines de kilomètres pour une *macro* cellule en milieu rural.

Il y a, par exemple, environ 90 stations de base de téléphonie mobile pour l'ensemble des trois opérateurs pour couvrir une ville de la taille de Grenoble.

Le système de contrôle de puissance de la technologie UMTS est beaucoup plus performant que celui du GSM, ce qui permet une meilleure gestion des changements de cellules notamment. Ainsi, le téléphone mobile en mode UMTS ne passe plus par des phases d'émissions brèves à puissance maximale, comme c'est le cas en GSM.

2.2.4 Téléphone sans fil domestique - DECT

Le DECT est une norme européenne d'accès radio numérique sans fil. Il concerne la téléphonie sans fil domestique et non mobile, c'est-à-dire les systèmes de téléphones sans fil constitués d'une base fixe et d'un ou plusieurs combinés.

Ce système est caractérisé par une couverture locale (entre 20 et 300 mètres suivant les modèles) et repose sur une technologie FDMA et une modulation GFSK dans la bande de fréquences 1 880 MHz à 1 900 MHz, divisée en 10 canaux de largeur 1,7 MHz. À l'intérieur de chaque canal, il existe de plus un découpage temporel (24 échantillons temporels de durée 0,4 ms), ce qui permet de partager le même canal de 1,7 MHz entre la base et plusieurs téléphones.

La puissance maximale d'émission autorisée est de 250 mW. L'ordre de grandeur de la puissance d'émission moyenne émise par un combiné ou par la base est de quelques dizaines de mW. Le combiné n'émet que pendant une communication et la base est en émission permanente[25], même en dehors de toute communication : un signal balise est émis régulièrement dans un des échantillons temporels (émission d'une durée de 0,4 ms toutes les 10 ms).

2.2.5 Réseaux locaux sans fil : LAN, *Bluetooth*, *etc*.

Les technologies des réseaux locaux (LAN – *Local Area Network*) permettent d'établir des connexions sans fils dans un périmètre géographique plus ou moins étendu. Les applications sont diverses : liaisons internet haut débit sans fil, réseaux privés d'entreprise, liaisons entre ordinateurs et périphériques informatiques*, etc*. Les technologies de réseaux locaux les plus utilisées actuellement sont :

- Réseau Wi-Fi

La technologie Wi-Fi permet de créer un réseau local WLAN (*Wireless Area Network*) d'une portée de quelques dizaines de mètres qui, comme les systèmes cellulaires, utilise des stations de base pour communiquer avec des ordinateurs portables ou d'autres objets communicants. Il permet de gérer la mobilité des utilisateurs avec des débits de transmission de données très supérieurs à ceux des réseaux cellulaires de type téléphonie mobile. La série de normes IEEE 802.11x qui définit le protocole Wi-Fi prévoit deux bandes de fréquences possibles : autour de 2,4 GHz et autour de 5,2 GHz. Pour chacune des bandes

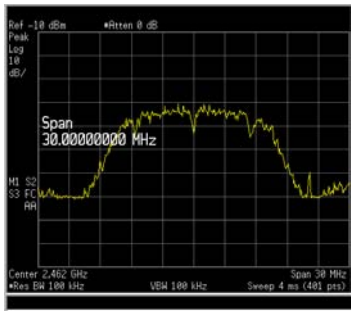
[25] Il faut noter que, sur certains modèles de téléphones DECT commercialisés très récemment, et dans un but d'économie d'énergie, la base fixe n'émettrait pas lorsque le combiné est reposé dessus.

de fréquences, une technique d'étalement de spectre en large bande est utilisée (*cf.* Figure 10).

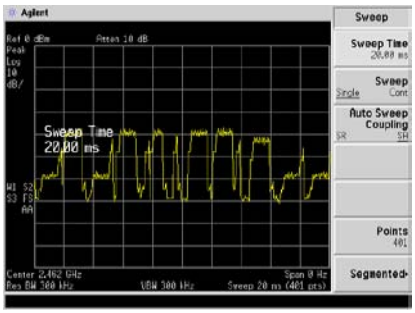
La puissance maximale autorisée d'un émetteur Wi-Fi est de 100 mW. La puissance moyenne réellement émise par l'émetteur (point d'accès ou ordinateur) est beaucoup plus faible et varie en fonction du type d'échange, de la taille des données à transmettre, du débit et du nombre d'utilisateurs simultanés. En réalité, compte tenu de l'architecture du protocole, et notamment des temps réservés à l'écoute des dispositifs connectés, la puissance moyenne maximale émise par un émetteur Wi-Fi ne peut dépasser la moitié de la puissance maximale autorisée, soit 50 mW. Les données sont transmises sous forme de paquets de signaux radiofréquences séparés par des temps d'attente ou de réponse du point d'accès ou de l'ordinateur.

Numéro du canal	Fréquence (GHz)
1	2,412
2	2,417
3	2,422
4	2,427
5	2,432
6	2,437
7	2,442
8	2,447
9	2,452
10	2,457
11	2,462
12	2,467
13	2,472

Canalisation de la bande à 2,45GHz (normes IEEE 802.11b et IEEE 802.11g)



Exemple d'enveloppe de spectre d'émission Wifi (IEEE 802.11g)



Aspect temporel des émissions WiFi

Figure 10 : signal Wi-Fi - source Supélec [Supélec- Wi-Fi]

- Liaison *Bluetooth*

La technologie d'accès sans fil *Bluetooth* est utilisée pour des connexions de très courte portée (inférieure à 20 m), de faible débit et de faible consommation. L'application principale est de remplacer les câbles : périphériques informatiques - souris sans fil, imprimante sans fil -, oreillettes pour téléphones mobiles, par exemple. C'est un système « point à point » fonctionnant dans la bande ISM (Industriel, Scientifique et Médical) située autour de 2,4 GHz, sans architecture centralisée comme dans le cas d'un réseau cellulaire. La puissance d'un émetteur *Bluetooth* est également limitée à 100 mW. Afin d'économiser de l'énergie et d'éviter les interférences avec d'autres dispositifs, il existe généralement un système de réduction de puissance lorsque la liaison entre les appareils est de bonne qualité.

2.2.6 Réseaux de radiocommunications professionnels de type TETRA

Le protocole TETRA est un système de radiotéléphonie numérique à vocation professionnelle, qui vise à remplacer à terme les réseaux privés analogiques. TETRA est un système TDMA, équivalent à un système de téléphonie GSM, mais qui fonctionne dans une bande de fréquence située autour de 400 MHz. Il permet 4 communications simultanées sur le même canal de 25 kHz.

Dans ce type de réseaux professionnels, on peut citer le protocole TETRAPOL qui est un système cellulaire numérique de radiocommunications sécurisées. Il est utilisé par de nombreux services de police et de gendarmerie en France et en Europe. Il fonctionne comme TETRA dans une bande de fréquence autour de 400 MHz mais, contrairement à TETRA et au GSM, il utilise un simple multiplexage fréquentiel sans multiplexage temporel.

2.2.7 Récapitulatif des puissances et portées

Le Tableau 4 illustre les puissances maximales émises par les principaux émetteurs qui participent à l'exposition du public. Ces données sont indicatives et doivent être complétées par la configuration d'exposition.

Tableau 4 : ordre de grandeur des puissances et portées d'émission de quelques émetteurs radiofréquences

Applications	Puissance maximale		Portée d'émission approximative
Émetteur de radio ondes courtes	Jusqu'à plusieurs millions de Watts	*indicative*	5 000 km
Émetteur FM	10 000 W	*indicative*	20 km
Émetteur de télévision	20 000 W	*indicative*	100 km
Téléphone DECT : base fixe en émission permanente	0,25 W	*réglementaire*	200 m
Réseaux de téléphonie mobile			
Téléphone mobile GSM 900 / 1800 Téléphone mobile UMTS (3G)	2 W / 1 W 0,25 W	*réglementaire*	10 km
Antenne directionnelle de *macro* cellule (pylône, toit terrasse…)	Quelques dizaines de Watts (*)	*indicative*	10 km
Antenne directionnelle de *micro* cellule (façade d'immeuble)	Quelques Watts	*indicative*	1 km
Antenne directionnelle de *pico* cellule à l'intérieur des bâtiments	1 W	*indicative*	500 m
Four micro-onde (émetteur dans une cavité métallique)	2 000 W	*indicative*	Uniquement à l'intérieur du four
Emetteur Wi-Fi	0,1 W	*réglementaire*	500 m
Emetteur *Bluetooth* (ordinateur ou périphérique sans fil)	0,1 W	*réglementaire*	20 m
Antenne omnidirectionnelle WiMAX	1 W	*indicative*	1,5 km

(*) donner des valeurs précises de PIRE nécessiterait de prendre en compte le gain de l'antenne considérée et la direction d'émission (*cf.* Figure 2).

2.2.8 Evolution des systèmes et perspectives

Dans le domaine des réseaux sans fil utilisant les radiofréquences, de nombreuses applications sont en cours de développement et donnent ou donneront lieu à de nouveaux protocoles de communication, et donc au déploiement et à l'utilisation de nouveaux émetteurs radioélectriques fixes ou intégrés dans des équipements mobiles.

Les systèmes et applications déployés actuellement (radiodiffusion, télédiffusion, réseaux professionnels, téléphonie mobile, réseaux sans fil, *etc.*) utilisent des fréquences situées entre 9 kHz et 3 GHz. Compte tenu de la forte occupation de ce spectre radioélectrique, la tendance générale avec l'évolution des technologies et des applications sans fil est d'utiliser des fréquences plus élevées, au-delà de 3 GHz. Des fréquences de propagation élevées sont généralement associées à des largeurs de bande importante, ce qui permet de pouvoir transmettre des débits de plus en plus élevés.

On peut citer quatre applications qui sont en cours ou vont être déployées à moyen terme :

- **Radio et télédiffusion : passage au « tout numérique »**

Pour la télévision, le passage à la télédiffusion numérique terrestre (TNT – norme DVB-T) et l'arrêt de la télédiffusion analogique sont prévus d'ici 2012. Cela implique des modifications technologiques de l'ensemble des émetteurs de télédiffusion situés sur le territoire français.

L'architecture du réseau (nombre de stations émettrices, zones de couverture) pour la télévision numérique sera identique à celle de l'analogique et il n'y aura donc pas création de nouveaux sites d'émission.

A plus long terme, le passage au numérique concernera les réseaux de radiodiffusion et impliquera des modifications de l'ensemble des émetteurs.

- **La boucle locale radio large bande : WiMAX**

Il s'agit d'une technologie de réseau sans fil de type cellulaire basée sur la norme IEEE 802.16 avec une antenne centrale et plusieurs terminaux, qui permet de transmettre des débits de plusieurs dizaines de Mbits/s sur des rayons de couverture de quelques dizaines de kilomètres. La puissance des antennes d'une station centrale est de l'ordre de quelques Watts et la station terminale au niveau de l'utilisateur peut être soit fixe soit sur un équipement portable. Des déploiements sont en cours actuellement en France dans la bande de fréquence 3,4 - 3,6 GHz, avec une vingtaine de titulaires d'autorisation. A la fin 2008, l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes (Arcep) a relevé environ 700 sites opérationnels sur le territoire français. Ce déploiement est très en retrait par rapport aux engagements de déploiement prévus, ce qui s'explique par le retard industriel et la maturité insuffisante des équipements techniques.

Les applications du WiMAX sont actuellement :

  - la fourniture d'accès internet sans fil à l'échelle nationale pour les services hauts débits nomades, notamment en zone urbaine dense.
  - L'aménagement numérique du territoire et la couverture des zones blanches ADSL dans lesquelles la boucle locale radio WiMAX se positionne comme une solution complémentaire dans une combinaison de technologies. Cette application s'inscrit généralement dans un réseau d'initiative publique et des projets de collectivités locales.

- **Télévision mobile personnelle (TMP)**

La télévision mobile personnelle est une technologie de télédiffusion associée à un mode de consommation multimédia mobile. Cela concerne la fourniture de services de télévision à des utilisateurs en situation de mobilité, la réception des programmes audiovisuels se faisant sur un terminal mobile qui n'est que récepteur et n'a pas de fonction d'émission. En France, la technologie retenue est la norme DVB-H qui fonctionne dans les différentes bandes de fréquences déjà utilisées par la télédiffusion : bande III autour de 200 MHz, bandes IV et V autour de 600 MHz. Le déploiement des émetteurs est prévu dans les prochaines années avec un objectif de couverture de 30 % de la population d'ici 2012 (milieux urbains denses principalement). Ce déploiement utilisera les supports des sites d'émission de télédiffusion existants mais il nécessitera aussi la création de nouveaux sites radioélectriques. Des discussions sont en cours, sous contrôle du CSA, sur l'édition des contenus et les modèles économiques retenus.

Il faut noter que l'emploi de réseaux de télédiffusion existants est l'un des moyens techniques de fourniture de services de télévision vers les mobiles, mais ce n'est pas le seul. La télévision sur téléphone mobile existe, depuis fin 2004, sur les réseaux mobiles de troisième génération (UMTS – *cf.* 2.2.3). De plus, des projets de systèmes mobiles par satellite sont en cours de lancement et devraient en particulier inclure la fourniture de services de télévision. L'évolution du marché au cours des prochaines années devrait déterminer la combinaison des technologies qui sera effectivement utilisée pour la fourniture de services de télévision vers des terminaux mobiles.

- **Téléphonie mobile UMTS : attribution d'une quatrième licence**

Une nouvelle procédure d'appel à candidatures visant l'attribution d'une quatrième licence de réseau de téléphonie mobile UMTS a été engagée depuis plusieurs mois, dans le cadre de

la stratégie globale en matière d'attribution de licences du Gouvernement. Cette attribution conduira à des obligations de déploiement et de couverture du territoire analogues à celles qui ont été imposées aux trois opérateurs actuels. Ainsi, l'arrivée d'un quatrième opérateur impliquerait le déploiement d'environ 12 000 stations de base supplémentaires.

Cette procédure réservée à un nouvel entrant ne constitue que la première phase de l'attribution des fréquences résiduelles dans la bande des 2,1 GHz pour la téléphonie mobile UMTS. Il reste en effet 15 MHz disponibles pour le déploiement de réseaux UMTS (*cf*. Figure 9).

Cette première phase qui est en cours ne concerne que 5 MHz sur ces 15 MHz. Une deuxième procédure sera menée ensuite pour les 10 MHz restant, ouverte à l'ensemble des acteurs, qu'ils soient ou non déjà titulaires d'une licence.

- **Téléphonie mobile : évolutions à plus long terme**

Au-delà des réseaux de deuxième génération (GSM) et de troisième génération (UMTS) déjà largement déployés ou en cours de déploiement, la prochaine étape est déjà engagée et vise à préparer l'introduction des technologies dites de quatrième génération qui prendront la succession de l'UMTS au cours de la prochaine décennie, en vue de la fourniture d'un accès mobile à très haut débit. Parmi ces nouvelles technologies, on peut citer le LTE (*Long Term Evolution*) dans des bandes de fréquences autour de 800 MHz et de 2,6 GHz. Dans cette perspective, des discussions sont en cours au niveau mondial et européen sur les bandes de fréquences qui seront utilisées, les normes, protocoles et technologies retenus et la modalité d'attribution des licences correspondantes.

3 Métrologie et évaluation des niveaux d'exposition

3.1 Marché et usages des technologies

Les équipements émetteurs de radiofréquences sont présents dans l'environnement quotidien depuis une soixantaine d'années avec principalement les émetteurs de radiodiffusion et de télédiffusion déployés dans les années 1950 à 1970, puis les émetteurs de radiodiffusion FM dans les années 1980. Les usages étaient alors principalement limités à la diffusion massive de signaux (télévision, radio) à l'ensemble de la population. Depuis une vingtaine d'années, on assiste à une multiplication des systèmes radiofréquences et une diversification des usages associés. On peut citer :

- l'apparition et la diffusion massive de la téléphonie mobile,
- le développement des accès internet sans fil,
- le développement des usages nomades et des équipements portables et mobiles,
- le développement généralisé du « sans fil » (réseau de capteurs, domotique, informatique, *etc*.).

La téléphonie mobile est marquée par une diffusion massive, rapide et mondiale. Elle est la seule technologie à faire l'objet du rapport « OCDE en chiffres » [Rapport OCDE, 2008]. Reprenant des données de l'Union Internationale des Télécommunications, ce rapport présente en effet des chiffres éloquents : « d'un peu plus de 750 000 abonnements en 1985 à 2,5 millions en 1987, le nombre total d'abonnements aux téléphones mobiles a dépassé les 11 millions en 1990, et le milliard en 2002. Le taux de croissance a cependant ralenti, mais le nombre d'abonnements a tout de même dépassé les 3,3 milliards en 2007 » (*cf*. Figure 11).

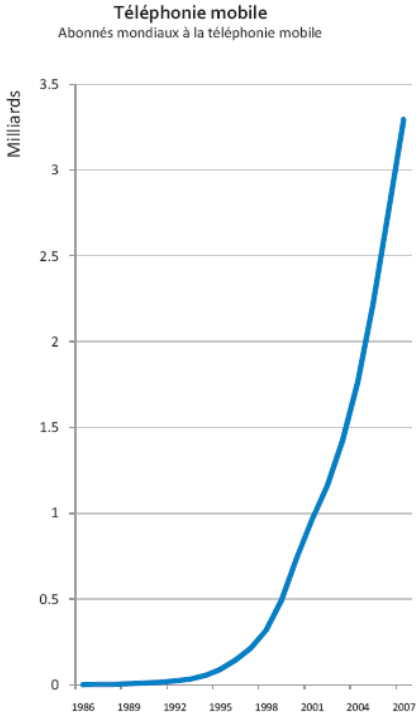


Figure 11 : évolution du nombre d'abonnés à la téléphonie mobile dans le monde [Rapport OCDE, 2008]

En France, d'après les données de l'Arcep de juin 2009, on compte quelque 58,9 millions d'abonnés à la téléphonie mobile, avec une progression de 5,2 % sur les douze derniers mois.

Cette situation est en phase avec la volonté politique : « la totalité des communes de France bénéficiera de la téléphonie mobile d'ici 2007 » assurait, en novembre 2005, le ministre délégué à l'aménagement du territoire. En septembre 2008, la couverture réseau des opérateurs mobiles ne laissait que 364 communes isolées, à comparer aux 36 860 villes et villages que compte l'Hexagone. Il est important de souligner que la diffusion massive de la téléphonie mobile sur le territoire français résulte d'une décision de politique publique, présentant des objectifs assumés positivement il y a quelques années seulement.

Les usages liés à l'internet ont également connu une croissance très forte. Il y a en France 17,7 millions de points d'accès internet à haut débit, essentiellement en ADSL (par exemple modem « *box* » internet). A leurs domiciles, 31 % des français utilisent le Wi-Fi pour se connecter à Internet, 40 % utilisent une connexion filaire et 29 % n'ont pas de connexion Internet. Concernant les usages nomades, 13 % des français ont une carte 3G ou une clé 3G pour connecter leur ordinateur à Internet via le réseau mobile. Cette progression des usages est à lier à l'évolution des téléphones, au déploiement des réseaux 3G, à l'augmentation des débits et au « confort » qui en résulte pour l'utilisateur.

De façon plus générale, un nombre croissant d'appareils électroniques peuvent être connectés entre eux par liaison sans fil Wi-Fi ou *Bluetooth* (consoles de jeux, appareils multimédias, équipements de la maison, *etc*.) et échanger ainsi des informations. Ces liaisons sans fil se rajoutent aux équipements émetteurs de champs électromagnétiques présents dans l'environnement domestique : four à micro-ondes, téléphone sans fil DECT, systèmes d'alarmes sans fil, systèmes de gestion d'énergie (éclairage par exemple), domotique, lecteurs de cartes (RFID).

3.2 Interactions onde - matière vivante

Les interactions des champs électromagnétiques non ionisants avec les organismes vivants peuvent être de différentes natures : circulation de courants et échauffements des tissus. L'interaction dépend de l'environnement, de la forme et des caractéristiques physico-chimiques de la matière rencontrée. Selon la fréquence, la pénétration de l'onde, les interactions avec la matière ne sont pas les mêmes et il est nécessaire d'utiliser des unités de grandeurs appropriées (*cf*. Tableau 5). Les phénomènes biologiques pris en compte pour prévenir des effets sanitaires dépendent de l'interaction des ondes avec la matière à la fréquence considérée. Ils s'expriment différemment en fonction du type de champ (électrique ou magnétique), et de sa fréquence. Jusqu'à 100 kHz, il s'agit des champs et courants pouvant entraîner la stimulation de tissus excitables (système nerveux et muscles). Au-dessus de 10 MHz, l'absorption des radiofréquences devient prédominante et l'échauffement le mécanisme essentiel. Aux fréquences intermédiaires, entre 100 kHz et 10 MHz, il y a un mélange des deux phénomènes. Dans le domaine des radiofréquences supérieures à 10 MHz, le paramètre de référence qui permet de quantifier la dissipation d'énergie dans la matière vivante est le débit d'absorption spécifique (DAS). Le DAS est la puissance absorbée par unité de masse de tissus et s'exprime en Watts par kilogramme (W/kg). En-dessous de 10 MHz, on utilise la densité de courant induit pour caractériser l'exposition aux radiofréquences. Elle s'exprime en Ampère par mètre carré (A/m^2).

Tableau 5 : grandeurs physiques caractérisant l'interaction onde / matière, en fonction de la fréquence

	Gamme de fréquences	Grandeur physique	Unités	Effets à l'origine des valeurs limites visant à prévenir les effets sanitaires	
	0 - 1 Hz	**Induction magnétique** pour les champs statiques (fréquence nulle)	T	Stimulation musculaire	Système cardiovasculaire / charges électriques de surface - induction de champ électrique dans les tissus en mouvement
		Densité de courants pour les champs variables dans le temps	A/m^2		Système nerveux central
↑	1 Hz - 100 kHz	**Densité de courants**	A/m^2		Système nerveux
Radiofréquences	100 kHz - 10 MHz	**Densité de courant et débit d'absorption spécifique**	A/m^2 W/kg		Système nerveux Stress thermique généralisé du corps, Échauffement localisé
	10 MHz - 10 GHz	**Débit d'absorption spécifique**	W/kg	Échauffement	Stress thermique généralisé du corps
					Échauffement localisé
	10 GHz - 300 GHz	**Densité de puissance**	W/m^2		Tissus à la surface ou proches de la surface du corps
↓	300 GHz – Rayonnements ionisants	**Énergie des photons**	eV		Tissus à la surface ou proches de la surface du corps, réaction photochimique

Effets biologiques, thermiques et sanitaires

L'observation d'un effet biologique, *a fortiori* en condition expérimentale, ne signifie pas forcément qu'il entraîne un dommage et encore moins qu'il se traduise par un effet sur la santé. Le corps humain est soumis en permanence à un ensemble de *stimuli* internes et externes, entraînant éventuellement des réactions biologiques d'adaptation, ayant un impact sur les cellules, le fonctionnement des organes et la santé. Un impact sur la santé n'intervient que lorsque des effets biologiques entraînés par une agression dépassent les limites d'adaptation du système biologique considéré. Comme par exemple pour les rayonnements ionisants, cela peut se produire de manière aiguë, à la suite d'agressions répétées ou à plus long terme.

Concernant les radiofréquences, on distingue souvent les effets thermiques des effets dits « non thermiques » :

- Les effets thermiques désignent les effets biologiques qui peuvent être mis en évidence sur des modèles de cultures cellulaires, animaux ou humains, lorsque l'on observe une augmentation de température des cellules ou des tissus, consécutive à une exposition aux radiofréquences. Ce sont des effets qui concernent la partie haute des radiofréquences, au-dessus de 100 kHz, mais surtout à partir de 10 MHz. L'effet thermique est caractérisé par une augmentation de la température des tissus et résulte de la forte teneur en eau de la matière vivante (ou du milieu dans les expériences *in vitro*). En effet, en raison de leur caractère « polarisé », les molécules d'eau soumises à un champ électrique oscillant ont tendance à suivre l'orientation de ce champ, ce qui produit des frottements intermoléculaires, d'où une élévation de température. De

nombreuses études expérimentales ont permis de définir que le seuil d'apparition d'un effet thermique correspond à une hausse de 1°C de la température corporelle chez l'homme, c'est à dire un DAS pour le corps entier de 4 W/kg environ. Au-dessous de cette valeur, le système de thermorégulation de l'organisme exposé est capable de maintenir la température corporelle, car la vascularisation des tissus biologiques permet l'évacuation de la chaleur.

- Les effets non thermiques, ou « athermiques », apparaîtraient à des niveaux d'exposition non thermique, pour lesquels le corps peut réguler sa température et dissiper un éventuel échauffement. Dans le cas expérimental où des cultures cellulaires sont exposées aux radiofréquences, il est question d'effets dits « non thermiques » si aucune élévation de température susceptible de les provoquer ne peut être mesurée.

Pour les études des effets biologiques des rayonnements électromagnétiques non ionisants, une prise en compte immédiate de la mesure de l'exposition, souvent appelée « dosimétrie »[26], adaptée aux modèles expérimentaux, est indispensable pour obtenir des données scientifiquement utilisables. Ceci inclut la modélisation, des mesures physiques et des calculs numériques. On considère que ces deux méthodes doivent être employées pour valider un résultat.

La connaissance du DAS, à partir de 100 kHz, ou des courants induits jusqu'à 10 MHz (*cf.* Tableau 5), est donc indispensable pour obtenir une information fiable sur l'exposition d'une personne, ou d'un système d'étude (culture cellulaire *in vitro*, expérience sur un animal *in vivo*). Au-delà de 10 GHz, on utilise la densité de puissance du rayonnement (W/m^2) comme grandeur caractéristique de l'exposition, car à partir de cette gamme de fréquences, l'absorption par les tissus biologiques devient très faible.

Le terme « dosimétrie » est fréquemment employé pour désigner la mesure de l'exposition au moyen de la mesure du DAS. Cette mesure vise à évaluer la puissance absorbée par un milieu biologique, un animal ou une personne. Si des méthodes existent pour quantifier expérimentalement le DAS dans des milieux homogènes (*cf*. paragraphe 3.4.1), cette approche est pour l'heure impossible à réaliser dans des milieux hétérogènes. Pour obtenir des estimations du DAS pour des systèmes réalistes exposés à des rayonnements radiofréquences, on procède généralement par des calculs, des simulations numériques réalisées après modélisation de la source et du sujet exposé.

Dans certains cas, lorsque la source de champ est loin du système étudié, et donc les niveaux de puissance absorbés faibles, il devient très difficile de mesurer le DAS, les méthodes disponibles étant peu sensibles. Il est alors possible de caractériser l'exposition du sytème considéré par la mesure de la densité de puissance du rayonnement électromagnétique en un point donné ou d'établir sa cartographie en 2 ou 3 dimensions. Elle peut être obtenue à partir de mesures directes des champs électrique et magnétique ou bien indirectement par des méthodes d'imagerie ou des calculs numériques (*cf*. annexe 3.2). Des simulations numériques permettent ensuite d'estimer le DAS.

Dans tous les cas, c'est le DAS qui caractérise l'exposition des tissus biologiques. La connaissance de l'intensité du champ électromagnétique environnant les tissus constitue au mieux une approximation de cette exposition, et est utilisée en pratique pour vérifier la conformité de l'exposition par rapport à la réglementation (cf. chapitre 6).

[26] Dans ce domaine d'étude, on appelle fréquemment « dosimétrie » l'évaluation des quantités physiques susceptibles de caractériser un effet biologique, même si on ne mesure pas à proprement parler une « dose », mais plutôt l'intensité de courants induits, ou encore une densité d'énergie dissipée dans les tissus.

L'influence de la modulation d'un signal radiofréquence

La question de la perception des fréquences de modulation dans un signal radiofréquence a été mise en avant dans la controverse publique autour des effets sanitaires éventuels des antennes-relais GSM notamment. La question de l'émission de champs électromagnétiques basses fréquences par les antennes de stations de base de téléphonie mobile est abordée dans le paragraphe 3.5.2. Dans le domaine du traitement du signal, d'un point de vue théorique, lorsque deux signaux d'amplitudes voisines et de fréquences proches sont soumis à un système non linéaire[27], il est possible d'observer des « produits d'intermodulation », c'est-à-dire des signaux à des fréquences qui résultent de la combinaison des deux fréquences de départ. Les amplitudes associées à ces nouveaux signaux sont faibles et inférieures de plusieurs ordres de grandeurs à celles des signaux de départ. L'apparition de ces produits d'intermodulation est donc conditionnée à la présence d'éléments non linéaires. On peut rapprocher la création de produits d'intermodulation de la question de la démodulation qui pourrait être effectuée par le corps humain en présence de signaux radiofréquences modulés par des signaux basses fréquences. La question de savoir si le corps humain présente des caractéristiques de réponse non linéaire lorsqu'il est exposé à des signaux de télécommunications a été étudiée par [Sheppard, 2008] (cf. 4.3.1.3.1). Dans cette revue, aucun effet non thermique n'est mis en évidence, même à des niveaux équivalents aux champs électriques endogènes. En pratique, les intensités des signaux résultant d'une hypothétique démodulation par le corps humain sont extrêmement faibles par rapport aux niveaux d'exposition à la fois aux radiofréquences et aux basses fréquences, et leur action sur le corps humain apparaît donc peu vraisemblable.

3.3 Zones de champ proche et de champ lointain

La zone qui se situe à proximité immédiate d'une source de champ électromagnétique est appelée zone de champ proche. L'étendue de cette zone dépend de la fréquence de l'onde électromagnétique émise et de la dimension de l'antenne (*cf*. Figure 12).

A l'intérieur de cette zone, la répartition des champs électromagnétiques est complexe et ne peut pas être simplement décrite selon une représentation en onde électromagnétique propagative. L'évaluation par des méthodes de simulation, ou par la mesure, des intensités de champs électrique et magnétique, notamment, est difficile et délicate. Dans cette zone, l'évaluation du DAS est ainsi indispensable pour quantifier l'exposition des personnes.

Au-delà de la zone de champ proche, se trouve la zone de champ lointain dans laquelle l'onde électromagnétique est formée et se propage selon des phénomènes ondulatoires classiques (que l'on peut modéliser par exemple en somme d'ondes planes). Dans cette zone, il est possible de mesurer les intensités des champs électrique et magnétique. Il existe aussi des méthodes de simulation et de modélisation qui permettent de les calculer en prenant en compte les caractéristiques d'émission des antennes ainsi que les bâtiments et obstacles.

[27] Un système linéaire auquel on applique un signal d'entrée *x* donne en sortie un signal proportionnel à *x*. Plus généralement, un système linéaire satisfait au principe de superposition, qui stipule que la réponse à la somme de deux signaux est égale à la somme des réponses des deux signaux pris indépendamment. Un système non linéaire ne satisfait pas au principe de superposition.

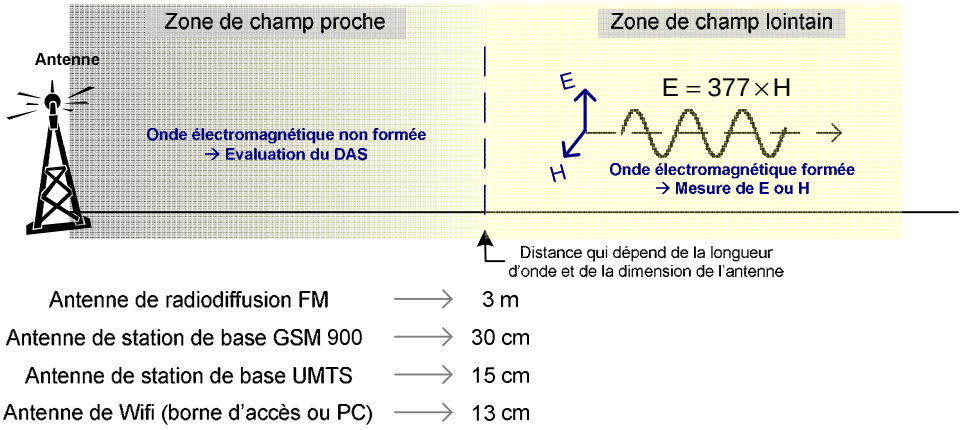


Figure 12 : zones de champ proche et de champ lointain

Ainsi, pour évaluer les niveaux d'exposition du public aux champs électromagnétiques, il convient de distinguer deux configurations d'exposition très différentes :

- *lorsque la personne est proche de l'émetteur radioélectrique*

C'est le cas dans des configurations d'utilisation d'équipements mobiles : utilisation d'un téléphone mobile ou sans fil, d'une clé ou carte 3G, ou d'une carte Wi-Fi sur un ordinateur portable. On parle dans ce cas d'exposition en champ proche.

- *Lorsque la personne est loin de l'émetteur radioélectrique*

C'est le cas général de l'exposition du public aux émetteurs fixes que sont les stations de base de téléphonie mobile, les émetteurs de radio et télédiffusion, les bornes d'accès Wi-Fi, *etc*. On parle alors d'exposition en champ lointain.

Cette distinction entre les configurations d'exposition en champ proche et d'exposition en champ lointain est rendue nécessaire par les lois de la physique de la propagation des ondes électromagnétiques, qui imposent de distinguer deux zones de rayonnement distinctes autour d'un émetteur radioélectrique.

3.4 Exposition en champ proche

Les situations d'exposition en champ proche concernent l'ensemble des équipements terminaux de télécommunications dans leurs différentes configurations d'usage :

- téléphone mobile : collé à l'oreille, dans la main, fixé à la ceinture, tenu devant soi pour la lecture ou l'écriture de messages, *etc*.
- téléphone sans fil domestique collé à l'oreille,
- périphériques sans fil, clés USB 3G sur un ordinateur, antenne Wi-Fi à l'intérieur d'un ordinateur, *talkies-walkies*, interphone bébé, *etc.*

Ces situations d'exposition en champ proche concernent aussi les émetteurs radioélectriques fixes pour des personnes qui se trouveraient à proximité immédiate des antennes. Ce point sera simplement évoqué dans ce chapitre car il ne concerne pas l'exposition du public mais relève de l'exposition des travailleurs qui fait l'objet d'une recommandation spécifique et qui sera prise en compte dans la directive 2008/46/CE [directive 2008/46/CE].

Au niveau européen, la directive 1999/05/CE, dite directive R&TTE [directive RTTE] s'applique aux équipements radioélectriques et aux équipements terminaux de télécommunications. Elle impose un marquage CE qui garantit la conformité de l'ensemble de ces systèmes mis sur le marché aux exigences essentielles. Ces exigences essentielles concernent :

- la sécurité électrique,

- les aspects de compatibilité électromagnétique,
- l'utilisation efficace du spectre radioélectrique,
- des exigences de sécurité liées à la protection des personnes vis-à-vis des champs électromagnétiques et [le] respect des niveaux de protection définis dans la recommandation européenne 1999/519/CE ([Recommandation européenne – décret 3 mai 2002], *cf*. chapitre 6).

3.4.1 Méthodes utilisées

L'exposition en champ proche par rapport à un émetteur radioélectrique est évaluée par la connaissance du débit d'absorption spécifique (DAS) provoqué par l'équipement dans les conditions d'utilisation spécifiques. Compte tenu de la variabilité des interactions du champ électromagnétique avec la matière, la valeur du DAS dépend de la taille du sujet ou de l'échantillon biologique, de son orientation dans le champ électromagnétique, des paramètres physico-chimiques du milieu (conductivité, permittivité diélectrique), des caractéristiques d'émission et des facteurs environnementaux. Le DAS peut être évalué soit par la mesure, soit par le calcul numérique. De nombreux travaux de recherche et de développement ont été réalisés et sont en cours autour du sujet de l'évaluation du DAS. On citera notamment, parmi les plus récents : [Hadjem, 2005], [Zhao, 2005], [Baumann, 2006], [Derat, 2006], [Gabriel, 2006], [Zamorano, 2006], [Hamblin, 2007], [Lee, 2007], [Lin, 2007], [Peyman, 2007], [Schmid, 2007], [Yang, 2007], [Hirata, 2008], [Pradier, 2008], [Vermeeren, 2008].

- Méthodes de mesures

Le DAS résultant d'un équipement ne peut pas être mesuré directement dans les tissus humains par une mesure qui serait invasive. Il est donc évalué en laboratoire sur des fantômes (mannequins) dont les propriétés d'absorption des ondes électromagnétiques sont proches de celles du corps humain. La forme du fantôme dépend de la configuration d'utilisation de l'émetteur : tête seule, corps entier, cuve rectangulaire, *etc*. Ce fantôme est rempli généralement d'un liquide homogène dont les propriétés diélectriques sont définies en fonction de la fréquence et des caractéristiques des tissus humains du volume considéré.

La grandeur mesurée peut être soit la température, soit le niveau de champ électrique. A partir de ces grandeurs, il est ensuite possible de calculer le DAS. Dans tous les cas, ce sont des mesures complexes et délicates à réaliser, qui ont nécessité en amont de nombreux travaux de recherche pour notamment définir les caractéristiques du liquide équivalent aux tissus biologiques[28], valider la forme du fantôme et estimer les incertitudes liées entre autres à la taille des sondes de mesures et au nombre de points de mesure.

- Méthodes de calcul

Des modèles physiques associés à des méthodes numériques utilisées en électromagnétisme permettent de calculer le DAS dans diverses configurations d'utilisation de l'équipement radioélectrique. Parmi les méthodes numériques utilisées, on peut citer la méthode des différences finies (FDTD[29]), les méthodes d'éléments finis (BEM, FEM[30]), la méthode des moments. Ces méthodes sont basées sur la résolution exacte des équations de l'électromagnétisme, à partir du maillage du volume de la zone d'intérêt (tête, corps entier, *etc*.). La simulation numérique permettant de calculer le DAS

[28] C'est-à-dire des liquides dont les propriétés électromagnétiques (conductivité et permitticité diélectrique) sont voisines de celles des tissus humains, permettant ainsi de reproduire par exemple l'absorption du rayonnement.

[29] FDTD *: Finite Difference Time Domain.*

[30] BEM : *Boundary Element Method*, et FEM : F*inite Element Method.*

résultant d'un équipement radioélectrique nécessite au préalable le développement de modèles numériques du corps humain avec la prise en compte des différentes morphologies, en fonction de l'âge, du sexe et des caractéristiques d'absorption électromagnétique des différents tissus ou organes.

Comme pour toute méthode numérique, un travail important doit être réalisé en parallèle des calculs afin de connaître les limites d'utilisation des modèles et d'estimer la qualité et la précision des méthodes ainsi que les incertitudes associées.

Afin de pouvoir utiliser le DAS comme outil de certification des terminaux, les caractéristiques des tissus ont été choisies de manière à maximiser la puissance dissipée dans un fantôme homogène par rapport à la puissance qui serait dissipée dans les tissus réels hétérogènes (tête ou corps entier). Ainsi, le DAS mesuré dans un fantôme avec un liquide homogène équivalent donne une surestimation du DAS réel dans les tissus humains. La mesure du DAS donne donc dans ce cas une évaluation « maximisante » de l'exposition réelle.

3.4.1.1 Cas des équipements terminaux (émetteurs portables)

Concernant les téléphones mobiles GSM et UMTS, l'évaluation du DAS est réglementée par la norme harmonisée EN 62209-1 [EN 62209-1] qui définit les méthodes et protocoles métrologiques à utiliser pour mesurer le DAS induit par des téléphones mobiles utilisés près de l'oreille. Cette norme décrit les contraintes sur les équipements de mesure, les fantômes, les liquides équivalents en fonction des fréquences, *etc*. Ce protocole de mesure de DAS est spécifique aux téléphones mobiles placés près de l'oreille et ne concerne ni les autres configurations d'utilisation ni les autres types d'émetteurs portables. Un fantôme qui a la forme d'une tête d'homme est utilisé avec deux positions précises pour le téléphone mobile : collé sur la joue, ou incliné vers l'oreille (*cf*. Figure 13). Le DAS est en réalité mesuré pour douze configurations différentes (en fonction des deux positions précédemment décrites et des fréquences testées). C'est la valeur maximale de ces différents tests qui est finalement retenue pour vérifier la conformité de l'appareil à la réglementation française.

Il faut noter que la valeur de DAS qui figure par exemple dans les notices des téléphones mobiles commercialisés en France (*cf.* paragraphe 3.4.2.1) est une valeur de DAS de type « pire cas ». La norme de test du DAS des téléphones mobiles (EN 62209-1) propose un méthode conduisant à une évaluation du DAS maximal, et non pas une mesure du DAS « réel » tel qu'il pourrait être observé dans une situation de communication réelle. En effet, le fantôme utilisé, le liquide équivalent aux tissus humains, les positions du téléphone par rapport à la tête, la puissance émise par le téléphone sont telles que le DAS mesuré à l'issu des procédures de mesure sera nécessairement un majorant de l'exposition réelle. En particulier, le téléphone est placé en mode d'émission à puissance maximale continue pendant toute la durée de la mesure, alors que les terminaux GSM et UMTS utilisent un contrôle de puissance, permettant d'adapter celle-ci en fonction de la qualité de la liaison radio avec l'antenne.

Mesure de DAS d'un téléphone mobile collé à l'oreille

Banc de mesure de DAS corps entier

Mesure de DAS d'une clé USB 3G connectée sur un PC

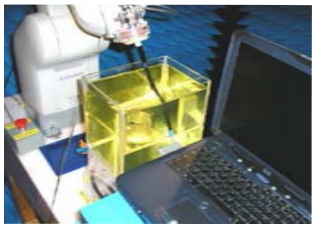


Figure 13 : méthodes de mesure pour l'évaluation du DAS (source ANFR)

La norme CEI 62209-2 [EN 62209-2], qui est actuellement en discussion au CENELEC, définit l'ensemble des protocoles, méthodes et équipements de mesure nécessaires à la mesure du DAS engendré par des équipements utilisés à proximité de la personne : téléphones portés à la ceinture, montres, ordinateurs portables avec carte Wi-Fi intégrée, clé USB 3G, terminaux *Bluetooth*, *etc*. Cette norme est le complément de la norme harmonisée EN 62209-1 qui ne traite que des équipements utilisés près de l'oreille, et elle préconise l'utilisation d'un fantôme plan (cuve remplie d'un liquide homogène – Figure 13). La norme CEI 62209-2 devrait être adoptée en 2010 et devenir une norme harmonisée européenne.

Les normes précédentes définissent également des critères sur la base desquels un équipement peut être déclaré conforme sans avoir besoin d'être testé. Certains équipements de télécommunication, par exemple les téléphones sans fil numériques domestiques DECT qui ont une portée limitée, utilisent des puissances d'émission très faibles. Ainsi, avec l'hypothèse conservatrice que toute la puissance émise est absorbée par les tissus du corps humain, tous les équipements qui émettent moins de 20 mW ne peuvent pas dépasser la limite de DAS local de 2 W/kg moyennés sur 10 g. Ils sont donc conformes par construction[31].

Un sujet d'étude et de recherche plus particulier concerne la dosimétrie pour les personnes fragiles, à savoir les enfants et les femmes enceintes ([Hadjem, 2005], [Wiart, 2005], [Christ, 2006], [De Salles, 2006], [Wang, 2006], [Dimbylow, 2007], [Conil, 2008], [Pradier, 2008]). Les méthodes de mesures de DAS présentées ci-dessus, et qui utilisent des modèles de têtes ou de corps entier d'adultes remplis de liquide homogène équivalent, ne prennent pas en compte les spécificités et l'hétérogénéité particulière des modèles d'enfant et de femmes enceintes (modèle femme / fœtus).

Plusieurs travaux ont ainsi porté sur la modélisation de la tête d'enfants. Par exemple, dans le cadre du projet ADONIS (« Analyse dosimétrique des systèmes de téléphonie mobile de troisième génération » – projet RNRT 2003-2006), le sous projet ADERIS (« Analyse dosimétrique de l'absorption par la tête des enfants des rayonnements émis par les mobiles ») a étudié l'applicabilité pour les enfants des méthodes d'analyse de la conformité des mobiles aux restrictions de base. Il a permis le calcul de DAS sur différents modèles de

[31] En effet, la puissance crête émise par un combiné DECT est au maximum de 250 mW. La puissance moyenne maximale est de 10 mW. Un appareil dont la puissance moyenne maximale est inférieure à 20 mW est conforme aux restrictions de base (DAS nécessairement inférieur à 2 W/kg). *Cf*. Norme NF EN 50371.

têtes d'enfants élaborés à partir d'acquisitions d'images par résonance magnétique. Ces travaux ont montré la complexité et la grande variabilité entre les différents modèles utilisés. Pour certains modèles de têtes d'enfants, les calculs de DAS ([Wang, 2006], [Dimbylow, 2007], [Conil, 2008]) ont montré des dépassements à certaines fréquences (autour de 1 GHz) des restrictions de base de l'Icnirp (*cf*. chapitre 6). Ces travaux sur les modèles d'enfants se poursuivent avec l'utilisation de modèles déformables, de méthodes de *morphing*[32] adulte / enfant associées à des maillages volumiques adaptatifs.

L'évaluation du DAS sur des fœtus, ou tout au moins l'évaluation de la variabilité du DAS entre des modèles d'adultes et des modèles de femmes enceintes, est nécessaire compte tenu des configurations d'exposition liées aux nouveaux usages des équipements terminaux (téléphone situé dans une poche avec utilisation du kit oreillette, téléphone tenu devant soi pour la lecture / écriture de messages, *etc*.). Le projet FEMONUM (« *Fœtus and Mother Numerical Models* ») financé par la Fondation Santé et Radiofréquences a pour objectif de fournir en 2010 des modèles numériques de fœtus et de femme enceinte issus d'une large base de données d'examens d'imagerie médicale. Ces modèles permettront d'effectuer des simulations de dosimétrie précises sur l'anatomie évolutive, complexe et variable de la femme enceinte.

Les études et recherches en cours doivent permettre de mieux évaluer l'impact sur le DAS de la variabilité des différentes morphologies, de valider les modèles et méthodes de calcul utilisés, et surtout de vérifier le respect des restrictions de base pour ces modèles spécifiques (enfants, fœtus) pour l'ensemble des radiofréquences et, le cas échéant, de définir des méthodes de mesure adaptées.

3.4.1.2 Cas des émetteurs fixes

L'évaluation de la conformité des émetteurs radioélectriques fixes, liée à la protection des personnes vis-à-vis des champs électromagnétiques, est réalisée en deux étapes :

- Lors de la mise sur le marché

Le constructeur est tenu d'évaluer les limites de conformité en trois dimensions autour de l'équipement radioélectrique, dans sa configuration typique d'installation. Les normes harmonisées EN 50 585 [EN 50 385] et EN 50383 [EN 50 383] définissent les méthodes et protocoles à utiliser pour mesurer le DAS ou le champ électrique, les contraintes sur les équipements de mesure, les fantômes et les liquides équivalents en fonction des puissances appliquées. Il est possible de faire des mesures de DAS pour les équipements de petite taille et de faible puissance. Dans les autres cas, il est nécessaire d'évaluer par le calcul la répartition des champs électromagnétiques dans un volume situé au voisinage de l'antenne, lorsque celle-ci est installée dans des conditions d'espace libre. En effet, lors de la mise sur le marché, le fabriquant ne connaît pas *a priori* les conditions dans lesquelles l'équipement et l'antenne associée seront effectivement installés. Ces normes définissent aussi des critères sur la base desquels un équipement est déclaré conforme sans avoir besoin d'être testé.

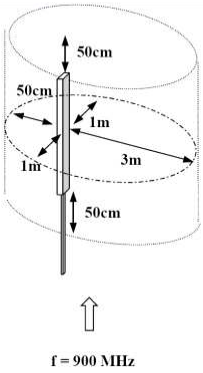
- Lors de la mise en service

Lorsque l'équipement radioélectrique et les antennes associées sont installés dans un environnement donné, les limites de conformité évaluées lors de la mise sur le marché peuvent devoir être modifiées compte tenu des conditions d'installation sur site : phénomènes de réflexion ou de diffraction sur des objets situés à proximité de l'antenne, influence d'autres sources radiofréquences. Ces procédures de vérification de la conformité des champs électromagnétiques rayonnés donnent lieu, dans certaines configurations, à l'établissement de périmètres de sécurité radioélectriques autour des émetteurs. Les normes harmonisées NF EN 50400 [NF EN 50400] et NF EN 50401 [NF EN 50401] concernent les conditions de mise en service des antennes de station de base. Elles définissent les contraintes sur les équipements de mesure, les méthodes et protocoles à utiliser pour

[32] modelage, déformation des fantômes d'adultes pour aboutir à des modèles d'enfants.

évaluer les champs électrique ou magnétique rayonnés, pour dimensionner les périmètres de sécurité radioélectrique autour des antennes mises en service et pour évaluer si les périmètres existants autour des antennes déjà installées doivent être modifiés.

Si la zone de champ proche est accessible, le périmètre de sécurité radioélectrique est matérialisé autour de l'émetteur (*cf*. Figure 14). Ces périmètres de sécurité garantissent le respect des restrictions de base et des niveaux de référence relatifs à l'exposition du public aux champs électromagnétiques (cf. chapitre 6, [Recommandation européenne], [Décret du 3 mai 2002]) ainsi que le respect de la réglementation liée à l'exposition des travailleurs en milieu professionnel [directive 2008/46/CE].



Périmètre de sécurité d'une antenne GSM de macro cellule sur terrasse

Balisage noir et jaune : chainette ou balisage au sol

Figure 14 : exemple de périmètres de sécurité radioélectrique autour d'antennes de station de base de téléphonie mobile installées sur des toits terrasses

Le dimensionnement de ces périmètres autour des stations de base de téléphonie mobile GSM fait l'objet de l'annexe technique de la circulaire du 16 octobre 2001 relative à l'implantation des antennes-relais de radiotéléphonie mobile [circulaire 16 octobre 2001][33]. Le guide technique de l'ANFR paru en février 2008 [ANFR périmètres] traite du dimensionnement des périmètres de sécurité de l'ensemble des émetteurs radioélectriques dans leurs différentes configurations d'utilisation : téléphonie mobile, radiodiffusion et télédiffusion, réseaux locaux, Wi-Fi, WiMAX, *etc*. Ce guide devrait, à terme, faire l'objet d'une nouvelle circulaire qui remplacerait celle du 16 octobre 2001.

Dans le cadre de la problématique de l'exposition des travailleurs en zone de champ proche, des travaux spécifiques aux émetteurs de radio FM et de télévision ont été menés [TDF FT 1] [TDF FT 2] : mesures de champ électrique et magnétique en zone de champ proche, simulations numériques dans des pylônes à proximité d'émetteurs de forte puissance, évaluation du DAS corps entier *in situ*. Ces travaux très intéressants sur le plan méthodologique et du point de vue des résultats ne concernent pas l'exposition du public, mais simplement des configurations d'exposition très spécifiques comme par exemple l'intervention de techniciens spécialisés dans les pylônes intégrant des émetteurs.

[33] Une nouvelle circulaire devrait paraitre en intégrant le guide technique de l'ANFR qui traite du dimensionnement des périmètres pour tous les émetteurs radioélectriques.

3.4.2 Connaissance actuelle de l'exposition en champ proche

3.4.2.1 Téléphonie mobile

Pour les téléphones mobiles, le DAS est utilisé pour quantifier le niveau d'exposition de la tête de l'utilisateur. La réglementation française sur les restrictions de base ([Décret du 3 mai 2002]) stipule que la valeur maximale du DAS intégré dans 10 g de tissus ne doit pas dépasser 2 W/kg (*cf.* paragraphes 6.1.2 et 6.1.3). L'arrêté du 8 octobre 2003 ([arrêté 08/10/03]) impose l'affichage du DAS dans la notice des téléphones mobiles, ainsi que l'affichage des précautions d'usage du téléphone au regard de l'exposition des utilisateurs aux champs électromagnétiques.

Les valeurs de DAS mesurés pour l'ensemble des téléphones mis sur le marché sont ainsi nécessairement inférieures à 2 W/kg, mais elles sont très variables d'un téléphone à l'autre – (*cf*. Tableau 6). Les différentes technologies, conceptions et intégrations utilisées ou l'emplacement de l'antenne dans le téléphone, font que le DAS maximal peut varier fortement suivant les modèles (de 0,05 W/kg à près de 1,8 W/kg). Compte tenu de la méthode normalisée de mesure, la valeur de DAS affichée rend compte d'une exposition maximale, ce qui permet de vérifier la conformité du téléphone dans le pire des cas d'exposition.

Donner des valeurs de champ électrique (en V/m) à proximité d'un téléphone mobile, comme on peut le faire pour des sources lointaines (antennes de stations de base) n'a pas réellement de sens. En effet, les champs varient très fortement dans la zone de champ proche, et les moyens de mesure classiques ne peuvent mesurer correctement les champs dans ces conditions. Néanmoins, en utilisant des modèles numériques d'antennes simples, il est possible de calculer ces valeurs de champs électriques, aussi bien dans un modèle de tête, que dans l'air à proximité [Dimbylow *et al.* 1994]. A quelques centimètres de l'antenne d'un modèle de téléphone mobile, on peut calculer l'intensité du champ électrique, pour une puissance moyenne maximale émise de 250 mW, à environ 50 V/m. Dans un modèle de tête, un partie seulement de l'énergie fournie par le téléphone est absorbée, on peut alors estimer la valeur de champ électrique maximale à une distance de quelques millimètres dans la tête à une quinzaine de Volts par mètre.

Tableau 6 : exemples de valeurs de DAS de téléphones mobiles

DAS de téléphones mobiles, en W/kg *- données constructeurs -*	
AlcatelOT-E221	1,4
DoroHandlePlus 324 gsm	1,8
LG KG800 Chocolate	0,084
LG KU 380	1,51
LG S5200	0,117
NokiaE51	1,4
Sony Ericsson K770i Cyber-shot	1,69
Sony Ericsson T650i	1,8
Sony Ericsson V600i	1,62
Sony Ericsson W880i	1,45
Sony Ericsson W890i	1,38
Sony Ericsson W950i	1,35
Samsung SGH-Z560	0,102

Cet échantillonnage de modèles a été choisi pour sa représentativité en termes d'étendue des valeurs de DAS. Les mesures sont réalisées selon la norme EN62209-1 : le DAS est évalué à partir de mesures de champ électrique réalisées dans un fantôme à proximité du téléphone (cf. 3.4.1.1).

3.4.2.2 Autres émetteurs radioélectriques

Les mesures de DAS pour les autres équipements terminaux que les téléphones mobiles sont en cours de normalisation ([EN 62209-2], *cf*. 3.4.1.1). Il y a actuellement peu de résultats de mesures disponibles sur ces équipements.

- **Réseaux WLan (Wi-Fi)**

L'étude spécifique sur les émetteurs Wi-Fi réalisée pour l'Arcep par le laboratoire d'électromagnétisme de Supélec ([Supélec – Wi-Fi, 2006]) montre que, dans des conditions d'utilisation spécifiques (matériel posé sur les genoux de l'utilisateur par exemple), les mesures de DAS effectuées sur huit modèles différents de cartes Wi-Fi donnent des valeurs inférieures à 0,2 W/kg (DAS maximum sur 10 g), soit 10 fois moins que la valeur limite réglementaire de 2 W/kg.

Le Tableau 7 reprend des résultats de mesure de DAS d'émetteurs Wi-Fi (carte PC et points d'accès) issues des travaux de Supélec [Supélec – Wi-Fi, 2006], de mesures effectuées par l'ANFR, et de mesures réalisées par l'Office fédéral de santé publique suisse (OFSP) [Kühn, 2006].

Tableau 7 : exemples de valeurs de DAS (en W/kg) d'émetteurs Wi-Fi ([Kühn, 2006], [Supélec – Wi-Fi, 2006], ANFR)

Carte Wi-Fi PC à 2.45 GHz *- source Supélec -*	
3Com 3CRPAG175	0,023
Cisco Air-PCM 350 Series	0,083
DLink Air plus DWL-G650	0,017
Linksys WPC546	0,049
Hercules HWGPCMCIA-54	0,048
NetGear WG511	0,192
Trend Net TEW-PC16	0,109
PC Acer Aspire 1693 WLMI	0,022

Point d'accès Wi-Fi *- source ANFR -*		
	2,45 GHz	5,2 GHz
Antenne plafond	0,06	0,83
Antenne murale	0,41	0,9
Antenne cierge	0,08	0,3

Point d'accès et cartes Wi-Fi *- source OFSP -*		
	2,45 GHz	5,2 GHz
Point d'accès (débit : 30 Mb/s)		0,54
Carte PC (debit : 13,3 Mb/s)		0,07
Point d'accès (débit : 6 Mb/s)	0,73	
Carte PC (debit : 6,3 Mb/s)	0,43	

- **Interphones bébé**

Les interphones ou veille bébés qui permettent de surveiller un bébé à distance, sont des émetteurs / récepteurs radiofréquences fréquemment utilisés. Il existe pour ces systèmes de nombreuses technologies et modèles : différentes fréquences d'émission dans les bandes ISM (27 MHz, 446 MHz, 865 MHz, 2 400 MHz), différentes puissances d'émission et portées. La majorité des interphones bébé sont des appareils unidirectionnels : le module bébé ne peut qu'émettre, et celui destiné aux parents que recevoir. La plupart des interphones bébé n'émettent pas en continu, mais uniquement lorsqu'un certain niveau sonore est atteint. Si l'appareil est doté d'une fonction de contrôle de la portée, le module « bébé » émet toutes les deux ou trois secondes un signal permettant au module « parents » de vérifier qu'il se trouve encore à portée de réception. Certains appareils permettent également de surveiller les enfants par vidéo et doivent donc émettre en permanence.

Des mesures de DAS on été réalisés par l'OFSP [Kramer, 2005] sur deux interphones bébé avec des puissances maximales d'émission différentes. Les résultats sont donnés dans le Tableau 8. Il faut noter que l'exposition en champ proche correspondrait à une situation où l'appareil serait placé tout contre le bébé. Les configurations d'utilisation réelle correspondent plutôt à une exposition en champ lointain, lorsque l'appareil est placé dans la chambre, à proximité du lit. Des résultats de mesures de niveau de champ électrique sont donnés dans le chapitre 3.5.2.

Tableau 8 : exemples de valeurs de DAS d'interphones bébé - source OFSP [Kramer, 2005]

Appareil	Fréquence d'émission	Puissance d'émission maximale	Valeur de DAS mesurée
Interphone bébé n°1	863 MHz	10 mW	0,01 W/kg
Interphone bébé n°2	446 MHz	500 mW	0,08 W/kg

- **Téléphones sans fil DECT**

Compte tenu de la faible puissance d'émission des téléphones DECT, les mesures de DAS ne sont pas nécessaires puisque, par construction, ils sont conformes à la réglementation (*cf*. paragraphe 3.4.1). Il existe donc peu de résultats de mesures de DAS. Dans l'étude [Kramer, 2005] réalisée pour l'OFSP, les valeurs mesurées du DAS de plusieurs combinés de téléphones DECT sont comprises entre 0,01 et 0,05 W/kg.

- **Clé USB 3G**

Les mesures de DAS des clés USB 3G qui sont données par les constructeurs donnent des résultats équivalents aux DAS mesurés des téléphones mobiles qui fonctionnent en UMTS : le DAS est compris entre 0,1 et 1,8 W/kg[34]. Là aussi, le DAS peut être un indicateur dans le choix d'un modèle. En 2008, une clé 3G « atypique » a été retirée du marché par un industriel suite à un contrôle de l'ANFR : la valeur de DAS mesurée par l'ANFR dans une configuration d'utilisation autre que celles prévues par l'industriel était supérieure à 2 W/kg.

- **Systèmes *Bluetooth***

Dans l'étude [Kühn, 2006] réalisée pour l'OFSP, des mesures de DAS de différents équipements *Bluetooth* ont été réalisées. Les valeurs mesurées, illustrées dans le Tableau 9, sont toutes très inférieures à la valeur limite de 2 W/kg.

Tableau 9 : exemples de valeurs de DAS d'équipements Bluetooth ([Kühn, 2006])

	Puissance d'émission maximale	Portée maximale	Valeur de DAS mesurée
Clé USB avec émetteur *Bluetooth* n°1	100 mW (classe 1)	100 m	0,47 W/kg
Clé USB avec émetteur *Bluetooth* n°2	2,5 mW (classe 2)	40 m	0,01 W/kg
Agenda électronique (PDA)	2,5 mW (classe 2)	40 m	0,01 W/kg
Kit main libre pour téléphone mobile	1 mW (classe 3)	10 m	0,001 à 0,003 W/kg

[34] La norme CEI 62209-2 encadre ces mesures avec notamment l'utilisation comme fantôme d'une cuve rectangulaire (*cf*. page 55, figure 14). Les conditions de mesure correspondent au pire cas, c'est à dire lorsque l'équipement peut être très près du corps (ce qui est possible avec un interphone bébé ou une clé 3G lorsque le PC est sur les genoux, par exemple).

L'adoption de la norme EN 62209-2 prévue en 2010 permettra de considérer l'ensemble des émetteurs et des configurations d'utilisation. Il conviendra alors de réfléchir à l'extension de l'obligation d'affichage du DAS à d'autres équipements que les téléphones mobiles.

3.4.2.3 Cas spécifique des applications industrielles et équipements domestiques

Il existe de nombreuses applications industrielles et médicales qui utilisent des technologies radiofréquences (bandes de fréquences ISM, *cf*. Tableau 1). Elles ne concernent pas directement l'exposition du public mais des situations très particulières et localisées d'exposition professionnelle. Ces applications sont abordées dans le paragraphe 4.2 qui traite de l'analyse des études biologiques, cliniques et épidémiologiques dans la bande de fréquences 9 kHz – 10 MHz.

- **Ecrans cathodiques de télévision et d'ordinateurs (VDU, VDT)**

Bien que les technologies « à écran plat » supplantent progressivement les écrans cathodiques, un grand nombre de ces écrans reste encore en service. Le principe de fonctionnement d'un écran cathodique repose sur le balayage de l'écran par un faisceau d'électrons. Ce balayage est produit par un champ magnétique alternatif à une fréquence située entre 15 et 25 kHz, avec des harmoniques de plus faibles intensités jusqu'à 125 kHz. Ces écrans génèrent différents types de champs électromagnétiques : champs électrostatiques, champs électromagnétiques très basses fréquences liés à la fréquence d'alimentation de l'écran et des champs magnétiques aux fréquences intermédiaires[35] liés au balayage et à la présence de charges électriques accumulées sur l'écran. L'intensité maximale des champs magnétiques mesurée à environ 30 cm d'un écran sont de l'ordre de 0,05 A/m.

- **Plaques de cuisson à induction**

Le fonctionnement des plaques de cuisson à induction repose sur la génération par une bobine d'un champ électromagnétique à des fréquences comprises entre 20 et 50 kHz. Selon la synthèse de De Séze [De Séze, 2006], des calculs numériques indiquent que les niveaux locaux de courants induits, à hauteur des mains par exemple, pourraient dépasser les valeurs limites d'exposition. On retrouve des résultats équivalents dans la revue de Litvak [Litvak, 2002] qui mesure des intensités de champ magnétique à proximité des plaques à induction de l'ordre de 0,7 à 1,6 A/m (à 30 cm) et jusqu'à 25 A/m à la surface de la bobine.

- **Autres applications**

Deux technologies ne sont pas traitées dans ce rapport, car elles ont donné lieu à deux rapports récents de l'Afsset :

- les RFID, systèmes d'identification par radiofréquences, qui utilisent différentes bandes de fréquences (principalement autour de 125 kHz, 13,56 MHz, 400 MHz, 860 MHz, 2,45 GHz et 5,6 GHz) [Afsset RFID 2009].
- les lampes fluo compactes dont le ballast électronique émet un rayonnement de champs électromagnétiques dans la bande 10 kHz - 10 MHz. Le rapport de l'Afsset[36] sur cette thématique publié en février 2009 propose un protocole pour réaliser une campagne de mesure des champs émis par les lampes fluocompactes [Afsset LFC 2009]. A la date de publication de ce rapport, on ne connaît pas encore les résultats de cette campagne de mesure. De précédentes mesures réalisées par l'OFSP suisse n'ont pas mis en évidence de niveaux de champs émis importants [OFSP, 2004].

[35] Fréquences intermédiaires (FI) : terminologie fréquemment utilisée pour désigner la partie basse des radiofréquences (de 9 kHz à quelques MHz)

[36] À la demande de l'Ademe.

3.5 Exposition du public en champ lointain

Cette situation d'exposition en « champ lointain » représente le cas général de l'exposition du public aux émetteurs fixes que sont les stations de base de téléphonie mobile, les émetteurs de radio et télédiffusion, les bornes d'accès Wi-Fi, *etc*.

Il est difficile de connaître l'exposition du public en un endroit donné à partir de la simple connaissance de la position des émetteurs et de leur puissance. Il faut intégrer l'ensemble des paramètres qui interviennent dans la propagation : puissance et diagramme de rayonnement de chaque émetteur, type de signal émis (continu, modulé), obstacles présents (réflexion et diffraction des ondes électromagnétiques).

L'évaluation de l'exposition du public peut se faire de façon complémentaire par des méthodes de simulation numériques ou par des mesures *in situ*.

3.5.1 Métrologie

L'évaluation de l'exposition en champ lointain consiste à mesurer l'intensité des champs électrique et magnétique en un point donné, à distance des sources. Compte tenu de la relation qui existe en champ lointain entre ces deux intensités (Figure 12), il suffit en pratique de ne mesurer qu'une des composantes : soit le champ électrique, soit le champ magnétique.

Cette mesure d'exposition peut se faire selon deux approches :

- Mesure globale pour une large bande de fréquence

  Dans ce cas une sonde de détection isotrope large bande (« champmètre ») est utilisée. Le résultat de la mesure est un niveau de champ électrique ou magnétique cumulé sur l'ensemble des fréquences qui sont prises en compte par la sonde de mesure. Il correspond donc au niveau d'exposition lié à l'ensemble des sources d'émission présentes dans la bande de fréquence considérée.

  Un telle mesure permet :

  - de quantifier l'exposition globale en un point donné dans la bande de sensibilité de l'appareil de mesure,
  - de comparer le résultat par rapport à la valeur limite d'exposition la plus faible dans la bande de fréquence considérée.

  Cependant, cette mesure en général assez peu précise ne permet pas de connaître la répartition de l'exposition entre les différents émetteurs présents à proximité du point de mesure. D'une manière générale, ce type d'appareil, sauf modèle spécifique plus sensible, est adapté pour les mesures de champ fort, et non pas pour des mesures de champs faibles tels que les rencontre le public.

- Mesure sélective en fréquence

  Dans le cas de mesures sélectives en fréquence, le niveau d'exposition est évalué pour chaque type d'émetteurs : radiodiffusion, téléphonie GSM 900, GSM 1800, UMTS, *etc*.

  L'intérêt de ces mesures est de connaître la répartition du niveau d'exposition entre les différents émetteurs (services), mais surtout, elles permettent de prendre en compte les caractéristiques de chaque contributeur (évolution temporelle du signal, type de modulation utilisée) et donc d'avoir une estimation plus précise du niveau d'exposition par service. Pour ce type de mesure, le matériel utilisé est très coûteux et beaucoup plus complexe à utiliser comparé aux sondes de mesure large bande. Il s'agit d'analyseurs de spectre, de décodeurs spécifiques associés à des sondes de mesure ou des antennes calibrées en fonction de la bande de fréquence étudiée.

Il existe aussi des équipements de mesure plus simples d'utilisation basés sur le filtrage fréquentiel du signal mesuré en large bande et qui donnent des niveaux d'exposition pour chaque type d'émetteurs. C'est le cas des « exposimètres » (appelés aussi improprement

« dosimètres ») portables ou des stations de mesures fixes qui permettent la mesure en temps réel et en continu du niveau d'exposition par service.

Mesures spectrales - sonde large bande - dosimètres portables – stations de mesure fixes

Figure 15 : équipements de mesure des champs électromagnétiques - sources constructeurs

En France, depuis 2001, un protocole de mesure complet [ANFR- protocole], établi par l'ANFR, encadre la mesure des champs électromagnétiques *in situ*. Il permet de vérifier le respect des valeurs limites d'exposition et au-delà, d'évaluer l'exposition pour l'ensemble des émetteurs radiofréquences fixes qui émettent à des fréquences comprises entre 100 kHz et 3 GHz. Ce protocole utilise conjointement des mesures large bande et des mesures sélectives dans des bandes de fréquences définies (*cf*. Tableau 10(.

Tableau 10 : bandes de fréquences de mesure selon le protocole de l'ANFR (DR15-v2.1)

Services	Bande de fréquences
Services HF[37]	100 kHz – 30 MHz
PMR	30 – 87,5 MHz
Radiodiffusion FM	87,5 – 108 MHz
PMR, balises	108 – 880 MHz hors TV
Télédiffusion	47 – 68 MHz, 174 – 223 MHz et 470 – 830 MHz
GSM 900	880 – 960 MHz
Radars, DAB	960 – 1 710 MHz
GSM 1800	1 710 – 1 880 MHz
DECT	1 880 – 1 900 MHz
UMTS	1 900 – 2 200 MHz
Radars, BLR, FH	2 200 – 3 000 MHz

L'exposition liée aux antennes de stations de base de téléphonie mobile varie en fonction du nombre de communications prises en charge. Pour avoir des résultats de mesures comparables et reproductibles, le protocole de mesure de l'ANFR réalise une extrapolation des résultats pour une situation de trafic maximum[38], et donne donc les niveaux de champs engendrés par les stations de base GSM et UMTS lorsqu'elles émettent à la puissance maximale théorique de l'émetteur. Plus généralement, ce protocole, dont le but initial est de vérifier la conformité à la réglementation (respect des valeurs limites d'exposition, donne des valeurs maximales des niveaux d'exposition.

[37] Les acronymes utilisés dans le tableau sont définis dans la section « abréviations » au début du rapport.

[38] C'est-à-dire dans le cas peu fréquent où tous les canaux disponibles de la station émettrice sont utilisés simultanément.

Les organismes de contrôle qui réalisent ces mesures interviennent dans un cadre réglementaire[39] ([décret n° 2006-61] du 18 janvier 2006, [arrêté du 4 août 2006]). Ces organismes doivent notamment être accrédités par le COFRAC (comité français d'accréditation) pour la réalisation de mesures de champs électromagnétiques *in situ* selon le protocole de l'ANFR et en accord avec la norme NF EN ISO/CEI 17025 [NF EN ISO/CEI 17025].

Des évolutions du protocole de mesure sont prévues d'ici fin 2009, afin notamment de prendre en compte la norme européenne EN 50492 du CENELEC de mesure du champ électromagnétique sur site [EN 50492]. Ces évolutions concernent principalement l'élargissement de la bande de fréquences mesurée à 100 kHz – 6 GHz (au lieu de 3 GHz actuellement pour la borne supérieure) et l'apport d'une base réglementaire et technique pour l'évaluation de la conformité du niveau d'exposition du public à partir d'une simple mesure au moyen d'une sonde large bande.

D'autres procédures de mesure de champs électromagnétiques *in situ* sont utilisées et proposées par certaines associations dans le cadre de mesures d'expertise contradictoire auprès de riverains d'émetteurs ou de collectivités locales. En l'absence de référencement et de documentation, ces procédures n'ont pu être discutées dans le présent rapport.

Mesure des champs électromagnétiques *in situ*

La mesure des champs électromagnétiques et l'analyse d'un résultat de mesure nécessitent un niveau d'expertise important en métrologie et en physique, et doivent être réalisées par des spécialistes du domaine.

Avant toute analyse d'un résultat de mesure, il est indispensable de connaître la validité de ce résultat et de savoir ce qui a été effectivement mesuré. Il faut notamment :

- connaître les caractéristiques exactes de l'appareil utilisé : bande de fréquences de mesure, seuil de sensibilité, dynamique, sélectivité fréquentielle. Il est de plus indispensable de s'assurer de l'étalonnage régulier des équipements utilisés, ce qui permet d'éviter toute dérive dans les résultats de mesure.
- connaître le type de mesure réalisé : quelle est la bande de fréquence d'analyse, quels sont les paramètres de filtrage utilisé et sont-ils adaptés au type de signal, quelle est la durée de la mesure et quelle est la valeur relevée (*maximum*, moyenne, *etc*.) ?
- connaître les conditions de mesure : une mesure de champ électrique en zone de champ proche d'un émetteur n'est par exemple pas valable.
- maîtriser et connaître les incertitudes de la mesure qui sont liées aux équipements utilisés, à la procédure de mesure et à la répartition spatiale du signal mesuré.

3.5.2 Connaissance actuelle de l'exposition du public en champ lointain

- **Mesures selon le protocole ANFR**

[39] L'arrêté du 4 août 2006 précise que « ces mesures sont réalisées par un organisme répondant aux exigences de qualité prévues aux articles D. 100 et D. 101 du code des postes et des communications électroniques, selon les modalités techniques définies par l'arrêté du 3 novembre 2003 […].

L'ensemble des mesures de champs électromagnétiques *in situ* réalisées selon le protocole de l'ANFR constitue une base de données très importante pour connaître et évaluer l'exposition du public. L'ANFR dispose de plus de 13 000 relevés de mesures réalisées depuis 2001 sur l'ensemble du territoire français. Environ 2 500 mesures par an viennent compléter ces données.

Ces mesures sont réalisées à la demande de collectivités locales, de riverains d'émetteurs ou d'associations, essentiellement dans le cadre du guide des relations entre opérateurs et communes [Guide AMF AFOM]. Elles ont lieu en intérieur et en extérieur, dans tout lieu accessible au public : appartement, rue, école, balcon, terrasse, *etc*.

Tous les résultats de mesure sont publiés par l'ANFR sur le site internet www.cartoradio.fr et l'agence réalise régulièrement des synthèses sur l'ensemble de ces mesures[40].

La Figure 16 est un exemple de fiche de présentation de résultats de mesure issue de la base de données « cartoradio ». On y trouve la description du point de mesure, les contributions mesurées pour l'ensemble des services et le niveau de champ électrique cumulé dans la bande de fréquences 100 kHz – 3 GHz. Ces résultats intègrent l'extrapolation au trafic maximal pour les réseaux de téléphonie mobile.

Il faut noter que la mesure réalisée selon le protocole de l'ANFR permet d'identifier l'ensemble des contributions des émetteurs radiofréquences dans la bande de fréquences 100 kHz – 3 GHz (radio et télédiffusion, téléphonie mobile, réseaux indépendants, DECT, *etc*.). Cependant, la motivation initiale pour la réalisation d'une mesure est généralement liée à la présence d'antennes de station de base de téléphonie mobile. Ainsi, la majorité des points de mesures est située dans l'environnement proche d'antennes de stations de base de téléphonie mobile. Cela introduit un biais dans l'analyse statistique de l'ensemble des résultats de mesure ; les synthèses qui en sont faites ne sont donc pas statistiquement représentatives du niveau moyen d'exposition du public sur l'ensemble du territoire.

La dernière synthèse qui a été publiée en 2007 porte sur les mesures réalisées entre 2004 et 2007. Elle est disponible sur le site internet de l'ANFR et donne pour l'essentiel les résultats suivants :

97 % des résultats de mesures sont inférieurs à 10 % des valeurs limites d'exposition (*)

75 % des résultats de mesures n'atteignent pas 2 % des valeurs limites d'exposition(*)

(*) La valeur limite la plus basse sur la bande de fréquences 100 kHz – 3 GHz est de 28 V/ m

Dans 5 % des cas, soit environ 20 mesures sur les 2 500 annuelles, des niveaux d'exposition significativement plus élevés que le niveau moyen[41] observé sont mesurés (*i.e.* exposition globale supérieure à 5 V/m). Cela donne lieu à un traitement particulier du dossier par l'ANFR, et une modification du site d'émission concerné est demandée à l'opérateur afin de diminuer le niveau d'exposition.

La Figure 17 montre la répartition des niveaux de champ électrique cumulé sur la bande 100 kHz – 3 GHz mesurés selon le protocole ANFR entre 2006 et 2008. Globalement, que ce soit en intérieur ou en extérieur, 80% des niveaux mesurés sont inférieurs à 2 V/m.

[40] La dernière synthèse date de 2007 : http://www.anfr.fr/pages/sante/synthese07.pdf

[41] *Par exemple, la moyenne pour le GSM 900 sur l'ensemble des mesures intérieures enregistrées entre 2004 et 2007 est de 0,70 V/m.*

Lieu : TOULOUSE (31) Référence du point de mesure : 15 075

Date de la mesure : 12/12/2008

Situation et caractéristiques du point de mesure

Localisation précise du point de mesure	Caractéristiques du point de mesure
N° : [redacted] Rue : [redacted]	Mesure effectuée à l'extérieur
Place/Autre :	Type d'environnement : Terrasse
Code postal : 31300	Latitude : [redacted] N
Ville : TOULOUSE	Longitude : [redacted] E

Informations sur l'emplacement du point de mesure

Emetteurs visibles

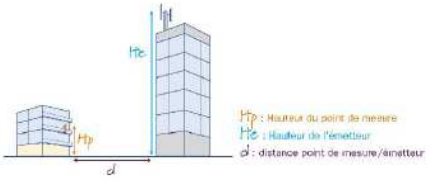
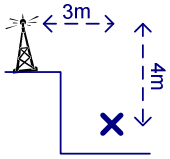


Schéma type : dans certains cas, Hp est supérieur ou égal à He

Emetteurs	Hp	He	d
GSM/UMTS OUTDOOR	43 m	47 m	3 m

Distance par rapport à l'émetteur visible le plus proche



Synthèse des résultats

Valeur limite respectée		Le champ Electrique total du site Etotal est
Par fréquence :	Oui	15,5 fois plus petit que la valeur limite la plus faible.
Par l'ensemble des émetteurs :	Oui	

Synthèse des résultats par rapport à la réglementation

Résultats des mesures réalisées à l'analyseur de spectre

Relevé des mesures réalisées sur toutes les fréquences dont le niveau est supérieur au 1/1000ème de la valeur limite fixée par le décret du 3 mai 2002

Fréquence (en MHz)	Service	Ei= Champ électrique efficace moyen (en V/m)	Valeur limite (en V/m)	Niveau du Champ Electrique mesuré par rapport à la valeur limite fixée par le décret du 3 mai 2002
0,9400	HF	0,1528	87,00	570 fois inférieur
24,4100	HF	0,0091	28,00	3067 fois inférieur
74,1000	PMR	0,0230	28,00	1218 fois inférieur
77,9000	PMR	0,0222	28,00	1259 fois inférieur
96,2000	FM	0,1797	28,00	156 fois inférieur
99,1000	FM	0,1778	28,00	157 fois inférieur
466,2000	PMR Balises	0,0632	29,69	470 fois inférieur
466,6000	PMR Balises	0,0093	29,70	3197 fois inférieur
575,2000	TV	0,0614	32,98	537 fois inférieur
599,3000	TV	0,0896	33,66	376 fois inférieur
948,4000	GSM 900	0,1481	42,34	286 fois inférieur
953,0000	GSM 900	0,2087	42,45	203 fois inférieur
1 668,0000	Radars DAB	0,0079	56,16	7143 fois inférieur
1 706,0000	Radars DAB	0,0084	56,79	6789 fois inférieur
1 848,2000	GSM 1800	1,4373	59,11	41 fois inférieur
1 868,8000	GSM 1900	0,3385	59,44	176 fois inférieur
1 882,2000	DECT	0,0045	59,65	13141 fois inférieur
1 889,8000	DECT	0,0048	59,77	12460 fois inférieur
2 112,8000	UMTS	0,7354	61,00	83 fois inférieur
2 117,8000	UMTS	0,6281	61,00	97 fois inférieur
2 959,0000	Radars BLR-FH	0,0366	61,00	1667 fois inférieur
2 989,0000	Radars BLR-FH	0,0364	61,00	1674 fois inférieur
Champ Electrique total du site $E_{Total} = \sqrt{\sum E_i^2}$ =		1,8133 V/m	28,00 V/m	est la valeur limite la plus faible fixée par le décret du 3 mai 2002

Synthèse des résultats de l'analyse spectrale

En **radiodiffusion FM**, les principaux émetteurs sont :
→ 95.2 MHz (Le Mouv')
qui rayonne 0.18 V/m au point de mesure
→ 99.1MHz (RFM Toulouse)
qui rayonne 0.18 V/m au point de mesure

Principales antennes en **GSM 1800** :
→ Antenne avec la voie balise 1848.2 MHz
Champ extrapolé au trafic maximal : 1.44V/m
→ Antenne avec la voie balise 1868.8 MHz
Champ extrapolé au trafic maximal : 0.34 V/m

Au point de mesure, l'intensité de champ électrique cumulé vaut 1.81 V/m

Figure 16 : exemple de résultat de mesure selon le protocole de l'ANFR

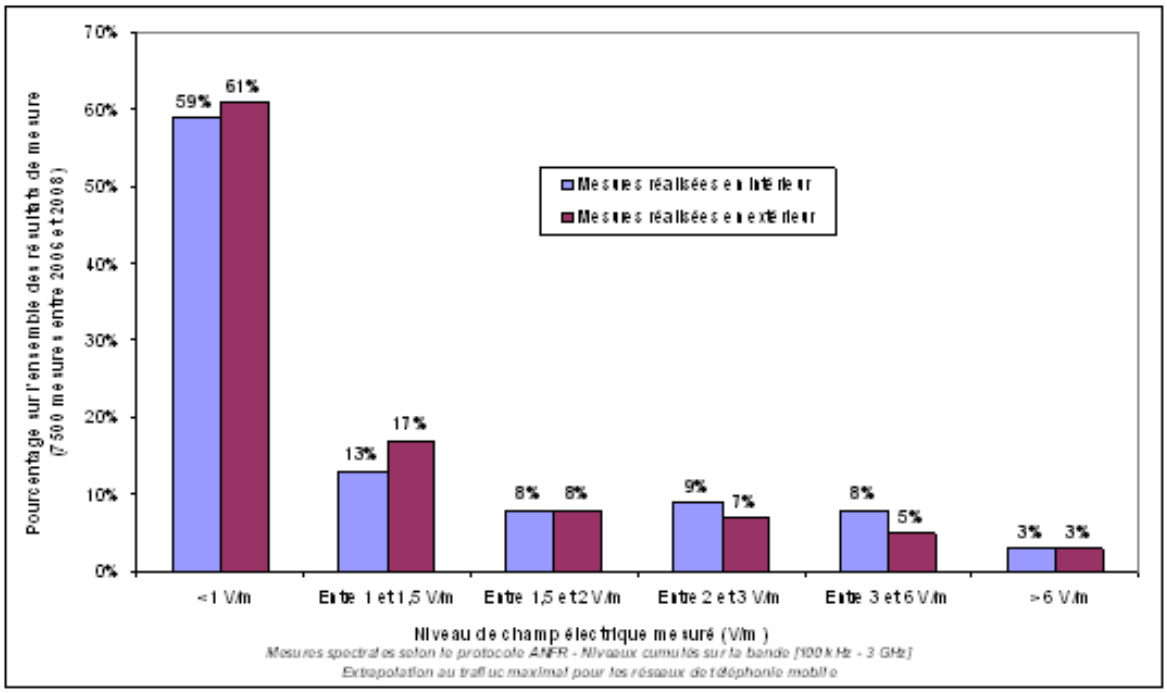


Figure 17 : distribution des résultats de mesures selon le protocole ANFR réalisées entre 2006 et 2008 (source ANFR)

- **Réseaux de téléphonie mobile**

La Figure 18 montre des résultats de simulations, réalisées par l'ANFR, de niveaux de champ électrique à proximité d'un pylône de station de base de téléphonie mobile. La configuration choisie est un pylône en milieu rural. Les antennes sont situées à 30 mètres de hauteur et il y a peu d'obstacles à la propagation autour du pylône. Cet exemple illustre l'importance de la prise en compte du diagramme de rayonnement (gain) de l'antenne et de l'analyse du site (hauteur et orientation des antennes, présence d'obstacles, *etc*.) pour une évaluation précise de l'exposition autour d'une antenne donnée.

Ainsi, dans le cas présenté sur la Figure 18, on constate une remontée du niveau de champ électrique au niveau du sol, à une distance d'environ 250 mètres du pylône, dans la zone ou le faisceau d'émission principal de l'antenne de station de base « touche » le sol. Néanmoins, la variation du niveau de champ reste limitée car les influences respectives des diagrammes de rayonnement, des gains d'antenne et de l'affaiblissement de la propagation de l'onde se compensent partiellement.

Cet exemple ne traite que du rayonnement de l'antenne de station de base. Une analyse complète de l'exposition du public nécessiterait de prendre en compte aussi l'émission d'un téléphone mobile en cours de communication, et dont la puissance émise va augmenter au fur et à mesure qu'il s'éloigne de l'antenne de station de base.

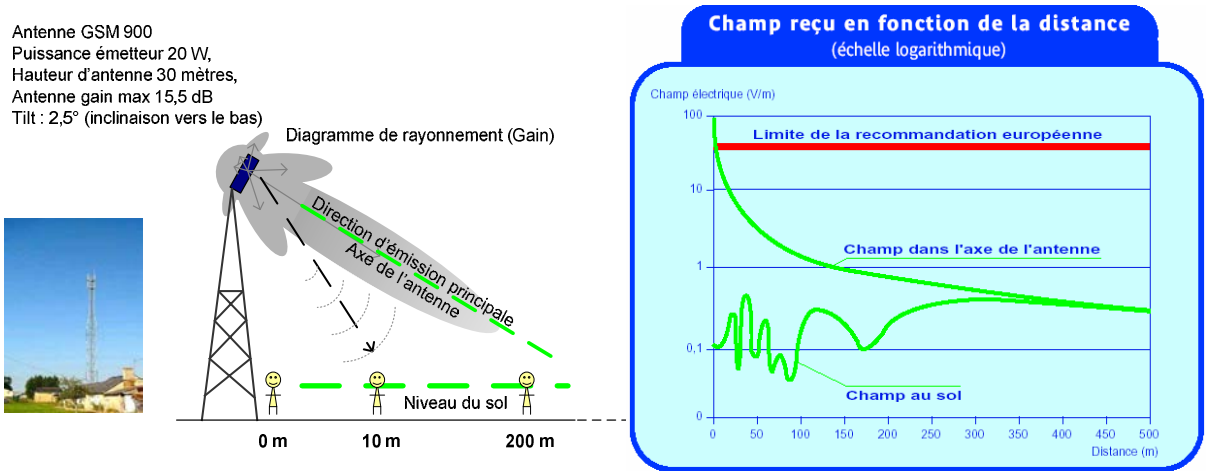


Figure 18 : exemple de mesure de champ électrique autour d'un pylône de station de base de téléphonie mobile (source ANFR)

Quelques repères sur l'exposition du public liée aux antennes relais et aux téléphones mobiles

L'évaluation de l'exposition du public aux réseaux de téléphonie mobile doit prendre en compte l'ensemble des paramètres liés à la technologie des réseaux cellulaires GSM et UMTS :

Les antennes panneaux sont directionnelles

Les niveaux de champs électrique et magnétique en un point donné dépendent de la hauteur, des orientations et des diagrammes de rayonnement des antennes présentes et de l'emplacement de ce point par rapport aux antennes. Ainsi, en absence d'obstacle, les niveaux de champs électromagnétiques sont plus faibles sous une antenne ou au pied du pylône qu'à une certaine distance pour laquelle on se situe dans le faisceau principal de l'antenne.

Les niveaux de champs électromagnétiques émis par une antenne ou par un téléphone mobile varient fortement dans le temps : cela est dû aux variations des puissances d'émission en fonction du trafic sur le réseau (nombre de communications simultanées), au contrôle de puissance au niveau de la station de base et du téléphone et au déplacement du téléphone (changement de cellule au cours d'une communication - *handover*).

Exposition au téléphone mobile vs aux antennes-relais

Un téléphone mobile GSM avec une qualité réseau standard fonctionne, en phase de communication établie et en moyenne, à environ 50 % de sa puissance maximale d'émission [Vreijheid 2009], même si la puissance émise par le téléphone peut varier entre le niveau *maximum* et 1 millième de ce niveau. Pour un téléphone de DAS *maximum* standard (0,5 W/kg), cela correspondrait à une exposition moyenne de l'ordre de 0,25 W/kg, soit 12,5 % des restrictions de base, pour la tête. Dans le cas des téléphones fonctionnant en mode UMTS, le contrôle de puissance est meilleur que pour le protocole GSM (plus rapide notamment). L'exposition moyenne correspondrait alors plutôt à 0,01 W/kg, soit 0,5 % des restrictions de base.

Pour une antenne relais de type GSM 900, en se basant sur les résultats de mesure de l'ANFR – période 2004 - 2007, on peut exprimer un niveau moyen d'exposition pour les mesures effectuées à proximité des antennes-relais de 0,7 V/m. Ce niveau correspond, en puissance, à 0,03 % des valeurs limites réglementaires, pour le corps entier.

Cette différence entre les niveaux d'exposition s'explique par la proximité de l'utilisateur avec le téléphone mobile. Pour obtenir une exposition de la tête avec une antenne-relais similaire à celle provoquée par le téléphone mobile, il faudrait s'approcher à quelques mètres à peine de celle-ci.

Impact de la modification de l'architecture des réseaux sur l'exposition

L'architecture cellulaire des réseaux de téléphonie mobile repose sur un équilibre des puissances émises par les antennes-relais et par les téléphones mobiles : ce fonctionnement nécessite que le niveau et la qualité du signal émis par une antenne relais et reçu par un téléphone soient suffisants, mais aussi que le niveau et la qualité du signal émis par le téléphone et reçu par l'antenne soient également suffisants. De plus, les émissions d'une antenne relais ne doivent pas être trop puissantes pour ne pas perturber les émissions des antennes-relais des cellules du réseau qui réutilisent les mêmes fréquences.

Ainsi, toute modification de l'architecture du réseau cellulaire a des conséquences sur le fonctionnement de l'ensemble du système. Par exemple, l'augmentation de la taille des cellules (pour éloigner les antennes-relais des zones habitées ou de zones « sensibles ») conduirait à une augmentation de la puissance d'émission de ces antennes et des téléphones pour les utilisateurs situés loin de l'antenne.

A contrario, la diminution de la taille des cellules, et donc la multiplication du nombre de stations de base, conduirait à une diminution de la puissance maximale émise par les antennes-relais, mais également à une augmentation des puissances moyennes émises par les téléphones en déplacement, due aux changements plus fréquents de cellule au cours de la communication (*handover*). Il conviendrait d'étudier précisément dans quelle mesure le niveau global d'exposition de la population serait diminué par une telle mesure (contribution des antennes-relais). Cette hypothèse de réduction d'un niveau faible au départ, mais qui concerne une grande partie de la population, et de manière quasi permanente, est à comparer avec la certitude de l'augmentation d'un niveau d'exposition beaucoup plus important, mais ponctuel, lié à l'utilisation des téléphones mobiles.

- **Hypothèses de rayonnement basses fréquences des antennes de station de base de téléphonie mobile GSM**

A la demande des experts du groupe de travail, une campagne de mesure des niveaux de champs électromagnétiques basses fréquences émis par les antennes de station de base de téléphonie mobile GSM a été réalisée par le laboratoire d'électromagnétisme de Supélec. Elle a consisté en des mesures de niveaux de champs électrique et magnétique pour les fréquences situées entre 5 Hz et 32 kHz, à proximité de deux stations de base identifiées. Le rapport de cette campagne de mesure est présenté en annexe 3.1. Les antennes des stations de base de téléphonie mobile et les antennes des téléphones mobiles sont conçues pour émettre dans le domaine des radiofréquences (900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz). Compte tenu de leurs dimensions, elles ne sont pas conçues pour émettre des rayonnements extrêmement basse fréquence, autour de quelques dizaines de Hertz. En effet, les longueurs d'onde des signaux GSM à 900 MHz (environ 30 cm) par exemple n'ont rien de commun avec les longueurs d'ondes des signaux basses fréquences autour de 200 Hz par exemple (1 500 km). L'efficacité de rayonnement d'une antenne, c'est-à-dire sa capacité à transformer l'énergie électrique qui lui est fournie en rayonnement, est en effet proportionnelle au rapport de sa plus grande dimension (quelques dizaines de cm) à la longueur d'onde émise. En conséquence, des signaux à basse fréquence ne pourraient donc être transmis par ces antennes.

Les seuls champs électromagnétiques basses fréquences mesurables à proximité des antennes de station de base et des téléphones mobiles sont ceux induits par leur alimentation électrique (secteur ou batterie) et par les appels de courants électriques au cours d'une communication.

Seuls les canaux de trafic (TCH) du protocole GSM portent des répétitions d'évènements, par le découpage du temps de transmission en 8 périodes disponibles. La fréquence de répétition de ces transmissions (217 Hz), qui ne correspond pas à l'émission d'énergie basse fréquence, n'est obtenue que si un seul utilisateur communique avec la station de base. Le canal « balise », lui, est un signal non découpé temporellement. Il ne faut pas confondre la fréquence d'un rayonnement électromagnétique, avec la « fréquence » de répétition d'évènements dans le temps (*cf.* encadré ci-dessous).
Pour vérifier ceci, deux sites de mesure à proximité d'antennes de station de base ont été investigués dans l'étude réalisée par Supélec. Les niveaux de champ électrique et magnétique ont été mesurés pour les fréquences situées entre 5 Hz et 32 kHz, et confirment l'absence de rayonnement électromagnétique basse fréquence émis par les antennes de station de base de téléphonie mobile.

Les antennes de station de base et les téléphones GSM émettent-elles des champs électromagnétiques basses fréquences ?

Les antennes des stations de base de téléphonie mobile et les antennes des téléphones mobiles sont conçues pour émettre dans le domaine des radiofréquences (900 MHz, 1 800 MHz, 2 100 MHz). Elles ne sont pas conçues pour émettre des rayonnements extrêmement basses fréquences, autour de quelques dizaines de Hertz.

Les seuls champs électromagnétiques basses fréquences mesurables à proximité des antennes de station de base et des téléphones mobiles sont ceux dus à leur alimentation électrique (secteur ou batterie) et aux appels de courants électriques au cours d'une communication.

L'émission d'un champ électromagnétique extrêmement basse fréquence ne doit pas être confondue avec la modulation du rayonnement radiofréquence qui contient le signal à transmettre. Cette confusion vient de l'utilisation dans les deux cas du terme de « fréquence » :

Fréquence de propagation d'un phénomène ondulatoire.

Le signal GSM se propage au moyen d'une onde électromagnétique avec une fréquence de propagation située autour de 900 MHz ou 1 800 MHz. Cette onde est créée par des champs électrique et magnétique oscillant à ces fréquences.

Fréquence décrivant la répétition périodique d'une donnée (1 Hz = 1 événement par seconde).

Le découpage temporel du signal GSM fait apparaître différentes valeurs de fréquences qui caractérisent le fonctionnement discontinu d'une communication entre la station de base et le téléphone. Ce découpage n'est pas en soi un rayonnement électromagnétique, mais provoque une fréquence d'apparition d'événements. La trame de huit impulsions fait notamment apparaître des fréquences de répétitions des impulsions de 217 Hz à 1 736 Hz (*cf*. Figure 8).

A la demande des experts du groupe de travail, des mesures de champs électromagnétiques basses fréquences ont été réalisées à proximité de stations de base de radiotéléphonie mobile. Les résultats sont présentés et discutés dans le chapitre 3.5.2 et en annexe 3.1.

- **Exposition liée à d'autres émetteurs radiofréquences (veille bébés, Wi-Fi, *Bluetooth*, *etc*.)**

Des mesures de niveaux de champ électrique en champ lointain ont été réalisées pour l'OFSP ([Kramer, 2005], [Kühn, 2006]) à proximité d'émetteurs radiofréquences tels que des interphones bébé, des téléphones sans fil DECT, des périphériques *Bluetooth*, *etc*.

Ces mesures mettent en évidence la décroissance du niveau de champ électrique au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'émetteur. Les niveaux mesurés sont très variables en fonction des différents modèles, mais les valeurs limites d'exposition de l'Icnirp (*cf.* chapitre 6) sont toujours respectées.

Les niveaux mesurés à proximité de deux interphones bébé de puissances d'émission différentes (*cf*.Tableau 8) se situent toujours au-dessous de la limite recommandée (en fonction de la fréquence) par l'Icnirp, à savoir 40 V/m (interphone bébé n°1 qui émet à 863 MHz) et 29 V/m (interphone bébé n°2 qui émet à 446 MHz). Si l'on utilise ces appareils à la distance recommandée d'un mètre, les niveaux de champ électrique atteignent 0,43 V/m pour l'interphone bébé le moins puissant et 3,2 V/m pour l'interphone bébé le plus puissant (*cf*. Figure 19).

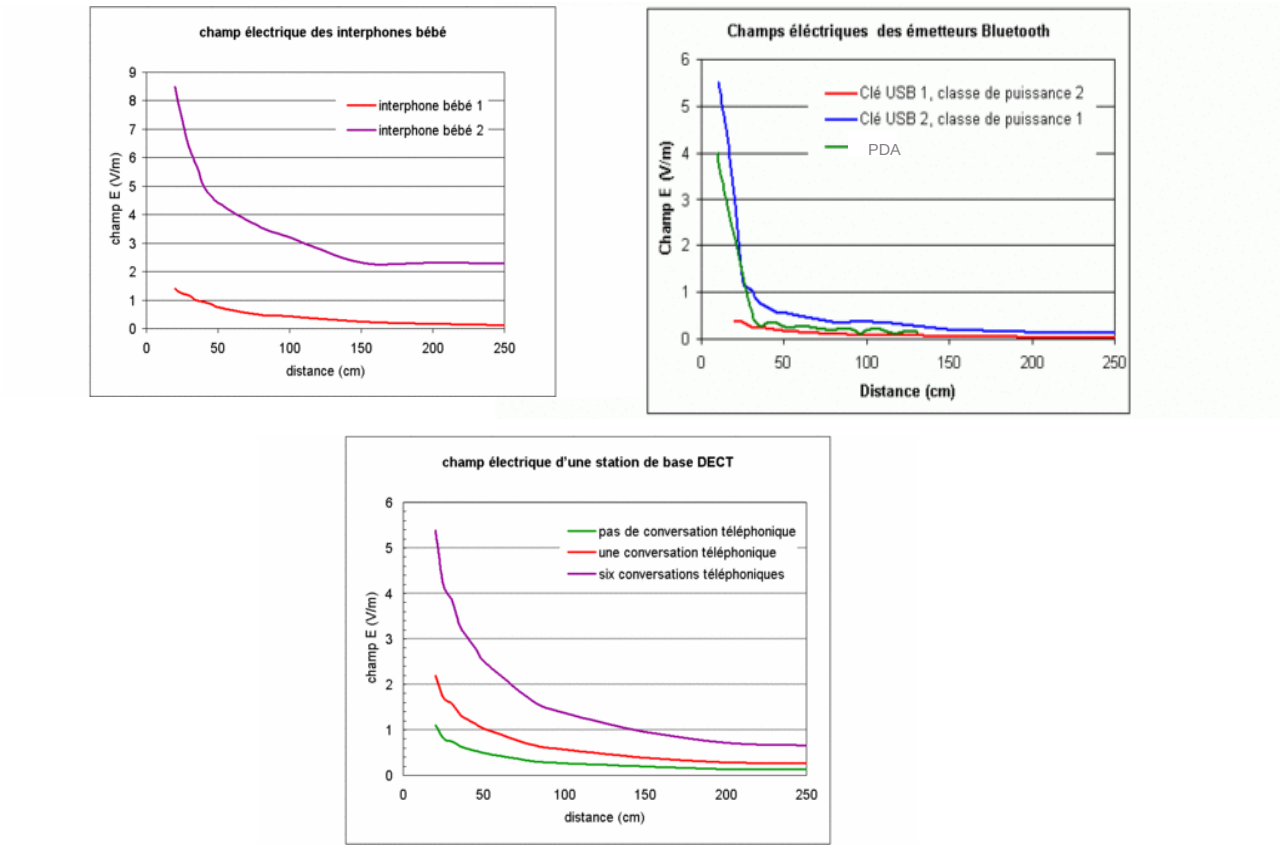


Figure 19 : niveau de champ électrique mesuré à proximité d'émetteurs radiofréquences – source : [Kramer, 2005] et [Kühn, 2006]

La Figure 19 montre le niveau de champ électrique induit à proximité d'un PDA et de deux clés USB *Bluetooth*, en fonction de la distance. Les mesures ont été réalisées avec des puissances d'émission maximales. Les niveaux mesurés sont, dès la distance de 20 cm, plus de 20 voire 150 fois inférieures à la valeur de 61 V/m recommandée par l'Icnirp pour la fréquence du *Bluetooth* de 2 400 MHz.

Le niveau de champ électrique en fonction de la distance à proximité d'une base de téléphone DECT est également illustré sur la Figure 19. A 50 cm de la base, les niveaux mesurés sont de l'ordre de quelques Volts par mètre.

Concernant les émetteurs Wi-Fi, leur rayonnement est pris en compte dans le protocole de l'ANFR (dans la bande nommée « Radars, BLR, FH » - *cf.* Tableau 10)[42], mais les niveaux d'exposition étant très faibles au-delà de quelques mètres de l'émetteur, ils ne sont généralement pas spécifiquement identifiés dans les résultats de mesure. C'est un point qui devrait être amélioré dans la prochaine version du protocole ANFR.

Une étude spécifique sur le rayonnement Wi-Fi a été réalisée en 2006 par le laboratoire d'électromagnétisme de Supélec [Supélec – Wi-Fi, 2006]. Les résultats de l'étude montrent une grande disparité entre les différents équipements testés, au niveau des puissances d'émission, des antennes et des configurations de transmission. Cependant, tous les résultats indiquent que les matériels testés respectent les valeurs limites d'exposition et il ressort de cette étude, comme attendu, que le champ électromagnétique décroît très rapidement avec la distance et qu'au-delà de quelques mètres, il devient négligeable (inférieur à 0,1 V/m). A 20 cm de l'émetteur, en utilisation de transfert de fichiers à débit maximal, l'intensité de champ électrique vaut environ 6 V/m, soit 10 % de la valeur limite d'exposition.

Dans l'étude [Kühn, 2006] pour l'OFSP, le niveau de champ électrique en fonction de la distance a été mesuré pour plusieurs points d'accès et cartes Wi-Fi intégrées à des ordinateurs portables. Les résultats, illustrés sur la Figure 20, sont comparables à ceux de l'étude Supélec [Supélec – Wi-Fi, 2006] : à une distance de 20 cm, le niveau maximal atteint moins de 10 % de la valeur limite recommandée par l'Icnirp, et moins de 2,5 % à 1 mètre.

[42] Dans la bande de fréquences situées autour de 2,5 GHz, on trouve des applications telles que les fours microondes, certains radars, des faisceaux hertziens, la boucle locale radio, ou encore des systèmes Wi-Fi. Les signaux utilisés par ces applications hétéroclites sont en réalité très différents. Les radars utilisent ainsi des signaux impulsionnels de durée extrêmement courte, mais transportant des énergies très importantes, ce qui n'est pas le cas pour les autres types de signaux.

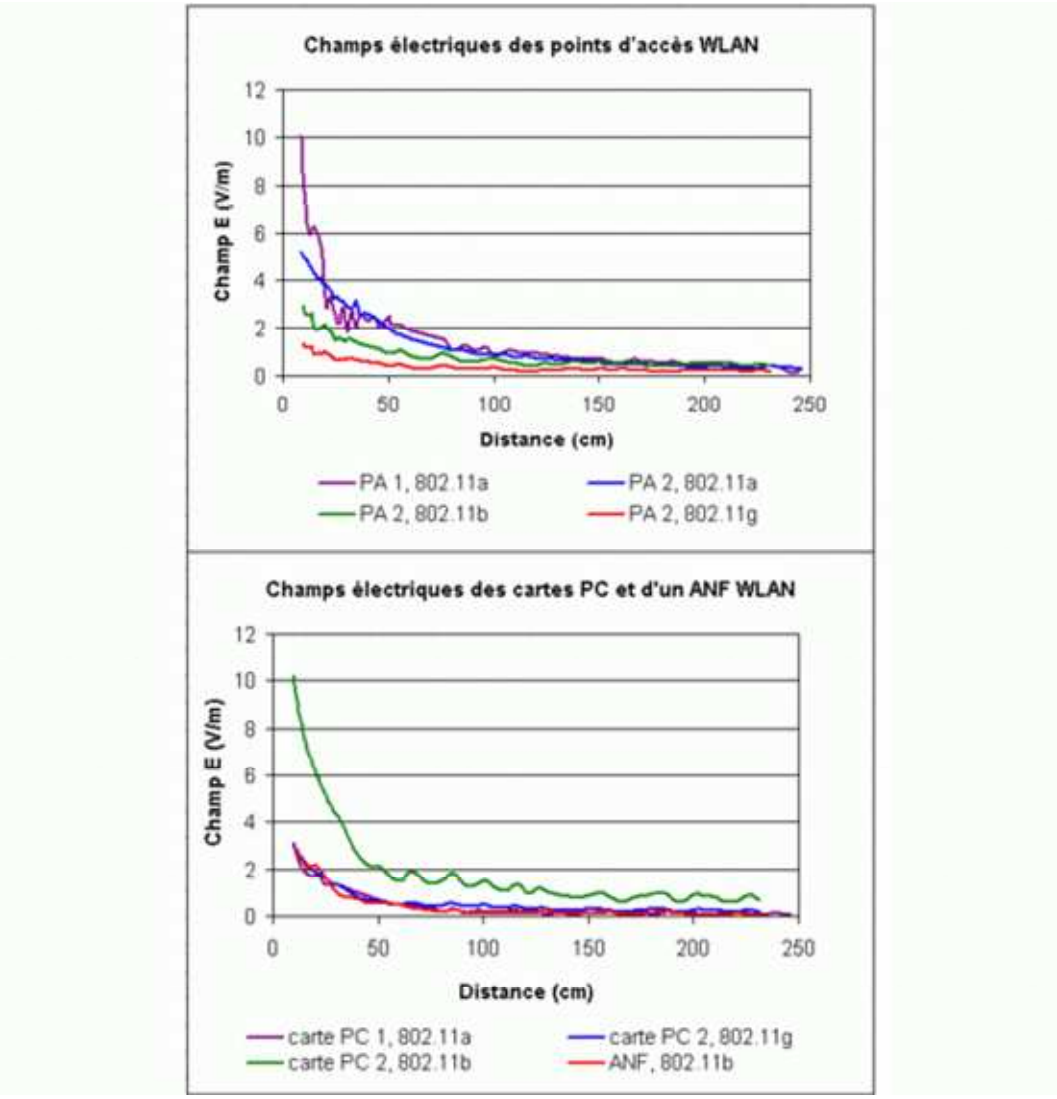


Figure 20 : niveau de champ électrique mesuré à proximité d'émetteurs Wi-Fi – Source : [Kühn, 2006]

- **Mesures de niveau d'exposition réalisées avec des exposimètres portables**

Les mesures réalisées selon le protocole de l'ANFR sont représentatives de l'exposition en un point fixe et à un instant donné, en extrapolant au trafic maximal pour les émetteurs de téléphonie mobile. Ces mesures ne sont donc pas représentatives de l'exposition réelle d'une personne qui se déplace et peut être exposée à différents émetteurs radioélectriques en fonction des moments de la journée. Sur ce point, le développement d'équipements portables (de type exposimètres[43] portables) est extrêmement intéressant et doit être poursuivi. Ces appareils de faible encombrement mesurent le niveau de champ électrique pour différentes bandes de fréquences. Ils peuvent être portés par une personne et donc permettre de connaître l'évolution du niveau d'exposition en fonction de la mobilité et des activités de la personne. Ils peuvent de plus fournir des données d'entrée pertinentes pour des études épidémiologiques sur l'exposition aux radiofréquences.

[43] Le terme de dosimètre portable est fréquemment employé. Le groupe de travail lui préfère le terme d'exposimètre qui rend compte plus correctement de la fonction de l'appareil (mesure de niveaux d'exposition).

Il ressort cependant des études publiées sur le sujet que ces équipements sont à utiliser avec précaution et que leur fiabilité doit être améliorée. Une étude très complète sur un modèle d'exposimètre (EME Spy 120 de SATIMO / Antennessa) a été réalisée par Mann [Mann 2005]. Il en ressort un certain nombre de remarques et recommandations sur l'utilisation de l'exposimètre. Plus récemment, une étude menée par la *Fondation de recherche Suisse sur la communication par mobile* [Neubauer, 2008] établit un certain nombre de recommandations et de précautions à respecter pour l'utilisation des exposimètres, en termes de calibration et de particularités d'utilisation liée aux différents types de sources de rayonnements (GSM, UMTS, Wi-Fi). De plus, dans le cas où les exposimètres sont portés par une personne, la position de l'exposimètre influe sur le résultat de mesure [Viel, 2009]. Ce facteur d'influence, complexe à identifier et à quantifier, doit être pris en compte dans le calcul d'incertitude de la mesure.

La figure suivante présente un exemple d'enregistrement avec un exposimètre EME Spy 120 réalisé pendant une journée (source : université Lyon 1). Les contributions les plus fortes proviennent en fait des émissions des téléphones mobiles situés à proximité de l'expérimentateur, ce qui est particulièrement visible dans le trajet en train en soirée, entre Lyon et Paris. Il faut cependant apprécier ces résultats avec précaution. En effet, l'exposimètre n'est pas conçu pour donner une mesure précise des champs électromagnétiques dont la source est proche, ce qui est le cas des téléphones mobiles placés tout contre l'utilisateur. Néanmoins, si cet appareil est peu précis pour des sources de ce type situées jusqu'à environ un mètre, il permet de donner un ordre de grandeur des contributions des appareils situés plus loin, contributions que l'on retrouve dans l'enregistrement. Les situations d'exposition sont explicitées dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau 11).

Tableau 11 : emploi du temps pendant l'enregistrement de l'exposition aux radiofréquences

Numéro	Activité
1	Arrivée à la gare de Lyon Part Dieu
2	Départ du train de Lyon (6 h 30)
3	Arrivée à Paris
3 - 4	Déplacement dans Paris (métro et marche à pied)
4 - 5	Dans un amphithéâtre (réseau Wifi)
5 - 6	Déplacement au restaurant à l'extérieur de l'université
6 - 7	Dans une salle de cours
7 - 8	Déplacement dans Paris (métro et marche)
8	Arrivée à la gare de Lyon
9	Montée dans le train
10	Arrivée à la gare de Lyon Part Dieu
11	La personne en face dans le tramway utilise une clé 3G sur son ordinateur
12	A domicile, utilisation du Wi-Fi

Figure 21 : enregistrement de l'exposition individuelle aux radiofréquences avec un exposimètre portable pendant 24 heures (source : université Lyon 1).

L'étude [Burch, 2006] présente des niveaux d'exposition mesurés avec une sonde isotropique large bande (NARDA). Les résultats sont classés en fonction des niveaux (fort c'est-à-dire supérieur à 4 µW/cm^2, moyen et faible c'est-à-dire inférieur à 0,5 µW/cm^2). Les mesures sont effectuées sur 2,5 jours et le positionnement de la sonde est réalisé par GPS et SIG (Système d'Information Géographique). Dans ce travail préliminaire, il est montré que les facteurs temporels et spatiaux sont importants dans l'évaluation de l'exposition résidentielle. Sur ce point, l'utilisation combinée GPS/SIG permet une réelle amélioration de l'estimation de l'exposition.

L'étude [Joseph, 2008] s'intéresse aux contributions relatives des différentes bandes de fréquences en effectuant des mesures avec un exposimètre individuel (EME Spy 120). Pour relier les mesures répétées de niveaux de champ électrique au DAS corps entier moyen, il propose 28 *scenarii* types groupés en une matrice d'exposition, et un modèle de fantôme où sont entrés les résultats de mesures et à partir desquels une analyse statistique multivariée est réalisée. Il propose d'utiliser son exposimètre comme mesure directe du DAS corps entier dans des études épidémiologiques. Seuls les résultats portant sur la bande de fréquence GSM sont présentés. Les niveaux sont variables (ils sont par exemple supérieurs dans les transports en commun par rapport à l'extérieur), tout en restant très inférieurs aux valeurs limites d'exposition.

L'étude [Röösli, 2008] utilise la combinaison entre mesures et questionnaires. Ce travail préliminaire porte sur 109 sujets mesurés dans la vie quotidienne sur 7 jours, en parallèle

avec une évaluation par questionnaire (QUALIFLEX). Pour cela, l'auteur effectue la comparaison entre une méthode statistique robuste et une approche plus simple qui consiste à associer le seuil de détection de l'appareil aux émissions non détectables par l'exposimètre plutôt que de les exclure. Les sujets témoins sont choisis en raison de leur proximité aux émetteurs de télédiffusion et de stations de base de téléphonie mobile. Les deux méthodes donnent des résultats proches, mais la surestimation des faibles contributions par la méthode simple amènent à une surestimation globale des niveaux d'exposition. Finalement, la méthode ROS paraît plus robuste, mais demande à être validée.

Dans les études de Viel ([Viel, 2009 a] ; [Viel, 2009 b]), des mesures sont effectuées sur 12 bandes de fréquences, de la radiodiffusion FM (87,5 MHz) jusqu'à 3 GHz, à l'aide de l'exposimètre EME Spy 120. Les exposimètres ont été portés pendant 24 heures par un échantillon de 377 personnes (111 jeunes et 266 adultes) réparties dans des zones urbaines, périurbaines et rurales autour des villes de Besançon et Lyon. En parallèle, une évaluation par questionnaire a été effectuée pour permettre le contrôle et l'attribution des pics d'émission ainsi que la géolocalisation des trajets. Ces études montrent que, la plupart du temps, les mesures sont inférieures au seuil de détection de l'exposimètre (0,05 V/m). Moins de 1 % des mesures de champ total excèdent 1 V/m. La plus forte exposition moyenne provient des émetteurs FM (0,044 V/m, ± 0,068), des téléphones sans fil (0,037 V/m, ± 0,0106), des téléphones mobiles (UMTS montant : 0,036 V/m, ± 0,018 ; UMTS descendant : 0,037 V/m, ± 0,019) et des réseaux Wi-Fi et des fours à microondes (0,038 V/m, ± 0,069) pris ensemble. L'exploitation des questionnaires et journaux de bord tenus par les sujets a permis d'individualiser la contribution importante de l'utilisation des fours à microondes (bande 2,4 GHz) dans les résultats de mesures.

Ces études [Viel, 2009 a] et [Viel, 2009 b] montrent que l'exposition résidentielle aux émissions GSM 900, GSM 1800 et UMTS ne varie pas de façon simple en fonction de la distance à la source et que les résultats diffèrent selon la zone considérée (urbaine, péri-urbaine ou rurale). Globalement, autour des émetteurs (antennes de stations de base) de téléphonie mobile, l'exposition augmente avec la distance dans les zones proches de l'émetteur pour atteindre un maximum là où le faisceau principal rencontre le sol (autour de 250 m environ).

Dans l'étude de Frei [Frei, 2009], des mesures avec des exposimètres EME Spy 120 ont été réalisées sur 166 volontaires recrutés en zone urbaine autour de la ville de Bâle (Suisse) et qui ont porté l'exposimètre pendant une semaine (2 semaines pour 37 participants). Des questionnaires et carnets de bord ont été remplis en parallèle afin d'étudier les corrélations entre le lieu fréquenté (chambre, bureau, extérieur, magasin, *etc*.) et le niveau d'exposition. Cette étude a montré que l'exposition aux champs radiofréquences varie selon les individus et les lieux, mais est relativement stable pour un même individu, et produit des résultats assez proches de ceux de Viel [Viel, 2009 b]. La moyenne hebdomadaire de l'exposition au champ électrique est de 0,22 V/m. Les principales sources d'exposition sont les antennes de station de base de téléphonie mobile, les téléphones mobiles et les téléphones sans-fil DECT. Les expositions sont plus importantes pendant la journée, dans les trains, les aéroports et les transports urbains.

Concernant les réseaux cellulaires de téléphonie mobile, l'ensemble de ces études confirme par la mesure la complexité de la répartition des niveaux d'exposition autour des antennes de stations de base, due en partie à la grande variabilité des signaux, à la position et directivité des antennes, ainsi qu'à la présence d'obstacles (immeubles, relief, *etc*.).

Il faut noter que toutes ces études ne prennent pas en compte l'exposition due au téléphone mobile des personnes, lorsqu'elles téléphonent avec l'appareil collé contre la tête.

3.6 Dispositifs de protection contre les champs électromagnétiques radiofréquences

En marge du débat scientifique et médiatique sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques, de nombreux produits et systèmes de protection contre les champs électromagnétiques apparaissent sur le marché : *patch* anti ondes, *spray* anti ondes, vêtements métallisés, compensateur d'ondes, *etc*. L'efficacité de ces produits n'est pas démontrée à ce jour.

Les techniques de protection et de blindage vis-à-vis des champs électromagnétiques sont bien connues notamment dans le domaine de la compatibilité électromagnétique et, pour une réelle efficacité, doivent être dimensionnées et mises en œuvre par des spécialistes du domaine.

Pour isoler une pièce par rapport au champ électromagnétique ambiant, il faut mettre en œuvre une cage de Faraday, en « métallisant » les parois de la pièce. Différentes solutions sont possibles, en fonction aussi des bandes de fréquences considérées : plaques de métal, peintures ou verres métallisés, tissu métallique, grillage, *etc*. De tels dispositifs sont utilisés par exemple dans des hôpitaux pour isoler des salles contenant du matériel médical électronique sensible et éviter des interférences dommageables, ou dans des ambassades pour des problèmes de confidentialité de données. Pour atténuer efficacement les rayonnements électromagnétiques à l'intérieur d'une pièce, le traitement des ouvertures et des jonctions entre les parois métalliques (angles des portes, sol-plafond *etc*.) est crucial.

Il existe des méthodes de caractérisation de l'efficacité de ces protections, soit en laboratoire pour mesurer l'indice d'affaiblissement d'un matériau, soit *in situ* pour mesurer l'atténuation et l'efficacité du blindage mis en œuvre.

3.7 Projets en cours

Sur des sujets liés à l'exposition des personnes et à la dosimétrie, plusieurs projets de recherche sont actuellement en cours et devraient apporter des résultats importants d'ici les deux prochaines années. On peut mentionner par exemple les projets RADIO (développement d'un exposimètre individuel optimisé) ou DONUT (développement de méthodes de simulation pour la dosimétrie numérique) qui sont financés par la Fondation Santé et Radiofréquences, les projets OP2H (optimisation des méthodes de simulation de la propagation en milieu urbain), SAMPER (développement d'un système de cartographie de l'exposition aux radiofréquences à l'échelle d'un quartier, à partir de simulations et de sondes de mesures fixes) ou MULTIPASS (évaluation de l'exposition à des sources multiples et des émissions irrégulières) qui sont financés par l'Agence Nationale de la Recherche.

4 Synthèse des études biologiques, cliniques et épidémiologiques relatives aux radiofréquences

4.1 Rappels méthodologiques

4.1.1 Les études *in vivo* et *in vitro*

Les études portant sur les effets biologiques des radiofréquences nécessitent une double compétence : l'une dans le domaine de la physique afin de paramétrer exactement les conditions d'exposition, l'autre dans le domaine de la biologie. Cette pluridisciplinarité ne peut être atteinte que par la collaboration d'équipes spécialisées dans l'un et l'autre de ces domaines. Ceci explique le peu d'équipes travaillant sur le sujet, et le grand nombre d'études qui présentent des lacunes méthodologiques.

Au delà de 10 MHz, les effets thermiques des radiofréquences sont connus de longue date et utilisés largement (fours à microondes, traitement radiofréquences des métastases hépatiques, *etc.*). S'agissant des RF utilisées en télécommunications, la question qui se pose est celle des éventuels effets non thermiques. Il est dès lors crucial que les expérimentations soient conduites dans des conditions irréfutables en termes de dosimétrie pour pouvoir affirmer qu'un effet observé n'est pas un effet thermique.

Pour chaque article de recherche, une analyse de la méthodologie employée dans les parties physique et biologique a été réalisée afin de pouvoir en évaluer la validité sur des critères objectifs.

Partie physique

Les principaux critères de validité retenus sont :

- la qualité du système d'exposition,
- la « dosimétrie »[44], ou caractérisation de l'exposition.

Il est nécessaire en premier lieu de disposer d'un système d'exposition qui permette de réaliser des expériences avec des conditions d'exposition contrôlées (fréquence, modulation, puissance, température, ventilation, *etc*.). Celui-ci doit être adapté au type d'étude et décrit de façon détaillée.

Le DAS (en W/kg) est le paramètre qui caractérise le niveau d'exposition (cf. chapitre 3), il est donc indispensable de le connaître. Sans cette valeur, les conditions expérimentales ne sont pas définies (cela reviendrait au même que de tester la toxicité d'un produit sans avoir une idée de la quantité utilisée). Le DAS doit être obtenu par deux méthodes au moins : simulation numérique et mesure physique de température et/ou du champ électrique. La température sous exposition ne peut être mesurée correctement qu'avec des sondes non métalliques, généralement par fibres optiques.

[44] Il faut noter que le terme « dosimétrie », bien qu'impropre en l'absence de définition de ce que serait une « dose » de rayonnement radiofréquences, est employé ici car il est couramment utilisé par les chercheurs du domaine., Il faudrait plutôt parler d'« exposimétrie » et de dosimétrie biologique, c'est-à-dire de la caractérisation de l'exposition aux radiofréquences des modèles cellulaires, animaux ou humains permettant d'accéder à la valeur du DAS.

Cette valeur du DAS étant délicate à obtenir, la méthode dosimétrique employée a été examinée en détail pour chaque publication afin de connaître la validité de la valeur du DAS annoncée par les auteurs.

Lors de l'analyse des articles de recherche, différents cas de figures sont rencontrés :

- la méthode d'obtention du DAS est bien décrite : calculs numériques + mesures physiques (dosimétrie validée) ;
- l'estimation du DAS est faite par des calculs à partir de mesures physiques (approximation plus ou moins grossière) ou par simulation numérique uniquement. Il manque une validation soit numérique soit expérimentale (dosimétrie incomplète) ;
- la méthode d'obtention du DAS est mentionnée, mais il n'y a pas de description ou de référence à une autre publication (dosimétrie non décrite) ;
- l'absence de dosimétrie, les conditions d'exposition (DAS) sont inconnues (néant).

Lorsqu'il s'agit de l'exposition d'humains, la mention « réelle » est jointe au critère d'appréciation de la dosimétrie pour distinguer des expositions sur des modèles animaux ou in vitro (réelle validée, réelle néant, *etc*.).

Notons qu'un téléphone mobile ne peut pas être utilisé comme système d'exposition pour des expériences *in vitro* ou sur des animaux pour mimer l'effet d'un téléphone sur un humain. En effet, la puissance (en Watts) normalement dissipée dans environ 1,4 kg de tissu cérébral humain est alors absorbée par 10 g dans le cas du cerveau d'un rat par exemple. Le système est alors considéré comme irrecevable et l'étude ne peut être prise en compte.

Les études peuvent être faites en champ proche ou lointain (*cf.* chapitre 3) selon le système d'exposition utilisé, c'est toujours la valeur de DAS qui reste le critère de référence pour évaluer le niveau d'exposition. Lorsqu'il s'agit d'un DAS localisé au niveau de la tête, du cerveau ou de la peau par exemple, la valeur du DAS au niveau de la partie étudiée, « DAS local », est plus élevée que le DAS « corps entier » qui est un moyenne sur la totalité du corps.

Une liste, non exhaustive, des systèmes d'exposition utilisés en laboratoire ainsi que des détails sur les conditions requises pour une maîtrise correcte de l'exposition aux radiofréquences sont présentées en annexe 3.2 (Collin A., 2007).

<u>Partie biologie</u>

Les effets biologiques des radiofréquences sur le vivant peuvent être examinés à plusieurs niveaux :

- in vitro sur des cellules humaines, animales, végétales ou de bactéries en culture,
- in vivo sur des animaux ou des humains.

Pour les études *in vitro*, les cellules peuvent être fraîchement isolées à partir d'organes ou de prélèvements sanguins (lymphocytes), utilisées directement ou mises en culture pour une courte durée (on parle alors de cultures primaires). Il peut s'agir également de lignées cellulaires : soit des cellules cancéreuses provenant de divers types de tumeurs, soit des cellules immortalisées par modifications génétiques.

Pour les études *in vivo*, les modèles animaux les plus fréquemment utilisés sont les rats et les souris. Ces dernières peuvent être génétiquement modifiées et présenter un caractère

particulier utile aux études réalisées, comme une prédisposition au développement de certaines tumeurs.

Les études *in vitro* et *in vivo* sont réalisées pour élucider des effets sur des mécanismes métaboliques, des fonctions physiologiques ou des altérations des systèmes vivants.

En ce qui concerne la durée de l'exposition, il est question d'exposition « aiguë » lorsque la durée est courte (quelques minutes à plusieurs heures selon le modèle) et d'exposition chronique lorsque cette durée s'étale pendant une grande partie de la vie de l'animal ou de l'humain. Compte tenu de la durée de vie d'un rat ou d'une souris, une exposition de 1 an ou deux est considérée comme chronique. Entre les deux, pour quelques jours à quelques mois, l'exposition est dite semi-chronique (ou sub-chronique). S'il s'agit de cellules en culture, ces notions de chronique ou semi-chronique sont difficilement transposables, néanmoins, il est question d'exposition aiguë pour quelques minutes ou quelques heures, et chronique ou de longue durée si l'exposition persiste durant plusieurs générations de cellules.

Les études *in vivo* et *in vitro* se complètent.

Les critères de qualité classiquement requis pour les études biologiques sont :

- la pertinence du modèle,
- la validité des techniques (fiabilité, sensibilité, etc.),
- la puissance de l'étude : nombre de cas (taille de l'échantillon), nombre de répétitions,
- les tests en aveugle[45], voire double aveugle pour les études sur l'homme,
- les tests statistiques utilisés.

Pour les études *in vivo*, selon le système utilisé, les animaux peuvent être contraints (immobilisés) pendant l'exposition et ainsi subir un stress important susceptible de fausser les résultats (stress de contention). Des dispositions doivent être prises pour limiter ce stress, notamment en habituant les animaux à cette situation.

En outre, toutes les études *in vivo* ou *in vitro* doivent présenter des expositions factices dites « *sham* » qui permettent de comparer les résultats obtenus avec et sans exposition aux radiofréquences, afin de s'assurer que l'effet observé n'est pas dû au système d'exposition lui-même mais bien au champ électromagnétique. En pratique, l'expérience est réalisée dans deux systèmes identiques la présence ou l'absence du champ électromagnétique doit être l'unique paramètre qui varie entre exposé et sham. Ceci est fait dans la grande majorité des travaux.

Par ailleurs, les expériences sont conduites en parallèle dans les conditions habituelles de culture (cellules) ou d'élevage (animaux) : on parle alors de « contrôles » (contrôle cage pour les animaux) ou de témoins négatifs. La technique employée doit également être validée par des témoins positifs qui permettent de s'assurer qu'un effet, s'il existe, est bien détecté avec la technique employée. Pour cela, un facteur d'induction connu de l'effet recherché est utilisé ; par exemple un agent mutagène s'il s'agit d'effets sur l'ADN. L'absence de ces contrôles ne permet pas de conclure quant aux effets spécifiques des champs électromagnétiques.

[45] L'expérimentateur ne sait pas quels sont les échantillons exposés.

Idéalement, les expériences doivent être conduites en aveugle, en particulier celles où l'analyse des résultats met en jeu la subjectivité de l'expérimentateur, comme des observations au microscope ou des comptages non automatisés d'événements.

Présentation des analyses d'articles

Les données disponibles concernant les effets des radiofréquences sont nombreuses et de qualité très inégale. Elles peuvent être regroupées en plusieurs catégories en fonction de leur centre d'intérêt principal, concernant les effets sur l'intégrité de l'ADN, l'expression génique et la synthèse de protéines (génomique et protéomique), les protéines de choc thermique (connues comme réponse cellulaire au stress), l'apoptose, les enfants, les fonctions reproductives, la barrière hémato-encéphalique (BHE), *etc*.

Notons au passage qu'une étude scientifique consiste à émettre une hypothèse et à vérifier si elle est vraie ou pas par des moyens appropriés. L'observation d'un effet biologique, *a fortiori* en condition expérimentale, ne signifie pas forcément qu'il entraîne un dommage et encore moins qu'il se traduise par un effet sur la santé humaine.

Lors de la rédaction, il n'est pas mentionné pour chaque résultat cité « dans les conditions expérimentales de l'étude » mais il va de soi que les résultats se réfèrent toujours aux travaux décrits, dans des conditions expérimentales données, et ne sont pas directement extrapolables à des situations générales, notamment à l'homme.

De même, lorsqu'il est question d'effet « significatif », cela sous-entend qu'il est statistiquement significatif. Cela ne présume en rien de son amplitude, un effet peut être faible mais statistiquement significatif. On parlera le plus souvent « d'effet » pour ne pas alourdir le style, sachant qu'une anomalie du traitement statistique des données ou de la puissance de l'étude sera mentionnée le cas échéant.

Nous avons opté pour une présentation par type d'effets, les études *in vitro* et *in vivo* sont traitées conjointement.

Les synthèses sont regroupées sous les chapitres suivants :

- Effets sur l'expression génique et la synthèse de protéines ;
- Effets sur le stress oxydant et la production de radicaux libres ;
- Effets sur l'ADN ;
- Effets sur l'apoptose ;
- Effets sur le développement des cancers chez l'animal ;
- Effets immunologiques ;
- Effets sur le système nerveux ;
- Effets sur le développement ;
- Effets sur la reproduction ;
- Effets sur l'audition ;
- Effets sur le système oculaire ;
- Effets sur le système cardio-vasculaire ;
- Effets sur la mélatonine ;
- Autres effets.

Ces différentes catégories ne sont pas strictement cloisonnées puisqu'il est possible par exemple d'appréhender un effet sur les protéines de choc thermique par l'étude du niveau de l'expression génique, ou sur l'apoptose au travers de l'expression génique de protéines impliquées dans le processus, etc.

4.1.2 Les études cliniques

La spécificité des études cliniques est de porter directement sur des êtres humains, sains ou pathologiques. En médecine, ces études ont occupé et occupent encore une place centrale. Après avoir permis, au XIXème siècle, de jeter les bases de la médecine scientifique moderne, elles restent indispensables pour intégrer les progrès de la biologie dans la pratique médicale et pour proposer des hypothèses aux recherches épidémiologiques.

Dans une société adhérant fondamentalement à la philosophie des droits de l'homme, ces recherches sont soumises à des impératifs éthiques dont l'importance est telle qu'ils ont été inscrits dans la loi de la plupart des pays. Ces impératifs sont essentiellement au nombre de trois :

- avoir une bonne probabilité de faire progresser les connaissances sur les maladies et les moyens de les traiter ;
- veiller à ne faire courir aux sujets qui s'y prêtent que des risques n'excédant pas les bénéfices que l'on peut en attendre au plan individuel et collectif ;
- avoir recueilli, avant le début de la recherche, le consentement éclairé des sujets sollicités.

A ces exigences éthiques, s'ajoutent les difficultés liées à la dispersion naturelle des malades et à la lourdeur des investigations qu'elles comportent. En conséquence, ces recherches portent généralement sur des groupes de sujets ayant des effectifs relativement réduits et comportant des biais de recrutement. Leurs résultats ne peuvent donc être généralisés, comme peuvent l'être les résultats des enquêtes épidémiologiques, lorsque ces dernières sont réalisées avec des échantillons représentatifs des populations étudiées.

Malgré ces limitations, les recherches cliniques obéissent aux mêmes règles de la démarche scientifique que toutes les autres recherches et, comme elles, peuvent être classées en deux catégories : les recherches à visée descriptive et les recherches à visée explicative.

Les recherches à visée descriptive s'efforcent, comme leur nom l'indique, d'identifier et de caractériser des « tableaux cliniques », correspondant à des situations pathologiques appelant des « conduites à tenir » précises. Elles reposent essentiellement sur des critères cliniques proprement dits, c'est-à-dire recueillis par les professionnels de santé au moyen de leurs organes des sens. Ces signes sont classés en trois catégories : les signes généraux (fièvre, amaigrissement *etc*.), les signes fonctionnels ou subjectifs (douleur, fatigue) et les signes physiques ou objectifs (à l'inspection, à la palpation, à la percussion, à la mobilisation active et passive, et à l'auscultation). Mais ces recherches reposent aussi sur des critères biologiques, imagiers, fonctionnels, psychologiques et sociologiques. Il existe donc deux entrées et un double mouvement en recherche clinique : tantôt, elles partent des signes observés chez les patients pour leur trouver des corrélats anatomo-physiologiques, tantôt, elles partent de perturbations anatomo-physiologiques pour identifier leur traduction clinique.

Les recherches à visée explicative se proposent d'étudier les mécanismes physiopathologiques (qui sont actuellement le plus souvent moléculaires) qui sous-tendent ces signes cliniques ; il s'agit de véritables recherches expérimentales qui, en raison des contraintes éthiques, doivent s'appuyer sur des modèles biologiques. En raison des différences entre espèces, bien mises en évidence par la physiologie comparée puis par la génétique, les résultats de ces recherches sur l'animal ne peuvent être transférés directement à l'homme. Ils doivent faire l'objet, auparavant, de confirmations effectuées chez ce dernier.

Les formes les plus nombreuses et les plus achevées de la recherche clinique sont les essais thérapeutiques, avec leur schéma à quatre phases :

- La phase I destinée à évaluer la tolérance du produit,

- la phase II à vérifier ses mécanismes d'action sur un petit nombre de sujets,
- la phase III à vérifier son efficacité clinique et ses effets indésirables par des méthodes se rapprochant de celles de l'épidémiologie,
- la phase IV à assurer le suivi par l'étude de ses effets au long cours et par la recherche de nouvelles indications.

La transposition de ce schéma à d'autres domaines de la recherche clinique n'est pas toujours possible, notamment en chirurgie. Mais, elle reste un objectif vers lequel il faut essayer de tendre.

En ce qui concerne les effets sanitaires des ondes radiofréquences, il apparaît qu'on n'a eu, jusqu'à une date récente, ni entrée clinique (symptômes non spécifiques), ni entrée anatomo-physiologique (pas de lésion et pas d'anomalie des constantes biologiques). Si le débat sur le rôle éventuel des champs électromagnétiques dans l'apparition et l'évolution d'affections comme les tumeurs ou les maladies dégénératives doit rester dans le cadre de cette démarche traditionnelle, poser le problème de l'hypersensibilité électromagnétique en ces termes ne peut que conduire à une impasse.

Il convient de rappeler ici que, comme l'a bien montré Canguilhem [Canguilhem, *Le normal et le pathologique*, 1966], le terme de maladie désigne deux concepts différents, un concept scientifique « objectif » qui correspond aux données de la démarche décrite ci-dessus, et un concept individuel « subjectif » qui correspond au vécu de chacun et intègre d'autres dimensions que somatiques. La langue anglaise ne connaît pas cette difficulté puisqu'elle possède deux termes différents pour désigner ces deux concepts, *disease* pour le concept scientifique et *illness* pour le concept subjectif. Il est évident que, par nature, ces deux concepts, qui correspondent à deux points de vue différents d'un même phénomène, ne peuvent coïncider parfaitement et peuvent même diverger fortement. La science médicale n'a pu se construire qu'en négligeant la subjectivité des malades. Mais par là même elle ne saurait répondre à toutes les questions émanant de cette subjectivité. Cependant, cette partie purement subjective de la maladie se réduit progressivement avec les progrès de la biomédecine. Dans ce contexte, la problématique de l'hypersensibilité électromagnétique revêt un intérêt de portée générale, car elle s'intègre légitimement dans le cadre des affections médicalement inexpliquées, comme la fibromyalgie ou le syndrome de fatigue chronique.

4.1.3 Les études épidémiologiques

L'épidémiologie consiste à analyser la fréquence des maladies d'une population, leur répartition dans le temps et dans l'espace et les facteurs susceptibles de les engendrer. Les facteurs, dits de risques, sont le plus souvent désignés par le terme générique d'exposition.

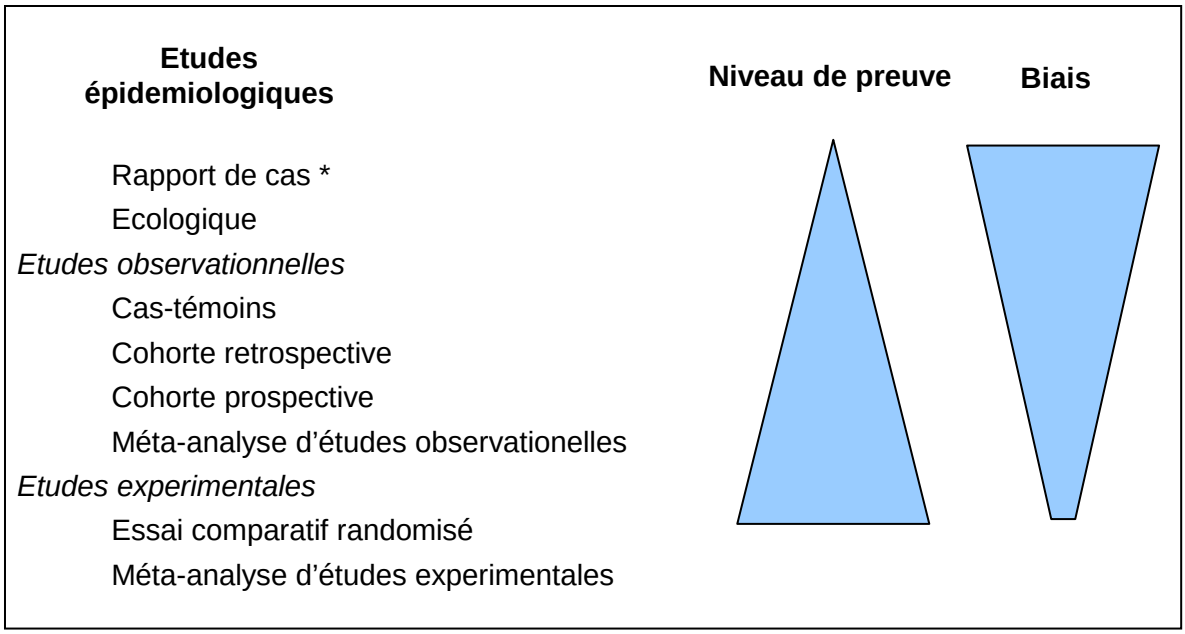
Tous les différents types d'études épidémiologiques n'apportent pas le même niveau de preuve. On distingue classiquement les études écologiques, les études transversales, les études cas-témoins et les études de cohortes :

- Les études écologiques ont la particularité d'examiner l'association entre exposition et pathologie par des données agrégées d'exposition et de pathologies (pollutions moyennes par communes et affections respiratoires associées par exemple) ;
- Les études transversales consistent à examiner à un instant donné à la fois les expositions de la population étudiée et les pathologies ;
- Les études cas-témoins consistent à comparer un échantillon de cas d'une pathologie donnée à un échantillon dit témoin, de personnes non atteintes de cette pathologie ;

- enfin, une étude de cohorte consiste à comparer des individus exposés à un agent particulier et des individus non exposés (ou des groupes de personnes exposées à différents niveaux d'exposition) en suivant dans le temps l'apparition des pathologies pour chaque groupe.

Si toutes ces études ont vocation à montrer une association entre une exposition et la survenue d'une maladie, toutes ne permettent pas de montrer que cette association n'est pas artefactuelle ou due à un biais. Nous invitons le lecteur à se référer à un ouvrage d'épidémiologie pour un descriptif complet de chaque type d'étude et des biais potentiels en épidemiologie [Bouyer, 1995 ; dos Santos Silva, 1999 ; Rothman, 2002 ; Leclerc *et al.,* 1990 ; Goldberg *et al.,* 1990].

Différents groupes ont établi des échelles d'évaluation du niveau de preuve en fonction des types d'études [Harris *et al.,* 2001, Ebel *et al.,* 2004, O*xford center for evidence based medicine*, 2009]. S'il existe quelques variations entre les différentes échelles, il en ressort que l'on peut classer les études dans l'ordre suivant : rapport de cas, études écologiques, études cas-témoins, études de cohortes, essais « randomisés » (*cf.* Figure 22). Les essais aléatoires éliminant le maximum de biais, ils apportent le plus haut niveau de preuve sur la causalité. Cependant, ces études sont rarement réalisables en épidémiologie de l'environnement et il existe certaines situations ou l'on ne peut plus entreprendre ce type d'étude [Smith et Pell, 2003].



*Les rapports de cas ne sont pas en soi des études épidemiologiques, mais elles sont souvent une première étape dans la génération d'hypothèses.

Figure 22 Illustration schématique du niveau de preuve associé aux principaux types d'études épidemiologiques

Les indicateurs de risques les plus utilisés en épidémiologie sont :

- le risque relatif (RR), rapport entre la probabilité d'être atteint d'une pathologie pour les individus exposés et la probabilité d'être atteint pour les non exposés.
- l (OR) (« rapport des cotes »), équivalent au risque relatif dans le cas des pathologies rares. Il permet d'estimer ce dernier lorsque les probabilités ci-dessus ne sont pas estimables, notamment dans le cas des études cas-témoins

- le rapport de mortalité ou d'incidence[46] standardisé (SMR ou SIR : *Standardised Mortality Ratio*, *Standardised Incidence Ratio*). Il rapporte le nombre de décès (ou cas pour le SIR) observés au nombre attendu si la mortalité de la population étudiée était la même que celle de la population de référence

Pour ces trois indicateurs, la valeur 1 correspond à un risque égal entre les populations comparées, les valeurs supérieures (respectivement inférieures) correspondant à un risque supérieur (respectivement inférieur) dans la population exposée.

Aux principaux protocoles cités plus haut, il faut ajouter la méta-analyse qui consiste à synthétiser l'ensemble des études publiées. Initialement développées pour synthétiser les études expérimentales, les méta-analyses ont été employées également pour les études observationnelles. Etant en apparence facilement réalisables avec de simples logiciels dédiés, on observe un nombre grandissant de publications utilisant les méta-analyses comme simple regroupement de risques relatifs (ou d'OR) pour produire un RR global et son intervalle de confiance.

Contrairement aux analyses conjointes (*pooled analysis*), elles ne considèrent pas dans les calculs les données individuelles de base. Si elles permettent d'apporter des éléments quantitatifs synthétiques, elles doivent être réalisées avec précaution et notamment après un examen préalable de l'hétérogénéité entre études.

Pourtant, les méta-analyses permettent essentiellement d'étudier l'hétérogénéité entre les études. Certaines échelles d'évaluation du niveau de preuve imposent aux méta-analyses l'inclusion d'études homogènes comme critère de qualité [*Oxford center for evidence based medicine 2009*, Ebel *et al.* 2004].

Enfin, les méta-analyses ne permettent pas d'« améliorer » un ensemble d'études médiocres et on doit garder à l'esprit l'adage anglo-saxon « *Garbage In – Garbage Out* ». Si l'ensemble des études d'une méta-analyse est potentiellement entaché de nombreux biais, le résultat global de la méta-analyse le sera également.

Notion de « cluster » :

La notion de « cluster », données qui se situent entre les rapports de cas et les études écologiques, nécessite des précisions méthodologiques spécifiques. Il s'agit d'une description d'agrégats de cas d'une pathologie survenus dans une période donnée au voisinage d'une source d'exposition. Des clusters de cancers ont ainsi été observés pour l'exposition chronique aux radiofréquences des antennes de stations de base des réseaux de téléphonie mobile (voir à ce propos l'analyse du « *cluster* » de Saint Cyr l'Ecole, p. 75-76 dans le rapport Afsse [Téléphonie mobile et santé, 2005] et ceux observés par des médecins généralistes en Allemagne autour de la ville de Naila [Eger *et al.*, 2004] et en Israël [Wolf et Wolf, 2004] décrits également dans le rapport Afsse 2005).

La nécessité de prendre en compte les préoccupations des populations concernées est attestée par l'analyse d'un *cluster* de cancers du sein dans une station de radiodiffusion de Brisbane en Australie. De 1994 à 2006, 10 cas de cancers du sein invasifs ont été diagnostiqués parmi les 550 femmes employées pendant quelque temps dans cette station, soit une augmentation du risque de plus de six fois par rapport à la population féminine du Queensland. Après une étude initiale non satisfaisante des facteurs de risque individuels (histoire gynécologique personnelle, grossesses, allaitements), une étude indépendante a été couronnée de succès lorsque les investigations se sont portées sur les facteurs environnementaux qui inquiétaient les employées ainsi que sur les agents qui auraient pu

[46] L'incidence correspond au nombre de nouveaux cas d'une pathologie donnée survenus dans une période donnée. Elle s'oppose à la prévalence qui inclut tous les cas dénombrés dans la période indépendamment de leur moment d'apparition.

être à l'origine du *cluster*. Bien qu'aucune cause spécifique n'ait été identifiée, les inquiétudes du personnel ont été prises en compte.

4.2 Bande de fréquences 9 kHz – 10 MHz

Rappelons que les bandes de fréquences étudiées dans cette saisine sont celles comprises entre 9 kHz et 300 GHz et que seules les bandes de fréquences de la téléphonie mobile ont été traitées dans les saisines Afsset de 2003 et 2005. C'est pourquoi, pour la bande de fréquence 9 kHz – 10 MHz (partie basse des radiofréquences, communément appelée fréquences intermédiaires - FI), la revue bibliographique inclut des publications antérieures à 2005.

Si les caractéristiques physiques d'une émission donnée déterminent les possibles effets biologiques, le grand nombre d'applications spécifiques, notamment industrielles amène à traiter séparément certaines technologies. Précisons que deux technologies ne sont toutefois pas traitées dans ce rapport car elles ont donné lieu à deux rapports récents de l'Afsset :

- les RFID, systèmes d'identification par radiofréquence et présents sur toute la bande de fréquence et jusqu'à 5,8GHz [Afsset, *Les systèmes d'identification par radiofréquences (RFID), évaluation des impacts sanitaires*, 2009]
- les lampes fluo compactes, émettant dans la bande 10 kHz-1 MHz, pour lesquelles l'Afsset a produit un protocole de mesure des émissions électromagnétiques [Afsset, *Analyse des champs électromagnétiques associés aux lampes fluorescentes compactes*, 2009].

On trouve dans la bande de fréquence située entre 300 kHz et quelques MHz de nombreuses applications, dites ISM (industrielles, scientifiques, médicales). Les systèmes industriels reposent le plus souvent sur l'électrothermie par induction. Cette induction provoque sur un corps conducteur l'apparition de tensions et courants induits dont le résultat est le chauffage par effet joule. Les applications sont nombreuses en milieu professionnel :

- dans l'industrie sidérurgique : fusion, chauffage, peinture à chaud, brasage, soudure, *etc*.,
- dans le secteur de l'électronique : purification de semi conducteurs, dégazage, *etc*.,
- dans l'industrie chimique : fusion, séchage, fabrication de fibres, *etc*.,
- ou dans l'agroalimentaire : cuisson, séchage, thermo scellement.

Si les niveaux de champ magnétique à la source peuvent être élevés, ceux réellement présents au niveau du poste de travail doivent respecter les valeurs limites d'exposition professionnelle recommandées. On trouve également des applications domestiques comme les plaques de cuisson à induction, ou bien les émissions liées aux temps de balayage des faisceaux des écrans cathodiques (VDU) (*cf.* Tableau 1).

Les limites d'exposition les plus communément utilisées concernant les expositions aux champs des fréquences intermédiaires sont extrapolées à partir des limites à plus basse fréquence (la stimulation électrique étant retenue comme effet critique) et à plus haute fréquence (l'effet thermique étant retenu comme effet critique).

En comparaison des études activement menées dans le domaine des champs très basses fréquences et radiofréquences, seul un nombre très limité d'études expérimentales ou épidémiologiques portent sur les effets biologiques et sanitaires des champs de fréquences intermédiaires (FI).

4.2.1 Terminaux cathodiques de télévision et d'ordinateur (VDU, VDT)

Bien que les technologies «à écran plat» supplantent progressivement les écrans cathodiques, un grand nombre de ces écrans reste encore en service. Le principe de fonctionnement d'un écran cathodique repose sur le balayage de l'écran par un faisceau d'électrons. Ce balayage est produit par un champ magnétique alternatif « en dents de scie » à une fréquence de 15 à 25 kHz, avec des harmoniques à plus faible intensité jusqu'à 125 kHz. Ces écrans génèrent différents types de champs électromagnétiques : champs électrostatiques, champs extrêmement basses fréquences liés à la fréquence d'alimentation de l'écran et des champs magnétiques de fréquences intermédiaires en « dent de scie » liés au balayage.

Reproduction et développement :

L'étude de Johansson [Johansson, 2001] propose un mécanisme biologique à la « dermatite des écrans » sous la forme d'une modification des populations de mastocytes cutanés observée dans le sens de l'augmentation (5 personnes sur 13) ou au contraire de la diminution (2 personnes sur 13) chez les personnes volontaires exposées plusieurs heures à des écrans. Cette étude n'exclut pas dans ses conclusions des facteurs concomitants possibles, d'autant qu'elle porte sur un faible effectif.

Après l'étude de Wu [Wu, 1998], celle de Tachi [Tachi, 2005] ne montre pas d'effets des expositions aux champs magnétiques des VDU sur l'induction de ruptures d'ADN sur modèle cellulaire (E. Coli en présence de phage lambda). Les études de Haga [Haga, 2005] ou Igarashi [Igarashi, 2005] (en présence de mutagène), et de Nakasono [Nakasono, 2005] sont, elles aussi, négatives.

Parmi les rares résultats positifs, deux publications du groupe de Bastide (Youbicier-Simo, 1997 ; Bastide 2001) effectuées sur des embryons de poulet et des poussins évoquaient des modifications de sécrétion de corticostérone, de mélatonine, et une baisse de la synthèse d'anticorps (anti thyrogobuline après sensibilisation) lors d'exposition chronique aux VDU ou aux GSM ; dans ce dernier cas, les constatations étaient retrouvées même lorsque l'exposition était réalisée en utilisant un écran en cuivre entre la source GSM et le sujet exposé. Dans leur étude antérieure (1995), cette influence pas plus que l'existence d'anomalies lors du développement n'avaient été retrouvées.

Les autres études de tératogénicité *in vivo* (croissance et mortalité fœtale, malformations, poids, longueur, taille de la tête, *etc*.) effectuées par ce groupe sur le même modèle (Kim 2004, Lee 2009) n'apportent pas d'élément en faveur d'un effet tératogène, pas plus que les études de Frölen (1993), Huuskonen1993), Wiley (2005) n'avaient montré d'effet de l'exposition chronique de souris CD1 gravides à des champs magnétiques (20 kHz) d'intensité échelonnée de 0,3 à 200 µT sur le poids, la tératogénèse ou l'existence d'anomalies viscérales ou osseuses.

A noter des résultats isolés présentés par Dimberg (1995) sur l'évolution post natale à long terme (J1 - J308) de souris exposées durant la gestation aux émissions VDU : diminution du poids du cerveau à J308, mais pas du cortex, du corps calleux, de l'hippocampe ou du cervelet; à J21, diminution du niveau d'ADN et augmentation d'activité de diesterase 2'3'nucléotide-cyclique (oligodendrocytes), de l'acetylcholinesterase et du NGF (facteur de croissance).

Effets cancérogènes : Lee *et al.* (2007) ont évalué les possibles effets cancérogènes d'un champ magnétique de fréqeunce 20 kHz de forme triangulaire et d'intensité 6,25 µT. Les conditions d'exposition ont été choisies pour correspondre au système d'émission Vidéo (VDU, écrans TV cathodiques) et aux limites d'expositions publiques coréennes. Le protocole expérimental comprend un groupe d'animaux exposé au seul champ et un groupe exposé au champ associé à un toxique chimique cancérogène pouvant induire une tumeur mammaire, pulmonaire ou cutanée. Les tumeurs mammaires sont obtenues chez des rates

Sprague Dawley par injection de diméthylbenzanthracène (DMBA), les tumeurs pulmonaires chez des souris ICR[47] par du benzopyrène (BP) et les tumeurs cutanées chez des souris femelles ICR par du DMBA ou du tetradecanoylphorbolester (TPA). Les animaux sont exposés durant 8 h par jour pendant 14 semaines pour les expérimentations sur les tumeurs mammaires, pendant 6 semaines pour les tumeurs pulmonaires et 20 semaines pour les tumeurs cutanées. Aucune tumeur n'a pu être observée chez les groupes exposés aux seuls champs radiofréquences. En outre les champs électromagnétiques des fréquences intermédiaires n'augmentent pas l'incidence des tumeurs induites par les agents chimiques. La principale faiblesse de cette étude réside dans l'utilisation de seulement 20 animaux par groupe (faible puissance statistique) alors que la plupart des études de cancérogenèse utilisent au moins 50 animaux par groupe. Les résultats positifs trouvés dans le passé portaient sur des souches à plus grande variabilité, y compris chez les témoins (CD1,CBA/Ca) [Huuskonen, 1998].
L'analyse de 10 études épidémiologiques réalisée par Marcus [Marcus, 2000] ne met pas en évidence d'effet de l'exposition aux fréquences intermédiaires sur l'incidence de tumeurs, tout en soulignant l'existence de nombreux biais de sélection et de méthodologie, et en s'abstenant de prendre position dans le cas de l'association : poste à haut stress et exposition à de vieux systèmes très émissifs (30 µT et plus). Cet effet n'est pas retenu dans la revue de Litvak [Litvak, 2002], pas plus que par les études de Huuskonen [Huuskonen, 1998], Juutilainen [Juutilainen, 1999 ; Juutilainen, 2005] ou par la synthèse effectuée par de Séze [de Séze, 2006] : les écrans vidéo ne sont pas considérés comme une source d'exposition significative aux champs électromagnétiques.
Les effets de ces fréquences sur le développement post natal [Dimberg, 1995] ou sur une action potentialisatrice des rayons X dans la genèse de leucémies chez la souris [Svedenstal, 1998] n'ont pas non plus montré de résultats significatifs. Les mêmes résultats négatifs ont été notés par Robertson [Robertson, 1996] lors d'expositions à 10 kHz à moyen et long terme durant la gestation et la croissance de modèles de souris B6C3F1.

Les revues de Jauchem [Jauchem, 2003 ; Jauchem, 2008] portent sur les effets génotoxiques, immunitaires, cancérigènes, cardiovasculaires, ainsi que sur la reproduction et le système nerveux pour les fréquences de 3 kHz à 300 kHz. Elles concluent à propos des VDU qu'il n'y a pas d'argument en faveur d'effets des rayonnements sur le système immunitaire, ou autres effets néfastes. Quand elles existent, les différences sont minimes et non significatives.

L'étude cas-contrôle de Windham [Windham, 1990], effectuée chez des femmes ayant eu un avortement spontané dans les 20 premières semaines de grossesse n'avait pas montré un excès de risque chez celles qui étaient le plus exposées (6 groupes selon l'activité professionnelle et l'exposition potentielle aux VDU), tout en observant un retard de croissance intra utérin sans répercussion à la naissance. Plus tard, Lindbhom et Hietanen [Lindbhom et Hietanen, 1992] avaient trouvé un excès d'avortements spontanés observés dans les groupes de femmes les plus exposées durant la grossesse, tout en n'écartant pas la possibilité de biais de catégorisation, ce qui limite de fait la portée de ce travail.

Hypersensibilité électromagnétique (EHS)[48] :

Oftedal [Oftedal ; 1995] avait initialement trouvé que la réduction par écrantage du champ électrique émis par les terminaux s'accompagnait d'une baisse des signes fonctionnels cutanés. Le même auteur a, par la suite, infirmé ses résultats dans son étude de réplication portant cette fois sur les signes cutanés, oculaires et nerveux [Oftedal ; 1999]. Par la suite, les groupes de Sternberg [Sternberg, 2002] puis Bergdahl [Bergdahl, 2004] séparaient les

[47] Imprinting Control Region – désigne une forme de modification génétique de souris.

[48] L'EHS est aussi appelée IEI, intolérance environnementale idiopathique

manifestations cutanées isolées des séméiologies nerveuses aspécifiques (fatigue, perte de mémoire) en soulignant qu'une prise en charge psychologique pouvait être efficace sur les signes cutanés isolés, et qu'au contraire les manifestations nerveuses n'étaient pas affectées par cette prise en charge. Au contraire, l'étude suédoise d'Eklöf [Eklöf, 2006] reposant sur l'implication des personnels, la gestion autonome et le suivi ergonomique mettait en évidence une amélioration de l'état de santé des personnels (signes fonctionnels, douleurs articulaires) au travail (et une amélioration du rendement). Par ailleurs, Tashibana [Tashibana, 1998], puis Nagasawa [Nagasawa, 2002] dans leurs enquêtes par questionnaires portant respectivement sur 219 personnes et sur 25 000 personnes (sur 3 ans) estiment que les perturbations subjectives (sommeil et performances mentales) augmentent avec la durée quotidienne d'exposition, mais évoquent l'importance des facteurs psycho sociaux et environnementaux autres que l'exposition aux VDU. Enfin, l'influence des VDU sur l'apparition de symptômes assimilés à l'IEI n'est pas retenue dans les conclusions du congrès « *Electromagnetic Hypersensitivity, Prague, 2004* ».

Pour mémoire, on peut mentionner une étude ancienne de Fiskeisjö [Fiskeisjö, 1988] portant sur la culture de bulbes d'ail exposés à des distances variables à des écrans TV qui n'a pas montré d'effet sur la croissance des racines, ou sur la mitose des cellules des tiges, ni sur l'élongation des centromères des chromosomes métaphasiques.

Les études relatives aux terminaux cathodiques de télévision et d'ordinateurs ne suggèrent pas de risque pour la santé humaine à des niveaux d'exposition non thermiques, c'est-à-dire dans valeurs limites d'exposition professionnelle recommandées. Les rares études épidémiologiques sont négatives et de portée limitée, d'autant que les niveaux d'exposition ne sont pas précisément connus.

Les études cellulaires animales ou végétales ne montrent pas d'effet, à court ou moyen terme. Les résultats portant sur l'embryogénèse ou la cancérogénèse sont rares et contradictoires.

La majorité des études ne suggèrent pas d'effets sanitaires, à l'exception de quelques résultats peu pertinents montrant une légère augmentation de malformations morphologiques mineures chez l'animal. Ces effets potentiels semblent limités à des souches animales spécifiques et ne sont pas extrapolables à l'homme.

Au vu du petit nombre de données disponibles, il persiste au moins une zone d'incertitude quant aux effets biologiques dans ces bandes. Il est cependant nécessaire, avant de pouvoir réaliser les études fondamentales et épidémiologiques, de pouvoir caractériser correctement les expositions.

4.2.2 Plaques de cuisson domestiques à induction

Les cuisinières à induction utilisent des fréquences de 20 à 50 kHz.
Selon la synthèse de de Séze [de Séze, 2006], les niveaux de champ estimés par des calculs préliminaires montrent des niveaux locaux de courants induits, à hauteur des mains par exemple, qui pourraient dépasser les valeurs recommandées existantes, sans que les implications en termes de santé soient bien claires à ce jour. Cette estimation est retrouvée dans la revue de Litvak [Litvak, 2002] qui relève des intensités à proximité des plaques de l'ordre de 0,7-1,6 A/m (à 30 cm) et jusqu'à 25 A/m en surface de bobine.

Effets génotoxiques ou tératogènes : Pour les études *in vitro*, Fukjita (2007) a développé un modèle thermorégulé, comprenant un bobinage inclus dans l'incubateur, opérant à 23 kHz. Ce bobinage a été utilisé dans l'étude de Miyakoshi (2007) : celui-ci a étudié les possibles effets génotoxiques des champs magnétiques similaires à ceux émis par les plaques de cuisson domestique à induction. Des cultures cellulaires et des bactéries ont été exposées

durant 2 heures à un champ magnétique de 23 kHz d'intensité 532 µT. Ces tests ont compris :

- des tests de mutagénicité (Test *Ames*) sur 3 souches bactériennes de *S. Typhimurium* (TA98, TA100, TA1537) et 2 souches de *E. Coli* (WP2 uvrA, WP2 uvrA Pkm101) ;
- des tests micronoyaux de blocage des cytokines sur cellules de hamster chinois CHO–K1 ;
- des tests des comètes (cassures des brins d'ADN) sur cellules CHO-K1 ;
- des études des mutations génétiques du gène HPRT sur cellules de hamster chinois V-79 ;
- des études de la prolifération cellulaire sur cellules CHO-K1.

Aucune différence significative n'a cependant pu être mise en évidence quelles qu'aient été les conditions d'expositions. Les auteurs ont ainsi conclu à l'absence d'effets génotoxiques des expositions aux champs magnétiques de fréquences intermédiaires aussi bien sur les bactéries que sur les cellules de mammifères. Cependant, le nombre de répétitions de l'expérimentation est faible. La puissance statistique de cette étude est donc également faible.

Seules quelques études *in vitro* ont été réalisées. Elles portent sur les effets génotoxiques et tératogènes des plaques à induction et se sont avérées négatives. Toutefois, leur usage domestique peut concerner un grand nombre d'individus dans la population. Ces sources d'exposition peuvent être rapprochées des applications industrielles opérant dans les mêmes fréquences (typiquement 27 MHz pour les scellements plastiques par induction) qui sont traitées dans le chapitre suivant.

4.2.3 Chauffage, soudure, scellement par induction et chauffage diélectrique

Ces applications, qui débordent sur les deux gammes 9 kHz - 10 MHz et 10 MHz - 400 MHz sont traitées ensemble dans ce chapitre.
Bien que l'exposition du public à ces applications ne soit pas identifiée à ce jour, il semble utile d'en étudier les effets biologiques à partir des données disponibles, qui sont issues des expositions professionnelles.

Niveaux d'exposition : Les systèmes industriels par induction, qui opèrent dans la gamme 50 Hz - 2 MHz avec des puissances de l'ordre du kW au MW, peuvent produire les champs magnétiques les plus intenses rencontrés en milieu industriel [Mantiply, 1997 ; Litvak, 2002, Scenihr, 2007]. Ils opèrent le chauffage de pièces métalliques chauffantes ou conductrices. Les champs magnétiques sont obtenus par le passage dans des bobines de quelques dizaines de centimètres de diamètre de courants très intenses. Les champs obtenus sont très intenses mais décroissent rapidement avec la distance. Des champs électriques sont également produits par la présence de haute tension dans la bobine elle-même. Le travail de Mantiply [Mantiply, 1997] portait sur 7 bandes de fréquences (des très basses fréquences aux extrêmement hautes fréquences), et effectuait des mesures du champ électrique (E), du champ magnétique (H), du rapport cyclique et de la modulation. Cette étude considérait déjà que les niveaux les plus élevés sont rencontrés pour les systèmes de chauffage diélectrique et d'induction industriels et dans les zones proches des antennes d'émission radio. Plus tard, Loderus [Loderus, 2002] a effectué la mesure en champs E et H, en courants induits et sous différentes configurations de systèmes professionnels. Avec la collaboration des industriels, les résultats étaient présentés sous la forme de tableaux de valeurs typiques susceptibles d'être utilisées comme référence dans les travaux expérimentaux. Par exemple, les valeurs les plus importantes ont été relevées pour des fours à induction (0,48 - 7 kHz) en E et H (jusqu'à 2 kV/m et 87,3 A/m), comme sur les chauffages à induction (3,8 kHz – 1,25 MHz).

Par comparaison, les systèmes de contrôle électromagnétiques (EAS[49]-RFID) peuvent atteindre 1 kV/m, avec une faible composante H et les courants induits par les appareils médicaux sont de l'ordre de 5-13 mA.

Benes [Benes, 2008] a procédé par bande de fréquence à la mesure des niveaux d'exposition occasionnés par les appareils de chauffage diélectrique sur une journée de travail à l'aide d'analyseurs de champ (appareils de séchage-collage d'agglomérés : fréquences dans la bande 3-50 MHz, avec harmoniques jusqu'à 77-79 MHz (-30 dB)). Les niveaux mesurés des champs E et H dépassent les valeurs limites d'exposition du public dans tous les cas, et ceraines mesures de H présentent des dépassements des valeurs limites professionnelles recommandées (sur 6 minutes). Dans tous les cas, une mise à la terre efficace améliore le profil d'émission.

Effets cardio-vasculaires : dans l'hypothèse d'effets liés à la présence de courants locaux sur les tissus excitables, Wilen [Wilen, 2004] a étudié l'exposition des professionnels opérant sur des appareils de scellement pour plastiques à 27 MHz. Les résultats de mesure de paramètres subjectifs (chaleur, maux de tête, fatigue, *etc*.) et objectifs (électrocardiogramme sur 24 h) ne montrent pas d'association entre l'exposition évaluée par l'indicateur (champ x durée d'exposition) et les signes subjectifs étudiés (maux de tête, fatigue, chaleur). Par contre, une baisse de fréquence cardiaque moyenne sur 24 h et des épisodes de bradycardie plus nombreux ont été observés chez les exposés. Signalons que les mesures de champs effectuées sur 6 minutes ont montré que dans 1/3 des cas (16/46), les valeurs mesurées (jusqu'à 2 kV/m et 1,5 A/m) excédaient les valeurs limites de l'Icnirp (107 V/m et 0,24 A/m). Une autre étude du même auteur (2007) a montré, plutôt qu'un rythme nocturne plus lent, une plus grande variabilité des mesures chez les sujets exposés. L'auteur rapporte cette observation à une adaptation du système nerveux autonome (par activation de la voie parasympathique) chez des personnes soumises à des expositions longues à bas niveau, plutôt qu'un mécanisme thermique simple.

Cancers : A notre connaissance, aucune étude de cancérogénèse n'a été entreprise spécifiquement sur les effets des utilisations industrielles de chauffage, soudure, scellement par induction et chauffage diélectrique. La revue d'études de cohorte de Breckenkamp (2003) consistait en une évaluation de 9 études de cohortes rétrospectives effectuées entre 1982 et 2002. La taille des échantillons variant de 304 (3 362 personnes-années) à 200 000 (2,7 millions personnes-années). Ces études portaient sur les chauffages diélectriques, les entreprises de traitement des plastiques, les professionnels utilisant des communications sans fils (police, urgences) les radars militaires et de la police canadienne, et des applications militaires proches de l'impulsion électro-nucléaire. Dans tous les cas sauf un, l'exposition en durée n'était estimée que par des réponses oui/non. Les questions portaient sur différentes variétés de cancers, mais aucune mesure d'exposition n'est mentionnée. La conclusion de ce travail était que, malgré la forte probabilité de biais, il n'y avait aucune évidence de l'action des hautes fréquences comme élément causal de cancers.

Paramètres biologiques : un article ancien de Dobrev [Dobrev, 1982] s'intéressait aux niveaux d'exposition professionnels de sources variées (soudage de plastiques, tours d'émission TV et modulation d'amplitude (AM), relais de télécommunications, *etc*.). Parallèlement aux mesures des niveaux d'exposition sur les lieux de travail, des examens cliniques, fonctionnels, paracliniques, biochimiques et immunologiques ont été pratiqués sur 390 personnes travaillant dans ces milieux. Chez les personnes examinées, des modifications biologiques ou des troubles cliniques ont été attribués aux expositions radiofréquences en proportions variables selon les professions : 28,6 % des employés dans l'industrie du plastique, 31 % chez les travailleurs dans les télécommunications HF, 71 % dans le domaine de la métallurgie, soit 15,1% des travailleurs examinés.

[49] EAS : *electronic article surveillance* – portiques anti-vol.

Spermatogenèse et taux hormonaux : comme précédemment, des mesures des champs électrique et magnétique ainsi que des courants ont été effectuées sur les travailleurs employés au soudage plastique dans le travail de Grajewski [Grajewski, 2000]. Ces mesures de champ sont effectuées en champ proche et accomagnées de mesures des courants induits dans les pieds. Dans tous les cas, les niveaux ne dépassaient pas les valeurs limites. Les études portant sur la qualité du sperme (33 paramètres) et les niveaux hormonaux (4 paramètres) ont été effectués sur un nombre limité de sujets (12 personnes professionnellement exposées à des systèmes industriels de chauffage et 34 témoins). Elles n'ont pu montrer que des différences non significatives pour les niveaux de FSH (*follicule stimulating hormone* – folliculostimuline). L'auteur indique lui-même que la portée de l'étude est limitée et doit être complétée.

A propos de ces applications, il apparaît que les niveaux d'exposition professionnelle peuvent être dépassés. Des solutions technologiques sont théoriquement possibles (mise à la terre par exemple). La connaissance du niveau d'exposition en différentes configurations et la réalisation d'études épidémiologiques rigoureuses sont nécessaires pour évaluer d'éventuels effets biologiques.

4.2.4 Autres données sur les effets cellulaires

Génotoxicité et développement :

Nakasono [Nakasono, 2007] a observé les effets liés à des expositions à niveau élevé (jusqu'à 140 fois les valeurs limites de l'Icnirp) à 2 Hz, 20 Hz et 60 kHz sur des cultures de cellules V-79 de hamster, à la recherche de cellules binucléées ou de micronoyaux, d'anomalies de réparation de l'ADN (test mitomycine) ou d'anomalies de croissance embryonnaire durant l'organogenèse (20 kHz, vertical, de J1-J11). Aucun résultat significatif n'a été trouvé. Similairement, Morandi [Morandi, 1996] n'avait pas trouvé d'effet génotoxique lors d'expositions à 60 Hz, 600 Hz et 6 kHz (300 V/m, 0,3 mT, champs E, H ou combinaison des deux) de *Salmonella typhimurium* (TA97a, TA98, TA100, et TA102) en expositions isolées ou combinées sur 48h (test de *Ames* à la recherche de mutations réversibles). Aucun effet n'a également été retrouvé sur les niveaux d'IL-1 et IL-6 sur des cellules péritonéales de souris cultivées en présence de LPS[50] dans les mêmes conditions d'exposition.

Abou-Ali [Abou-Ali, 2002] s'est intéressé aux stades précoces de l'embryogenèse sur un modèle d'œufs d'amphibien (*axolotl*) en observant les mouvements spontanés (l'enregistrement vidéo est traité après observation) dans une cellule d'électrorotation (émission de 10 Hz à 5 MHz, à l'aide d'un quadripôle à électrodes déphasées de 90°, à un niveau allant jusqu'à 700 V/m). Au stade *pregastrula* et *neurula* aucun effet n'est observé, mais des modifications de sens de la mobilité sont présentes au stade *gastrula*, modifications variables selon la fréquence (dans le sens du champ à 1 - 2 MHz, à l'opposé du champ à 1 kHz). Le modèle dipôle simple n'explique pas ces effets, pas plus que la fragilisation de certains embryons.

Toxicité cellulaire :

Le travail de Giladi [Giladi, 2008] montre un effet bactéricide potentialisant l'action du chloramphenicol sur des cultures de staphylocoques dorés ou de *pseudomonas aeruginosa*, en utilisant des champs électriques alternatifs de faible niveau (2 - 5 V/cm) entre ces électrodes isolées dans la gamme 0 - 50 MHz selon un principe similaire à celui de l'étude de Kirson [Kirson, 2008]. Le chloramphénicol est un antibiotique actif sur ces deux souches.

[50] Lipoplysaccharide.

L'application du champ se traduit par une augmentation de l'effet bactéricide de l'antibiotique (potentialisation de la toxicité sur les bactéries). Comme dans les études du groupe de Kirson, le mécanisme invoqué est une action sur la croissance des microtubules lors de divisions cellulaires. La même observation est faite par Caubet [Caubet, 2004] sur des cultures d'E. Coli à propos de l'efficacité de la gentamycine couplée avec l'exposition à 10 MHz ; l'hypothèse d'une action directe sur les molécules polaires du biofilm cellulaire est avancée.

4.2.5 Utilisations thérapeutiques et médicales

Prolifération tumorale : L'effet de champs électriques, connu sous le nom de diélectrophorèse, consiste en l'alignement forcé de molécules polaires dans le champ et leur déplacement vers le champ le plus intense [Polk, 1995]. Les champs électriques et les courants résultants, quand ils sont assez intenses, peuvent stimuler les tissus excitables, nerfs, cœur et muscles. Des champs bien plus intenses peuvent endommager les cellules, et par exemple retarder ou bloquer la multiplication de cellules cancéreuses. Des études plus anciennes considéraient que des champs pour des fréquences de l'ordre de 100 kHz ou plus n'avaient pas d'effets biologiques significatifs [Goater, 1998 ;Takashima 1985]. L'équipe de Kirson [Kirson, 2004 ; Kirson, 2006 ; Kirson, 2007 ; Kirson, 2008 ; Tovarys, 2009 ; Barbault, 2009] s'est intéressée aux effets des fréquences intermédiaires sur la croissance des cellules tumorales, reliés à un mécanisme « anti-tubule ». Les champs (dans la gamme 50 - 30 kHz) sont délivrés par des micro électrodes, d'abord *in vitro*, puis sur des modèles animaux (lignées tumorales U118, U87, H1299, MDA231, PC3, B16F1, F98, C6, RG2, CT26 ; tumeurs animales C57BL/6, Balb/C sur souris) [Kirson, 2004]. Ils sont ensuite délivrés *in vivo* sur des séries d'animaux (mélanomes implantés chez la souris, gliomes sur des rats et lapins sains afin de déterminer les conditions en fréquence, durée et intensité, puis dans le cadre d'une étude pilote (18 h / j, 200 kHz) est réalisée chez des patients atteints de glioblastomes polymorphes et enfin de malades porteurs de cancers différents (carcinome du sein, et carcinome pulmonaire non à petites cellules). Des effets significatifs ont été observés sur la croissance tumorale et la survie des malades (jusqu'à doubler la survie de malades atteints de glioblastomes récidivants). L'étape suivante a été d'identifier, pour chaque type de cellule tumorale étudiée, la fréquence la plus « efficace » pour inhiber la croissance [Barbault, 2009], et d'utiliser des émissions à modulation d'amplitude. Une autre voie en développement est la combinaison des ces champs avec la chimiothérapie classique [Tovarys, 2008] dont les premiers résultats semblent montrer une action synergique.

D'autres applications thérapeutiques sur la cicatrisation des tissus mous et les consolidations de fractures pseudarthrosées ont été évoquées par Polk [Polk, 1995].

4.2.6 Conclusions pour la bande 9 kHz – 10 MHz

Peu d'études expérimentales et épidémiologiques sont disponibles concernant les effets des champs électromagnétiques des fréquences intermédiaires sur la santé.

Elles ne permettent pas de conclure quant à l'existence ou non d'effet délétère lié à des niveaux d'exposition non thermiques. On retient cependant la difficulté de caractérisation de l'exposition dans ces bandes de fréquences, et la nécessité d'entreprendre des études pilotes de caractérisation des sources d'émission avant de lancer des études épidémiologiques. A noter que les niveaux d'exposition professionnels peuvent être dépassés dans certaines applications industrielles.

En raison de l'accroissement de l'exposition à ce type de rayonnement, il est important d'entreprendre de nouvelles études, et ceci particulièrement pour des expositions chroniques de faibles puissances permettant de confirmer la bonne adéquation des valeurs limites.

On note également quelques publications mentionnant des effets sur des systèmes cellulaires en division, qui mériteraient d'être poursuivies.

Eu égard au faible nombre de données, il persiste une zone d'incertitude qui empêche de proposer des conclusions définitives. Il apparaît donc nécessaire de réaliser des études épidémiologiques et des recherches *in vitro* et *in vivo*, dans cette bande de fréquences, portant en particulier sur la reproduction et le système nerveux.

4.3 Bande de fréquences 10 MHz – 400 MHz

Dans cette partie ne sont traitées que les applications de radiodiffusion et tétédiffusion. Les communications « sans fil » (DECT, GSM) sont examinées dans le paragraphe suivant.

On trouve dans cette gamme des applications industrielles, scientifiques et médicales (ISM), essentiellement à 27,12 MHz, 40,68 MHz et 13,56 MHz. Les applications industrielles sont principalement les presses hautes fréquences, et les industries du bois et textile (soudage collage, séchage). La gamme de fréquences des machines industrielles se place entre 3 MHz et 3 GHz. L'effet physique résulte de la charge électrique induite dans un matériau diélectrique placé dans un champ électrique. Si le champ est alternatif, les pertes énergétiques résultant des inversions répétées de charges se transforment en chaleur.

Les applications aux télécommunications dans cette bande regroupent essentiellement la radiodiffusion (bande FM de 88 à 108 MHz), la télévision (VHF de 30 à 300 MHz et UHF de 300 MHz à 3 GHz), les CB et *talkie-walkie* (27 et 433 MHz). Les applications médicales, recouvrent des applications à vocation diagnostique comme l'IRM, qui présente à la fois un champ statique dont le niveau peut atteindre 2 à 3 Teslas, et des radiofréquences impulsionnelles ou à gradients dans la gamme 50-100 MHz. Pour les utilisations scientifiques de l'IRM (résonance magnétique nucléaire), les champs statiques et radiofréquences s'échelonnent dans les gammes 8-20 T et 300 MHz-1 GHz, respectivement. On peut citer comme applications thérapeutiques la diathermie, la thermothérapie, la chirurgie par radiofréquence et la stimulation transcrânienne.

4.3.1 Applications FM-RADIO-TV (RTV): (80 - 400 MHz)

Ce type d'émission existe depuis les débuts de la radiodiffusion. Etant donné que les tours d'émissions hertziennes sont généralement hautes et que l'émission est orientée pour une portée lointaine (à l'horizon), l'exposition au niveau du sol est généralement faible. Il est nécessaire cependant d'aborder différemment l'exposition résidentielle (zones publiques autour des émetteurs) et l'exposition professionnelle (zones d'accès restreint à proximité des émetteurs). Une des grandes limitations aux enquêtes épidémiologiques est la difficulté d'évaluer les expositions, qui par définition sont discontinues dans le temps et hétérogènes dans l'espace.

4.3.1.1 Exposition résidentielle

4.3.1.1.1 Effets biologiques

Boscolo [Boscolo, 2001 ; Boscolo, 2006] s'est intéressé au retentissement immunitaire de l'exposition chronique résidentielle des femmes. Pour cela, il a mesuré les niveaux de champ sur les balcons (moyenne de 4,3 ± 1,4 V/m en 2000, puis 3,7 ± 1,3 V/m en 2005). La comparaison a été réalisée par rapport à une population témoin (avec une exposition environnementale inférieure à 2 V/m). Des groupes comparables en âge (43), habitudes, tabagisme, niveau social ont été réalisés, et les niveaux d'anxiété intrinsèque ou temporaire ont été évalués par des tests (STAI I et II). Les tests biologiques ont porté sur les propriétés cytotoxiques du sang et les sous populations lymphocytaires. Ils ont montré des rapports STAI I/II moins élevés chez les exposés, une activité cytotoxique significativement plus faible ($p < 1$ %), et des pourcentages de lymphocytes B CD45+ et CD19+ plus élevés ; à l'inverse, le taux de cellules CD45+, CD8+ et CD3+ était plus bas (5 %) chez les exposés. L'activité cytotoxique des NK CD45, CD16, CD56 est inversement corrélée avec les STAI I et II. L'auteur discute la possibilité d'un effet des rayonnements médié par l'anxiété et le système

nerveux, ou une autre cause liée au mode de vie. Une étude, proche dans le principe, [Clark, 2007] porte sur la corrélation entre sécrétion de mélatonine et d'œstrogènes et l'exposition résidentielle dans les bandes de fréquences radio-TV et du courant domestique (60 Hz) (niveaux classés en fort - 4 µW/cm^2 -, moyen - 0,5-4 µW/cm^2 - et faible - inférieur à 0,5 µW/cm^2). Les mesures sont effectuées sur 2,5 jours par une sonde NARDA, le positionnement par GPS, et le champ 60 Hz mesuré en continu (EMDEX). Un questionnaire est également employé pour exclure de l'analyse les sujets à fort risque d'erreur (traitements intercurrents, alimentation, statut endocrinien, *etc*.). Les tests biologiques sont la mesure de l'excrétion nocturne des métabolites urinaires (6-OHMS pour la mélatonine et E1G pour les œstrogènes). Les conditions d'exposition ont été regroupées en 4 classes de niveau ; les populations ont été classées par groupes (3 periodes du cycle pour les femmes non ménopausées, et deux classes de femmes en périménopause ou ménoposées). L'analyse a été effectuée par groupe et globalement (N = 83) en utilisant le logiciel SAS. Une analyse multivariée a été effectuée en utilisant le seuil de significativité de 10 %. Aucun effet de l'exposition n'est mis en évidence avant la ménopause ; chez les femmes ménopausées, une association entre forte exposition résidentielle, proximité et visibilité de l'émetteur d'une part, et augmentation de l'excrétion de E1G est identifiée. Cette association est spécialement retrouvée chez les personnes présentant un niveau de base de 6-OHMS qui pourraient constituer un sous-groupe sensible.

Alpeter [Alpeter, 2006] s'est également intéressé au cycle de la mélatonine ainsi qu'à la qualité du sommeil dans une population proche d'une tour hertzienne lors de son arrêt (6-22 MHz, radio-TV). L'étude a été menée durant une semaine avant l'arrêt et une semaine après l'arrêt. L'excrétion de mélatonine a été modélisée (modèle sinusoïde COMPLEX-COSINOR) et la sécrétion obtenue par calcul (intégration temporelle). Il a observé une différence à la fois dans la sécrétion de mélatonine sous forme d'un rebond lors de l'arrêt de l'exposition, et dans la qualité du sommeil, meilleur après l'arrêt. Dans la discussion, la possibilité d'un effet *nocebo* a été analysée, et aucune relation causale n'a été formellement identifiée.

4.3.1.1.2 Effets cancérigènes

Nous ne reprenons pas dans le détail les études anciennes australienne [Hocking], radio-vatican [Michelozzi, 2001] et anglaise [Dolk, 1997a, 1997b]. Celles-ci avaient trouvé une augmentation de l'incidence des cancers dans les populations proches des tours d'émission radio-TV, mais souffraient de faibles effectifs, de biais probables et de l'absence de relation dose-effet. On peut se rapporter à la revue de Schütz [Schütz, 2008] pour plus de précisions.

L'étude de Merzenich [Merzenich, 2008] est une étude cas-témoins portant sur les hémopathies malignes de l'enfant de 3 à 14 ans (Leucémies Lymhpoïdes Chroniques, Leucémies Myéloïdes Chroniques, syndrômes myéloprolifératifs, myélodysplasies) dans l'entourage de 16 tours d'émission radio TV. L'identification des cas a été réalisée sur une période 1984 - 2003 à partir des registres des cancers. Trois témoins appariés sur le sexe, l'âge et la zone par rapport à l'émission ont été attribués à chaque cas. L'étude porte finalement sur 1 959 cas et 5 848 témoins. L'analyse a été effectuée par régression logistique conditionnelle. Cette étude ne montre pas d'incidence de la proximité des antennes de radiotélé-diffusion avec la fréquence de survenue de leucémies infantiles.

L'étude sud coréenne de Ha [Ha, 2007] est une étude de cohorte sur les tumeurs cérébrales et les leucémies infantiles dans l'entourage de 31 tours d'émission AM (modulation d'amplitude) sur 1 926 cas et 3 082 témoins recrutés entre 1993 et 1999. Un excès de leucémies a été observé dans un périmètre de 2 km (OR = 2,15 [IC95 % : 1 – 4,67]). Un OR égal à 0,86 [IC95 % : 0,67 - 1,11] a été observé entre les quantiles supérieur et inférieur d'exposition, ce qui ne va pas dans le sens d'une relation croissante avec l'exposition. Pour les puissances crêtes les plus élevées, aucune différence n'a été montrée pour l'ensemble des leucémies, mais l'incidence des leucémies lymphoïdes était accrue alors que celle des

leucémies myéloïdes était diminuée. Aucun effet sur les tumeurs cérébrales et cancers infantiles (toutes localisations) n'est mis en évidence. L'auteur discute lui-même les limites de l'étude : pas de prise en compte de l'influence sur la grossesse, l'évolution des tours, l'association aux autres sources (GSM, *etc*.).

Les revues d'Ahlbom [Ahlbom, 2004 ; Ahlbom, 2008] confirment le peu de données valables sur les contributions relatives des différentes sources. Aucun élément tangible n'est relevé sur l'exposition résidentielle des enfants et les potentiels effets délétères : tout au plus les résultats publiés se focalisent sur de rares affections, cancers du cerveau et leucémies. Sur ces derniers points, les études récentes : [Merzenich, 2008] et [Poolel 2006] (revue de 142 références, non spécifiques des rayonnements mais qui attire l'attention sur la prise en compte attentive des différents critères environnementaux et socio économique dans l'analyse de risques), [Schütz, 2008] (revue bibliographique portant à la fois sur les associations possibles entre exposition aux extrêmement basses fréquences et aux radiofréquences, qui suggère que des études épidémiologiques supplémentaires ne s'imposent pas en l'absence d'éléments tangibles, [Solenova, 2004] (étude de cohorte de la mortalité générale et par cancer chez les travailleurs dans les environnements TV selon les postes de travail) sont négatives mais, s'appuyant sur le fait que l'enfant est plus sensible aux « toxiques environnementaux » que peuvent être les ondes, Kheifets [Kheifets, 2005] souligne la nécessité de poursuivre la recherche depuis la conception jusqu'à la maturité.

Des études anciennes réalisées sur les expositions résidentielles associées aux tours d'émission hertziennes radio FM et TV avaient montré une augmentation de l'incidence des cancers dans les populations proches des tours. Leurs limites méthodologiques empêchaient de conclure à la causalité. Les deux études cas-témoins récentes réalisées chez les enfants sur les leucémies pour la première, sur les leucémies et les tumeurs cérébrales pour la seconde ne permettent pas de conclure sur les effets cancérigènes potentiels des expositions résidentielles associées aux tours d'émission hertziennes radio FM et TV. Les résultats sur les leucémies sont contradictoires entre les deux études et difficiles à interprêter en l'absence de données précises sur l'exposition. L'étude sur les tumeurs cérébrales ne montre pas d'effet.

4.3.1.2 Exposition professionnelle

Bien que l'exposition professionnelle sorte du champ de la saisine, les données présentées ici apportent des éléments complémentaires et nécessaires à l'étude des effets biologiques. Plus qu'un éventuel effet biologique, c'est l'exposition professionnelle et sa conformité avec les valeurs limites qui a suscité l'intérêt des équipes de recherche. Dès 1981, Mild [Mild, 1981] avait procédé à des mesures de champ électromagnétique autour de 11 stations FM-radio-TV en Suède. Les niveaux mesurés en 1981 pouvaient excéder les valeurs limites alors en vigueur. Il recommandait de couper l'émission en cas d'intervention. En cas de travail à effectuer sur un émetteur, même courant coupé, des niveaux élevés pouvaient être rencontrés, l'émetteur coupé se comportant comme un récepteur accordé sur les autres stations : l'antenne reçoit les rayonnements et les réémet passivement. Plus tard Zmyslony [Zmyslony, 2001] a effectué des mesures similaires parmi le réseau polonais de stations d'émission radio et TV (essentiellement constitué de mâts ou de tours de 20 m et plus) et établi une estimation de l'exposition sur le modèle de 3 stations types. La bande dominante d'exposition recouvre les UHF-VHF, restant dans les valeurs limites professionnelles recommandées. Comme lui, Alanko [Alanko, 2007] retrouve cette conformité avec les niveaux professionnels Icnirp lors de mesures effectuées sur deux tours de moyenne puissance.

4.3.1.2.1 Effets sur le système cardiovasculaire

Parmi les investigations rares de possibles effets de l'exposition chronique, on retrouve essentiellement des travaux sur le système cardiovasculaire. Borkiewicz [Borkiewicz, 1996]

s'est intéressé à la variabilité de la fréquence cardiaque chez les travailleurs exposés dans des stations d'émission (71 personnes), par rapport à un groupe travaillant dans les mêmes conditions à l'abri des émissions (22 personnes). Les spectres de variabilité cardiaque sont étudiés en fréquence, en spectres de puissance (transformée de Fourier) et analysés statistiquement (χ2, test–t , *U-Mannn Whittney*). Aucune différence dans les domaines fréquentiels ou temporels n'a été mise en évidence entre les deux groupes. Il n'y avait pas de corrélation entre spectres en puissance et âge dans le groupe des exposés, contrairement au groupe témoin (corrélation négative significative entre puissance d'émission et spectre en puissance hautes fréquences). L'auteur concluait à une implication probable des régulations neurovégétatives de la fonction cardiaque chez les sujets exposés.

Vangelova [Vangelova, 2006] a recherché de possibles effets à long terme de l'exposition professionnelle des travailleurs des stations de radio diffusion (6- 25 MHz) (N = 49) et TV (66-900 MHz) (N = 61) par rapport à une population témoin (N = 110). Pour cela, elle a procédé à des mesures de champs électriques et de densités de puissance moyennes et maximales pondérées dans le temps par bande de fréquence. Elle a réalisé un bilan global (biologie, habitudes, TA, IMC, biologie, alcool, tabac, charge de travail, nutrition, antécédents familiaux/personnels). Elle a ainsi relevé des différences très significatives sur la TA (systolique et diastolique), le cholestérol total et le rapport entre HDL et cholestérol, leLDL, mais pas sur les triglycérides, le taux de HDL et l'IMC. Dans la discussion, un lien entre exposition et cholestérol/LDL (eux-mêmes impliqués dans la genèse de HTA) est suggéré. A l'inverse, Barker [Barker, 2007] a étudié (protocole MTHR) les conséquences de l'exposition chronique sur la TA, le rythme cardiaque, les catécholamines, sur 120 volontaires (exclusion de l'étude de cas particuliers : HTA traitée ou non, lunettes, *etc*.) sans montrer aucun effet significatif. Un même résultat négatif est présenté par Obelenis [Obelenis, 2007].

4.3.1.2.2 Dosimétrie-Métrologie

Du fait de la variabilité des mécanismes potentiels d'interaction des ondes dans la bande considérée, différents critères métrologiques doivent être séparés selon les fréquences. Jokela [Jokela, 2007] considère que la densité de puissance corps entier moyenne est le critère de référence au dessus de 500 MHz (l'estimation du DAS n'est pas requise si la valeur crête spatiale n'excède pas de 6 dB la valeur moyenne). Entre 5 Hz et 50 MHz, la mesure des courants induits est retenue comme une méthode d'estimation du champ magnétique. Pour un champ inhomogène en dessous de 100 kHz, la mesure de densité de flux magnétique dans le corps et la tête sont une bonne approche pour limiter l'exposition du système nerveux central, soit par comparaison de chaque composante avec les valeurs de référence de la fréquence, soit en filtrant la forme d'onde ou sa dérivée dans le temps, les valeurs obtenues pouvant être comparées avec les valeurs de référence de l'Icnirp.

Qu'il s'agisse d'exposition résidentielle ou professionnelle, une limitation importante des études réside dans la difficulté d'aborder simultanément et sur des durées prolongées des émissions multifréquences, de niveaux variables et intermittents. Pour cela, trois voies sont suivies, l'étude sur des volontaires, l'utilisation de modèles et de fantômes et, associées aux précédentes, des approches par simulation et calcul.

- *Volontaires* : Les études thermo physiologiques d'Adair [Adair, 2003 ; Adair,2005] sur volontaires ont d'abord utilisé une exposition dorsale à 100 MHz (4, 6, 8 mW/cm^2 ; DAS de 0,068 mW/kg, établie d'après des mesures de champ électrique et magnétique au moyen d'une sonde Narda). Les mesures moyennes sont réalisées 10 minutes après le début de chaque séquence (1 séquence se compose de 30 minutes d'équilibration thermique dans le milieu suivie ou non de 45 minutes d'exposition). A ces niveaux, aucune variation de température cutanée (sauf les orteils à 8 mW/cm^2) ou œsophagienne n'est observée. La thermorégulation s'effectue essentiellement par transpiration et un peu par augmentation du flux sanguin cutané, ce qui suggère que le déclenchement est effectué par des récepteurs profonds, la zone superficielle étant « évitée » du fait de la pénétration à 100 MHz. Lors de l'étude suivante (2005), le même auteur utilise une fréquence de 220 MHz en exposition

corps entier (DAS moyenné corps entier : 0,0045 W/kg et 0,045 W/kg), là aussi en effectuant des mesures de température endotrachéale et cutanée (7 points), et de divers paramètres (circulation cutanée locale, transpiration, index métabolique, TA, fréquence respiratoire, évaporation totale, simulations par FDTD). Cette fois, les variations locales sont plus marquées qu'à 100 MHz ([Allen, 2005 ; Adair 2003], et sont bien inférieures à celles observées à 450 MHz.

- *Modèles et fantômes* : Bernardi [Bernardi, 2003] proposait un modèle thermique intégrant la thermorégulation (équations biothermiques) destiné aux expositions en champ lointain à 10 - 900 MHz, utilisant une simulation FDTD, corrélée avec des données expérimentales. A l'époque, il avait montré que la valeur crête du DAS moyenné sur 10 g pouvait excéder de 10 fois dans le corps et de 25 fois dans les membres inférieurs (chevilles) le DAS corps entier. Quand on considère 1 g de tissu, ces facteurs sont respectivement de 30-60 et 135 fois.

Ces méthodes (Foster, modèle compartimental), en association avec une métrologie (E et H) et des méthodes de simulation et de calcul de DAS (FDTD), se sont largement répandues depuis 2004. Dymbilow [Dymbilow, 2007] présentait un modèle réaliste issu de Norman par voxelisation (1 MHz - 1 GHz), modèle repris et appliqué par Fujiwara [Fujiwara, 2007] à des fréquences plus hautes (10 MHz - 3 GHz) pour des situations diverses (enfants d'âges différents et adultes, position assise, *etc*.). Les modèles d'adultes et d'enfants (1,5 et 10 ans) ont été mis à l'échelle, en position debout et assis, isolés ou à la terre. Des fréquences de résonance ont été déterminées pour l'adulte (environ 130 MHz, respectivement 120 et 160 MHz pour les parties supérieures et inférieures de l'individu assis et vers 180 et 600 MHz pour la résonance des membres sur le corps entier). Globalement, sauf chez l'enfant de 1 an à 1,4 GHz, les valeurs de référence définies par l'Icnirp assurent le respect des restrictions de base. Conil [Conil, 2008] précise d'ailleurs que ces niveaux de référence, s'ils garantissent les restrictions de base pour les adultes, peuvent amener à les excéder de 40 % chez l'enfant. Hirata [Hirata, 2007], sur des modèles cuboïdes d'enfants dérivés de Norman, a montré que l'absorption à la fréquence de résonance dépend surtout des propriétés électriques du tissu, alors que la surface exposée est déterminante à 2 GHz. Il peut en résulter une sous estimation du DAS pour une exposition dans les valeurs limites définies par l'Icnirp. La même constatation avait été faite sur le modèle de Wang (Wang, 2006].

Allen [Allen, 2007] a montré à l'aide de fantômes assis remplis de liquides équivalents l'importance de facteurs de sous estimation du DAS et de la densité de puissance dans cette position, liés à des interférences avec les absorbants du sol et des parois.

- *Expositions partielles* : Chris [Chris, 2006] a pris en considération la nature « stratifiée » des milieux biologiques (peau, graisse, muscles, *etc*.) entre 30 MHz et 6 GHz. A distance moyenne (champ intermédiaire), des ondes stationnaires peuvent se former selon l'épaisseur du panicule adipeux. Au contact (jusque $\lambda/40$), l'absorption cutanée est importante (champ E réactif), selon la fréquence et l'antenne et l'application d'un facteur correctif de la « surexposition locale » de l'ordre de 1 à 3 est à considérer par rapport aux données dosimétriques habituelles. Kumar [Kumar, 2008] utilise les mêmes distinctions (aux fréquences 41 - 202 MHz, tours radio-TV), en effectuant une revue d'autres études faites sur la peau, la graisse, l'os et les muscles. Il en déduit la nécessité d'introduire des distances de sécurité par rapport aux tours TV, en se référant aux valeurs limites. En pratique cela se traduit par la possibilité d'interdire l'implantation de ces tours en zone peuplée. Wainwright [Wainwright, 2003] rapporte aussi des possibilités de niveaux locaux plus élevés que le DAS moyen lors d'exposition totale, liés notamment à des facteurs géométriques (section des chevilles par exemple). Cependant, son étude par FDTD confirme l'adéquation de la limite des 100 mA pour les courants dans la jambe, bien que des niveaux supérieurs soient possibles, par exemple au niveau musculaire.

Dans le cas particulier d'exposition céphalique, Bachmann [Bachmann, 2007] a suivi les variations des caractéristiques de l'électroencéphalogramme chez 15 volontaires lors de l'exposition céphalique à 450 MHz (modulée à 40 ou 70 Hz, 0,16 mW/cm^2 par séquences de 1 minute séparées de 1 minute sans exposition, dix fois répétées). L'analyse a porté sur l'étude des spectres en puissance, la contribution des ondes bêta, la durée des périodes à faible variabilité. Il met ainsi en évidence une augmentation de la contribution bêta, en nombre et en puissance chez les exposés (significative chez 4 d'entre eux), sans pourtant y attacher de conclusion péjorative. Wainwright [Wainwright, 2007] a calculé l'élévation de la température locale (389 MHz, 900 MHz, 1 800 MHz) en champ proche de l'œil en utilisant l'œil isolé, ou la tête entière. Les calculs (effectués par FDTD et en utilisant les équations de la chaleur) ont montré que, si l'exposition à des niveaux professionnels s'effectue à moins de 24 mm de l'œil, et qu'elle dure suffisamment, un accroissement local de la température de 1,4°C peut survenir.

4.3.1.3 Autres études

4.3.1.3.1 Mécanismes biologiques

D'un point de vue *mécanistique,* la récente revue de Sheppard [Sheppard, 2008] considère dans une très large bande de fréquences (du quasi-statique au THz) l'existence d'effets à des niveaux de l'ordre des champs électriques endogènes (ou moins), sans effet thermique décelable. Ainsi, en dessous de 10 MHz, une démodulation au niveau des barrières membranaires peut exister, mais pas en hautes fréquences. Les niveaux très faibles (rapport signal/bruit inférieur à 1) ne peuvent pas être compensés par le moyennage, la coopérativité ou des effets non linéaires dynamiques. Au niveau moléculaire, les modes vibrationnels sont tellement amortis par l'eau, que l'excitation ne peut réellement se produire avant l'infra-rouge lointain. Pour les radiofréquences, deux phénomènes pourraient prédominer : en dessous de 150 MHz, les radicaux libres peuvent provoquer des altérations des réactions chimiques. En haute fréquence, le chauffage diélectrique ou résistif peut augmenter l'entropie du système par chauffage. En ce qui concerne l'eau, sa viscosité est dépendante de la fréquence : l'eau entraîne un amortissement considérable au dessus de 10 GHz, mais quand la fréquence descend à quelques GHz, ce phénomène n'existe plus et l'eau peut être considérée comme formant un tout avec les structures moléculaires. Cependant, cette unité est trop massive pour permettre l'apparition de comportements résonnants.

4.3.1.3.2 Végétaux

Wang [Wang, 2003] s'était intéressé (27 MHz - 900 MHz) aux pertes diélectriques aux différentes fréquences en fonction de l'élévation thermique sur un modèle végétal (fruits et amandes, en vue d'application comme traitement insecticide). La perte diélectrique dans les fruits et insectes diminue quand la fréquence augmente à température constante. À 27 MHz, la perte augmente linéairement quand la température augmente. Cet effet est négligeable pour les amandes à 27 MHz, les amandes ayant déjà une constante diélectrique et un facteur de perte faible par rapport aux fruits et insectes.

4.3.1.3.3 Etudes animales

Tarantino (2005) avait simulé l'exposition chronique par émetteurs radio-TV (650 MHz) à l'aide d'une cavité résonante à brassage de mode, sur un modèle de lapin (exposition de 2 ans avec suivi à 12 et 18 mois). L'étude portait sur l'induction de l'apoptose et les possibles variations morphologiques du foie, de la rate et surtout du cerveau. Il avait noté une diminution de l'apoptose hépatique et splénique mais un effet inverse dans le cerveau. Une

élévation du glycogène est également notée dans le groupe, à long terme (18 mois), avec une réversibilité partielle des modifications suggérant une réponse adaptative. Il avançait une possibilité d'explication par l'apoptose de l'effet cocancérogène possible des rayonnements radiofréquences. Les relations entre survie animale et densité de puissance ou DAS entre 240 MHz et 2,4 GHz font l'objet du travail de Kalogina [Kalogina, 2007] : selon lui, si on considère la densité de puissance, la sensibilité croit avec la taille du modèle animal en UHF. Si c'est le DAS, la tendance est inverse. En terme d'aide à l'estimation expérimentale des niveaux d'absorption, ce travail devrait permettre d'extraire par calcul une prédiction de temps de survie de l'animal exposé.

4.3.2 Cas particulier des transmissions en ondes courtes (2 - 25 MHz)

Les transmissions en ondes courtes, utilisées pour les communications internationales, peuvent délivrer fréquemment, en sortie d'antenne, des puissances de l'ordre du kW, occasionnant des champs magnétiques pouvant atteindre plusieurs dizaines de mA/m à plusieurs kilomètres [Altpeter, 2006]. Dans son étude sur les leucémies de l'enfant, Michelozzi mesurait des champs électriques atteignant 20 V/m dans les maisons proches de l'antenne. Dans sa revue de cohortes, Breckenkamp [Breckenkamp, 2003] évalue les possibles conséquences biologiques (incidence de divers cancers) sur de grandes variétés d'applications dans cette gamme (militaires, police, urgences), sur des séries variant de 3 200 à 200 000 personnes. Aucun effet n'y est démontré, mais l'auteur souligne la forte possibilité de biais. Aucune mesure de l'exposition n'est cependant fournie (sauf pour un cas, il s'agit de réponses oui/non). Dans le cadre d'une enquête sur les bâtiments de la marine norvégienne (équipés en systèmes haute fréquence, Mollerkonnen [Mollerkonnen, 2008] propose une classification en 4 classes selon l'emploi tenu à bord, et pour le groupe sonar/radar observe un risque d'infertilité accru (au risque de 5 %) sans en tirer toutefois de conclusion définitive. Un grand nombre de situations dans le cadre militaire exposent les personnels aux expositions HF résultant des systèmes de transmissions opérationnelles de terrain. Ainsi, Olsen [Olsen, 1999] rapportait l'existence de courants de contact (130 mA) perçus par les personnels servant sur des systèmes HF montés sur véhicules. Un grand nombre de véhicules sont équipés de systèmes de brouillage HF qui, pour être efficaces, doivent fréquemment atteindre des puissances de 50 à 100 W, ce qui implique l'existence de zones où les valeurs limites d'exposition professionnelles recommandées sont dépassées. Des courants de contact pouvant atteindre 0,35-0,95 A peuvent exister dans les mains lors du contact avec des objets métalliques placés à proximité d'antennes fouets, de superstructure de bateau ou d'avion [Litvak, 2002].

4.3.3 Applications médicales

Dans ces applications, il est important de faire la distinction entre le patient et l'opérateur.

Le compromis entre risque possible et bénéfice anticipé pour le patient doit être évalué par le praticien ; il en résulte une exposition dépassant usuellement les niveaux autorisés pour le public ou les professionnels. Au contraire, le comportement de l'utilisateur (le praticien) est régi par les limites professionnelles et c'est sur lui que l'intérêt se porte généralement dans les études.

<u>Diathermie ondes courtes</u>

La diathermie est une application médicale permettant de chauffer localement un organe. Une des premières applications de l'énergie électromagnétique a été la diathermie à ondes courtes (généralement à 27 MHz). Des électrodes non blindées sont fréquemment utilisées, ce qui conduit à la production de champs intenses électriques et/ou magnétiques selon le mode opératoire et la position du praticien, pouvant dépasser les valeurs limites pour les professionnels. Des accidents liés à la focalisation des champs ont été rapportés, chez des patients porteurs d'électrodes de stimulation neurologique, de prothèses métalliques

osseuses ou de *pace-makers* [Ruggera, 2003 ; Nutt 2001]. L'accident peut aussi toucher le praticien s'il porte des pièces métalliques trop proches de la zone d'intervention, comme des montures de lunettes, par exemple [Litvak, 2002]. A ce titre, les différentes institutions ont émis diverses recommandations à l'usage des praticiens, en vue de la protection des patients (par exemple : *Direction générale des produits de santé et des aliments, Canada 2003 ; USA Public Health Notification: Diathermy Interactions with Implanted Leads and Implanted Systems with Leads*[51]*.; Patients with Active/Powered Implants: Risk of Serious Injury from Therapeutic Diathermy Treatment*[52]*)*. L'étude de Shah [Shah, 2007] souligne l'existence de négligences et un manque d'information des praticiens, qui devraient être pris en compte de façon globale au niveau de la santé. Israel [Israel, 2007] s'est intéressé aux possibles effets cardiovasculaires à long terme chez le praticien physiothérapeute en prenant 52 personnes exposées *versus* 52 témoins, en prenant en compte les habitudes de vie (tabac, alcool, travail, nutrition, antécédents, *etc*.). Comme les fréquences utilisées par ces applications commerciales sont très variées (50 Hz, 150 kHz, 27 MHz ou 2,45 GHz par exemple), le critère mesuré est la densité de courant induit. L'analyse a porté sur les constantes biologiques : la tension artérielle (TA) et l'indice de masse corporelle (IMC). Dans le groupe exposé, il détecte peu d'influence sur la TA ou l'IMC, mais une augmentation du cholestérol total dans le groupe exposé (OR = 1,57 [IC 95 % : 1,048 - 2,351]) et du taux de *Low Density Lipoproteins*, LDL (OR = 1,84 [IC 95 % : 1,158 - 2,924]). Le lien de causalité reste, selon lui, à investiguer, notamment pour faire la part de ces expositions intermittentes à haut niveau, du rôle émotionnel joué par la relation malade-praticien, et par le *sex ratio* des physiothérapeutes (en majorité féminins).

Matériels d'électrochirurgie

Ces instruments d'usage courant dans les blocs opératoires sont utilisés pour couper ou coaguler. Les fréquences utilisées se situent ente 500 kHz et plusieurs MHz. L'extrémité qui amène l'énergie consiste en un bout tranchant ou un câble non blindé, qui peut passer à proximité de la main ou du bras du chirurgien, entraînant une exposition qui peut atteindre plusieurs milliers de V/m localement ou des courants induits de l'ordre de 5 A/m [Hansson, 2001] - proche des valeurs limites d'exposition professionnelles. L'utilisation de conducteurs blindés devrait être préférée pour ces utilisations. L'ablation de tumeurs par radiofréquences est maintenant bien acceptée dans les cas de tumeurs inextirpables, en particulier des reins, des poumons, des surrénales et du foie [Gervais, 2003 ; Mayo-Smith, 2004 ; Wood, 2003]. Ces opérations utilisées dans des stades évolués nécessitent souvent la mise en jeu de fortes puissances du fait de l'importance de la zone à traiter. Il en résulte des brûlures cutanées notamment au niveau des contacts « à la terre » [Geddes, 1998], ce qui constitue une limite technique à l'utilisation de cette méthode.

Liu [Liu, 2008] a modélisé (méthode FDTD) le chauffage résultant de l'exposition aux rayonnements lors d'ablation par radiofréquences, en fonction de l'orientation des électrodes et de la perfusion locale, sur des périodes allant de 6 à 20 minutes. Il a montré que la distance à respecter pour les tissus adjacents dépend linéairement de la perfusion et des caractéristiques physiques des électrodes (taille, forme, *etc*.). Une solution proposée pour limiter le chauffage consistait à utiliser plusieurs plaques (2 à 4) de retour à la terre, montées en parallèle, en association avec un profilage de ces plaques adapté à l'utilisation (différent selon qu'il s'agisse d'électrocoagulation ou d'excision). Il faut noter que la tendance est à l'augmentation de puissance dans un souci d'efficacité (jusqu'à 1 kW, pour des durées de l'ordre de la demi-heure [Shutt, 2008]). Une solution prometteuse consiste en une gestion de la distribution de puissance par alternance entre plaques des périodes d'activation, associée

51 http://www.fda.gov/cdrh/safety/121902.html

52 *MDA Safety Notice, August 2001*

à un plus grand nombre d'électrodes, ce qui permet de diminuer l'augmentation de température cutanée et/ou l'utilisation possible de puissances supérieures [Shutt, 2008].

En dehors de la peau, les possibilités de nécrose par échauffement des tissus environnants sont aussi une limite : Pop [Pop, 2003] s'est intéressé aux propriétés diélectriques des tissus lors de thermothérapie (de 48 à 78°C) sur rein à 460 MHz (modèle porcin), mettant en évidence les deux composantes de ces lésions : l'une rapide et réversible, l'autre, irréversible liée à des atteintes structurales comme la dénaturation des protéines. Ces problèmes d'interférences entre champ et matériel implanté seront d'ailleurs retrouvés dans le cas des applications IRM.

Imagerie par résonance magnétique (IRM) et spectroscopie RMN

Les patients et opérateurs peuvent rencontrer des champs statiques jusqu'à 3 T en IRM, ainsi que des gradients magnétiques de champ dont la variation dB/dt peut atteindre 3 T/s sur 1 ms. Les champs radiofréquences (jusqu'à 100 MHz) sont faibles et limités à la cavité où séjourne le patient, si bien que l'exposition de l'opérateur est négligeable. Face à la cavité de l'aimant, le champ est au maximum de 1 T, et les personnels dans la pièce ne subissent pas plus de 0,2 T, ce qui correspond aux valeurs limites d'exposition. Cependant, l'exécution de gestes (introduction du patient, branchement des câbles ou nettoyage de l'appareil) peut amener à l'exposition à des champs de 1-2 T, difficiles à éviter. En effet, l'aimant étant supra conducteur, il n'est pas possible de couper le champ temporairement.

La revue de Shellock [Shellock, 2004] considère séparément les effets d'une IRM, en vue de proposer des procédures de prévention. Les agents identifiés sont ;

- les gradients radiofréquences : la mise en jeu et la coupure des gradients lors des séquences d'IRM peut induire la perception de claquements ou de ressauts (*tingling-tapping)*, voire de stimulations inconfortables ou de douleurs et, pour de très fortes puissances (systèmes anciens) des stimulations et excitations cardiaques. Leur localisation se situe surtout aux extrémités des os, où l'épaisseur entre la peau et l'os (mauvais conducteur) est la plus faible.
- Le bruit lié à la mise en jeu des gradients, peut engendrer de simples difficultés verbales (élocution) jusqu'à une perte d'audition, ou générer l'anxiété du patient. Une protection est nécessaire (99 dB).
- les radiofréquences : il s'agit d'effets thermiques, selon la fréquence (ou le champ statique associé), la puissance, les séquences, le volume exposé et la durée, mais dans des conditions comprises en dessous de valeurs de DAS corps entier de 6 W/kg (1,5 T, 64 kHz), les conditions de thermorégulation opèrent et ne posent pas de problème chez l'individu exempt d'appareillage métallique implanté. Des mesures de surveillance et de contre-indications sont proposées : corps étrangers métalliques, notamment oculaires, (surtout longs) dépistables par questionnaires et procédures; maquillages ou tatouages contenant des ions métalliques ; prothèses implantées pouvant se déplacer ; grossesse sauf s'il n'y a pas d'autre technique non ionisante disponible et que l'IRM remplace les examens radiologiques ionisants. Un modèle de mise en œuvre des mesures de surveillance et de dépistage est proposé en annexe de cette revue.

Ces résultats recoupent ceux décrits par Stecco [Stecco, 2007]. De fait, les problèmes majeurs posés par l'IRM reposent sur la connaissance des effets thermiques et des courants induits essentiellement chez les patients porteurs de matériels implantés, avec pour conséquence la possibilité de contre-indication à l'examen. Virtanen [Virtanen, 2006] souligne dans sa revue (100 kHz - 30 GHz) la difficulté d'apprécier l'élévation de température en champ proche. Pour cela, les études ont recours à des modèles animaux (modèle de porc de Shrivastava [Shrivastava, 2008]), ou découlent de résultats d'observations humaines (cas cliniques ou retours d'accidents [Mc Intosch, 2005], mais surtout d'études et de simulations en laboratoire [Bassen, 2006 ; Mc Intosch, 2005 ; Helfer, 2006 ; Koning, 2000 ;

Mattei, 2006 ; Nitz 2001 ; Mattei 2008 ; Niwa, 2008], *etc*.). La question était de pouvoir mettre au point un modèle (fantôme) représentatif [Wang, 2008 ; Makris, 2008]. Pour la tête, Akca [Akca, 2007] prend en compte par simulation, avec une précision de 31 %, le rôle de la perfusion sur des modèles initialement non perfusés pour établir l'importance du chauffage radiofréquence. Il prend notamment en compte l'état d'équilibre thermique à une température normalement inférieure pour le sujet perfusé et donc thermorégulé, par rapport à un corps inerte pour lequel la dissipation par la circulation sanguine n'existe pas.

Des situations particulières de calculs ont également été envisagées, comme pour la femme enceinte (Kainz W), ou bien l'audition des impulsions radiofréquences, étudiée dans la revue de Lin [Lin, 2007] dans laquelle il décrit que l'absorption est faite par les tissus mous (élévation locale rapide de la température, de l'ordre de 1µ°C). L'onde thermoélastique de pression est transmise par voie osseuse avant de stimuler la cochlée. La fréquence fondamentale de l'onde produite dépend inversement de la taille de la tête (rat : 25 - 35 kHz) ; humain : 7 - 15 kHz), ce qui est une fréquence entendue. Les seuils, niveaux, mécanismes sont discutés vis-à-vis de l'IRM, où la perception dépend de la taille de la tête, de la durée des impulsions, de la puissance radiofréquence et du champ statique (les pressions thermoélastiques des radiofréquences des IRM atteignent 2 à 4 fois les seuils de perception auditive de la FDA - 4 à 8 W/kg).

Exposition professionnelle

Dans le cadre de leur travail, les opérateurs sont amenés à séjourner et à se déplacer dans le champ de l'appareil. Karpowicz [Karpowicz, 2006] s'intéresse à ces multi expositions professionnelles des personnels réalisant les examens IRM (champs statiques permanents, gradients impulsionnels lors des examens, impulsions radiofréquences des séquences d'acquisition RMN), susceptibles de les amener à dépasser les valeurs limites de l'Icnirp en fonction de leur position, dont dépend l'intensité du champ local et le couplage avec le corps. Cette hypothèse est vérifiée par mesure expérimentale dans l'article de Fuente [Fuente, 2008], en utilisant un dosimètre ambulatoire et des simulations numériques pour des systèmes opérant à des champs différents (1,5, 2 et 4 T) : les niveaux mesurés et calculés peuvent excéder les limites professionnelles surtout pour la tête avec des variations positionnelles liées notamment au mouvement près des bobines gradients. La même observation est faite par Crozier [Crozier, 2007], lequel calcule par méthode FDTD l'exposition sur des fantômes voxellisés d'hommes et de femmes, selon leur position par rapport à l'aimant. Les niveaux professionnels peuvent être dépassés, en particulier aux extrémités de l'aimant et quand les bobines de gradients fonctionnent toutes les 3 simultanément. Sur cette base, Hill [Hill, 2005] pose la question de l'impact possible des nouvelles normes européennes envisagées (directive CE 2004/40), notamment dans l'optique d'applications à l'IRM interventionnelle (*per* opératoire), notant que les connaissances sont assez limitées surtout en ce qui concerne les gradients. Il ajoute qu'il conviendrait de compléter les connaissances avant leur modification. Sur le même sujet, Hill (2005) estime que, dans le cas des gradients, il n'y a aucun argument permettant de supposer qu'un effet biologique en dessous des limites induirait la stimulation des nerfs périphériques (1 A/m² contre 10 mA/m² pour les valeurs limites). Finalement, Anderson (2006), dans son guide de dosimétrie (qui englobe les gammes 3 MHz à 6 GHz), envisage un grand nombre de *scenarii* et propose des recommandations pratiques adaptées à chaque configuration.

Cas particulier : A noter l'étude cellulaire de Hsieh (2008) qui porte sur des cultures de chondrocytes humains ou sur des genoux de porc placés dans des conditions identiques à celle d'un IRM (3 T, radiofréquence à 125,3 MHz). Il observe la suppression de la croissance des cellules, ainsi que des phénomènes d'apoptose mettant en jeu p53, p21, p27, Bax. Dans l'expérimentation animale, il observe un retard de consolidation, mais n'en tire pas de conclusion définitive, sinon la nécessité de poursuivre ces investigations.

Stimulation magnétique transcrânienne (SMT)

Cette méthode non invasive de stimulation et d'investigation est utilisée dans l'étude des connections intracérébrales, la localisation fonctionnelle et la connaissance physiopathologique de certaines pathologies psychiatriques, ainsi que pour le traitement de certaines dépressions chroniques. Le principe repose sur l'utilisation de champs magnétiques impulsionnels intenses à impulsions rapides dont l'application résulte en une stimulation corticale par induction de courants de contact localisés. L'application a recours à des bobines spécialement profilées. Les champs électromagnétiques utilisés sont de l'ordre de 1 T avec une durée d'impulsion allant de 0,05 à 2 ms. La dérivée de champ résultante dB/dt est de l'ordre du kT/s.

Ce champ transitoire peut générer une dépolarisation nerveuse rapide dans un volume d'environ 5 mm^3 au niveau cortical. Il arrive que l'opérateur saisisse les bobines durant l'usage, mais l'intensité du champ décroît en $1/r^3$ (r est la distance), et les règles portent sur les niveaux d'excitation au niveau cérébral, utilisant le niveau minimal requis pour l'effet. Karström [Karström, 2006] montre que, pour une séquence d'impulsions de 72 µs séparées de 3 ms, (équivalent à 3,5 kHz), considérant que la valeur limite d'exposition à cette fréquence est de 1 T/s, la distance nécessaire pour respecter la limite est à 0,7 m du transducteur.

Une étude de 2007 [Ibrahim, 2007] s'est intéressée à l'absorption (DAS) et à l'élévation de température au niveau de l'interface « machine-neurone », à des fréquences de 13,6 MHz, 1 GHz, 2,4 GHz et 5,8 GHz. Des simulations par méthode FDTD ont été effectuées sur des groupes de neurones pour simuler les phénomènes biothermiques et évaluer les températures de dissipation par les contacts (*chip*). Par exemple, la puissance maximale dissipable par contact (*chip*) avant élévation de température de 1°C est de 2,92 W (une *chip*) ou 1,25 W (8 *chips*).

4.3.4 Conclusions

Cette bande de fréquence (10 MHz – 400 MHz) est dominée par les applications industrielles et médicales. Dans certaines situations, des études ponctuelles ont montré que les valeurs limites d'exposition pour le public ou les professionnels étaient parfois dépassées.

En pratique, l'exposition réelle est souvent inconnue parce qu'hétérogène dans le temps et dans l'espace. Ceci entraîne de sévères limitations pour les enquêtes épidémiologiques, que l'évolution des méthodes de modélisation et de calcul a cependant réduites dans les années récentes et que l'utilisation d'exposimètres multi-bandes individuels devrait améliorer.

L'évaluation de l'exposition est encore compliquée par l'existence de résonances dimensionnelles pour lesquelles l'absorption est accrue, ainsi que par l'existence de surexpositions partielles pour des expositions conformes aux valeurs limites, ou encore par des dépendances positionnelles et dimensionnelles (enfants). A l'heure actuelle, d'importants travaux portant sur la dosimétrie dans ces bandes de fréquences sont entrepris.

Les résultats biologiques sont toujours limités et contradictoires. Cependant, certaines observations liées au système cardio-vasculaire et au système nerveux, ou à l'apoptose, devraient être approfondies. Il en est de même pour certaines applications médicales : stimulation nerveuse et action anti-tumorale avec, dans ce dernier cas, une action identifiée sur le cytosquelette.

4.4 Bande de fréquences supérieures à 400 MHz

4.4.1 Effets biologiques et cliniques des radiofréquences

4.4.1.1 Effet sur l'expression génique et la synthèse de protéines

L'examen de l'effet d'un agent sur l'expression génique apporte des informations sur son potentiel à entraîner une réponse cellulaire spécifique. A titre d'exemple, le stress cellulaire en réaction à un *stimulus*, tel qu'une augmentation de température s'accompagne de l'activation de gènes codant pour des protéines de la famille des HSP. Les variations d'expression des gènes peuvent faire partie des réponses physiologiques normales des cellules et ne sont pas nécessairement pathologiques. L'examen ciblé de l'expression de gènes identifiés peut servir à étayer une hypothèse de mécanisme d'action des radiofréquences. A l'inverse, il est possible de rechercher des modifications d'expression génique sans *a priori* puis, après identification des gènes ou protéines exprimés, de remonter à des hypothèses sur les mécanismes cellulaires, voire les fonctions physiologiques pouvant être modifiées par voie de conséquence [Leszczynski, 2006 ; Leszczynski et Meltz, 2006].

Différentes méthodes standardisées sont utilisées pour mesurer l'expression des gènes. On peut mesurer la variation d'un ARN spécifique. Historiquement cela était fait après séparation électrophorétique et identification avec une sonde marquée (*northern blot*). Actuellement, ces mesures se font par RT-PCR[53] quantitative. Cette méthode est à la fois plus sensible et reproductible. Il est également possible de cribler l'expression d'un grand nombre de gènes simultanément, voire de la totalité des gènes par *microarrays* (puces à ADN).

Les méthodes de criblage (ou *screening*), en raison de leur principe (nombre important de variables et souvent faible nombre de répétitions) présentent des risques importants de faux positifs, particulièrement pour les faibles variations. Elles doivent être confirmées par RT-PCR. Pour les *microarrays*, il existe un consensus international sur la validation technique des expérimentations (MIAME : *minimum information for microarray experiment*)[54].

Il est donc indispensable de reproduire les expériences plusieurs fois sur des échantillons indépendants, d'évaluer les faux positifs par des comparaisons entre témoins (et/ou entre *shams* [55]) et de faire une analyse de fond des données pour réduire l'incertitude. De plus, les résultats obtenus doivent être retrouvés par une autre technique pour être validés. Un certain nombre d'auteurs insistent sur la rigueur indispensable, tout particulièrement dans ce domaine, pour obtenir des résulats valides [Allison *et al.*, 2005 ; Vanderstraeten *et al.*, 2008]

Dans un grand nombre d'études, un balayage large (criblage), total ou partiel, du génome ou du protéome a été effectué.

Les autres travaux concernent l'expression de gènes spécifiques sur-exprimés ou sous-exprimés en réponse à une stimulation : quelques études s'intéressent plus spécifiquement à l'expression de gènes impliqués dans les voies de transduction du signal comme Egr-1, Elk-1 ainsi que les protéines kinases impliquées dans les processus de régulation cellulaire (mitogen-activated protein kinase ; MAPK, extracellular-signal regulated kinase : ERK, p38, *etc*.). Il s'agit de voies complexes ou des réactions se produisent en cascade, intervenant

---

[53] *Reverse Transcriptase polymerase chain reaction* : amplification en chaîne par polymérisation - transcription inverse.

[54] Brazma A, Hingamp P, Quackenbush J, Sherlock, G, Spellman P, Stoeckert C, *et al.* Minimum information about a microarray experiment (MIAME) toward standards for microarray data. Nat Genet 2001;29:365–71.

[55] Cf. définition du « *sham* » au chapitre rappels méthodologiques (4.1.1)

dans une variété de processus intracellulaires incluant la prolifération, la différenciation, les régulations métaboliques, *etc*. D'autres études sont ciblées sur l'expression de proto-oncogènes considérés comme des gènes de réponse précoce immédiate (c-fos, c-myc et c-jun) codant pour des facteurs de transcription. Ces gènes sont faiblement exprimés en permanence mais induits rapidement et transitoirement en cas de *stimuli* externes. Ils sont également impliqués dans la régulation de la croissance cellulaire, de la prolifération et de la différenciation.

Enfin, un grand nombre d'études porte sur l'expression et la synthèse des protéines HSP.

Au total, 55 articles ont été rattachés à cette catégorie. Ils seront traités dans des sous-parties, selon qu'il s'agisse d'études d'expression génique analysée par criblage systèmatique, d'expression de proto-oncogènes et de gènes de transduction du signal ou d'expression de protéines HSP.

8 articles ne seront pas détaillés dont un article en chinois [Zeng *et al.*, 2006], trois revues [Leszczynski, 2006] et [Vanderstraeten, 2008 ; Cotgreave *et al.*, 2005], trois lettres à l'éditeur [Leszczynski et Meltz, 2006 ; Leszczynski, 2007 ; Lerlch, 2008] et un commentaire dans Radiation Research qui sera évoqué [Mayo *et al.*, 2006].

4.4.1.1.1 Etudes de l'expression génique analysée par criblage

Dix-neuf études se rapportent à ce thème, 16 d'entre elles utilisent des puces à ADN (ou *microarrays)* pour analyser l'expression d'un grand nombre de gènes variables selon la technique. Une étude utilise une autre méthode d'analyse d'expression génique (Serial Analysis of Gene Expression, SAGE) [Lee S. *et al.*, 2006] et 2 articles portent uniquement sur la synthèse des protéines [Karinen *et al.*, 2008 ; Li *et al.*, 2007]. Certains d'entre eux sont également rattachés à des chapitres traitant plus spécifiquement d'un effet biologique particulier (apoptose, génotoxicité, immunité, etc.).

Les expériences de *microarrays* sont souvent faites une seule fois ou reproduites de façon indépendante 2 à 5 fois. Un minimum de 3 est souhaitable. Lorsque des variations sont observées, les résultats ne sont pas toujours confirmés par RT-PCR, ce qui ne permet alors pas de valider le résultat.

L'essentiel des travaux utilise des modèles *in vitro* (cellules), seules 4 études concernent des exposition *in vivo*, dont 3 sur modèles animaux [Belyaev *et al.*, 2006 ; Paparini *et al.*, 2008 et Nittby *et al.*, 2008] et 1 sur des humains [Karinen *et al.*, 2008].

Dans la grande majorité, les expositions sont réalisées avec des fréquences et des signaux utilisés pour les communications sans fil, essentiellement en téléphonie avec des valeurs de DAS testées allant de 0,01 W/kg à 20 W/kg. La plupart du temps, la dosimétrie est correctement décrite (numérique et expérimentale) sauf pour 3 études [Lee S. *et al.*, 2005, Belyaev *et al.*,2006, Li *et al.*, 2007].

Des expositions de courtes durées,- quelques heures au *maximum* - sont effectuées dans 6 études, tandis que des temps d'exposition longs sont testés dans 9 études. Plusieurs équipes ont testé des temps courts ainsi que des temps longs sur un même modèle pour des conditions d'expositions similaires.

Etudes qui font état de variations d'expression génique

- Expositions *in vitro* de cellules animales

Lee S. *et al.* [Lee S. *et al.,* 2005] ont exposé des cellules humaines à 2 450 MHz avec un DAS de 10 W/kg. L'expression de 221 gènes est modifiée après 2 h d'exposition et celle de 759 gènes après 6 h, dont une *up-régulation* de gènes impliqués dans l'apoptose et une

sous-expression de gènes du cycle cellulaire (N = 1 méthode SAGE, *Serial Analysis of Gene Expression*). Il n'y a pas d'augmentation dans l'expression des HSP. L'expérience est faite une seule fois sur 3 échantillons (*sham*, exposé 2 h et exposé 6 h). Elle comporte un seul *sham* de 2 h (au pretexte de restrictions budgétaires), non valable pour la comparaison avec 6 h d'exposition, et ne précise pas de temps t_0 comme référence, ce qui permet d'expliquer les différences observées. Les résulats ne sont pas confirmés par RT-PCR et il n'y a pas de contrôle positif. De plus, la dosimétrie n'est pas décrite.

Les autres travaux utilisent les fréquences 900 et 1800 MHz avec modulation de type GSM 900 ou GSM 1800 et mettent en évidence une influence de l'exposition aux radiofréquences sur l'expression génique pour des valeurs du DAS allant de 1 à 3,5 W/kg, selon les cas.

Nylund *et al.* [Nylund *et al.,* 2006] trouvent des effets différents mais mineurs dans deux lignées cellulaires très proches exposées à des signaux GSM 900 (2,8 W/Kg), un seul gène est surexprimé dans les deux souches et de façon différente selon la souche (*microarrays* 1 167 gènes ; N = 3). L'analyse statistique montre au final que la variation de 1 gène est statistiquement significative dans une lignée et 13 dans l'autre. L'analyse du profil protéique est également différente d'une souche à l'autre, sans évidence de lien avec les gènes détectés par *microarrays*. Les auteurs n'ont pas fait de confirmation par RT-PCR, ni d'analyse des faux positifs..

Remondini *et al.* [Remondini *et al.,* 2006] rassemblent des études réalisées par plusieurs équipes avec différents systèmes d'exposition et différents types cellulaires (test de 75 000 gènes ; N = 1 en duplicat sur des échantillons rassemblés de plusieurs expériences). Les expositions, continues ou intermittentes, varient de 1 à 44 h selon les expériences. Une augmentation est parfois observée pour des gènes codant pour des protéines ribosomiques qui pourrait avoir une répercussion sur le métabolisme. L'analyse de ces variations n'indique pas d'effet dose, les effets sont parfois observés en exposition intermittente ou CW sans cohérence. Les auteurs indiquent que l'analyse globale des travaux ne fait pas ressortir une réponse au stress particulière. Les résultats ne sont pas confirmés par RT-PCR.

Zhao R. *et al.* [Zhao R. *et al.,* 2007] ont observé par *microarrays* (1 200 gènes, N = 1) et RT-PCR une variation d'expression de 34 gènes dans des neurones de rat en culture primaire exposés à un signal GSM 1800 (2 W/kg). Ces gènes codent pour des protéines impliquées dans la transduction du signal, le cytosquelette, les canaux ioniques, les phénomènes d'oxydation, l'adhésion cellulaire, les synapses, le complément. Ils comprennent aussi des proto-oncogènes ou d'autres gènes codant pour des facteurs de transcription. La variation est statistiquement significative mais très faible (x 1,35 en moyenne) et il n'est pas fait état des faux positifs qui permettraient de déterminer le degré de validité de ce résultat. La dosimétrie est validée. Il n'est pas fait état d'un système de contrôle de la température durant l'exposition, ce qui ne permet pas d'exclure un effet thermique.

Li *et al.* [Li *et al.*, 2007] ont fait un criblage de l'expression des protéines (N=3) dans des cellules de cristallin en culture, avec l'idée de rechercher un mécanisme moléculaire pouvant être à l'origine de cataracte lors d'exposition à un signal GSM 1800 (1 ; 2 et 3,5 W/kg, 2 h ; N = 3). Les auteurs trouvent 4 protéines surexprimées (environ 3 x) par les cellules exposées par rapport aux *shams*. La proportion de faux positifs n'est pas mentionnée. L'analyse par spectrométrie de masse a permis d'identifier HSP70 et des protéines ribosomiques nucléaires. Cependant, la dosimétrie n'est pas décrite et un effet thermique ne peut être exclu.

- Expositions *in vivo*

Belayev *et al.* [Belayev *et al.*, 2006] ont exposé des rats à un signal GSM 900 (DAS de 0,4 W/kg) pendant 2 h, puis ont conduit des analyses sur des broyats de cerveau, de thymus et de rate. L'expression génique est analysée par *microarrays* avec des biopuces à ADN (affimetrix, 8 800 gènes, N = 3). Une surexpression est observée pour 11 gènes ainsi qu'une

sous-expression du gène de la N-acétyltransferase1. Les auteurs mentionnent que cette enzyme est impliquée dans la production de mélatonine à laquelle elle n'est pas exclusivement liée dans la cellule. Les taux de variation de l'expression génique très faibles observés peuvent aussi être dus aux variations propres à la technique employée (bruit de fond), car les auteurs n'ont pas évalué les faux positifs. Le résultat n'est pas confirmé par RT-PCR ou une autre méthode. Dans la même étude les auteurs n'observent pas d'altération d'ADN (voir chapitre génotoxicité). Notons que la dosimétrie n'est pas décrite, il est fait référence à une publication où le DAS est calculé sur un tube et non sur un rat.

Nittby *et al.* [Nittby *et al.,* 2008] ont fait un criblage total des ARN de cerveau de rats exposés sans contrainte à des signaux GSM 1800 à un niveau de DAS extrêmement faible (DAS local de 0,03 W/kg). Pour les deux régions cérébrales examinées, il n'y a pas d'altération forte de l'expression de gènes particuliers (31 099 gènes ; N = 1 ; échantillons rassemblés par groupes *sham* et exposé). Des altérations faibles significatives sont observées pour des gènes impliqués dans la transduction du signal et les fonctions membranaires pour les deux régions cérébrales examinées (cortex et hippocampe), néanmoins il n'y pas d'évaluation des faux positifs et peu de cas (4 rats exposés, 4 *sham*s). Les résultats ne sont pas confirmés par RT-PCR.

Karinen *et al.* [Karinen *et al.,* 2008] ont mis en évidence des variations dans la synthèse de quelques protéines (non identifiées) dans des biopsies de peau humaines prélevées après exposition sur l'avant-bras de 10 sujets volontaires exposés à des signaux GSM pendant 1 h (1,3 W/kg). Un prélèvement sur l'autre bras sert de contrôle. Le profil protéique est examiné par électrophorèse sur gel en deux dimensions (criblage protéomique). Sur 579 protéines, 8 montrent des variations statistiquement significatives chez plusieurs sujets, cependant seulement 2, non identifées, sont exprimées par la totalité des sujets, sinon les variations de retrouvent chez quatre sujets au maximum. L'étude porte sur peu de cas et les résultats présentent une grande variabilité inter-individuelle. Il n'est pas mentionné que l'étude soit répliquée plusieurs fois pour chaque individu, ce qui serait nécessaire pour valider ou non ce résultat.

Etudes n'ayant pas mis en évidence d'effet des radiofréquences sur l'expression génique

Sur les 10 publications analysées, 9 concernent des expériences *in vitro*, et une est conduite *in vivo* [Paparini *et al.*, 2008]. Les DAS utilisés se situent entre 0,1 et 20 W/kg, avec des émissions utilisées en téléphonie mobile. Dans tous les cas, la dosimétrie est validée correctement par deux méthodes.

Les expositions sont majoritairement longues, (10 h et plus). Trois études utilisent des conditions aiguës uniquement [Gurisik *et al.*, 2006 ; Paparini *et al.*, 2008] ou en complément de temps longs [Hirose *et al.*, 2007].

- Exposition *in vitro*

Whitehead *et al.* [Whitehead *et al.,* 2006a ; Whitehead *et al.* 2006b]ont publié 2 études dans lesquelles le même modèle cellulaire a été utilisé pour un criblage de l'expression génique suite à une exposition de 24 h à des signaux CDMA à 847,74 MHz et FDMA à 835,62 MHz avec un DAS de 5 W/kg (ainsi que 10 W/kg pour 2006a). Les auteurs n'ont pas observé d'effet sur l'expression génique (*microarrays* ; 12 448 gènes ; N = 3). Notons que l'analyse des faux positifs est toujours détaillée dans les travaux de cette équipe et que des contrôles positifs sont réalisés avec de faibles doses de rayonnements ionisants. Ils constatent que, après exposition FDMA et CDMA, les variations du nombre de sondes positives (x1,3 à x1,9) correspondent à des faux positifs et ne sont pas dues à l'exposition aux radiofréquences.

Gurisik *et al.* (Gurisik *et al.,* 2006] ont fait un balayage par *microarrays* (8 400 gènes ; N = 1) suivi de l'analyse de gènes ciblés par RT-PCR dans des cellules humaines d'origine immunitaire et nerveuse, suite à une exposition de 2 h à un signal GSM 900 (0,2 W/kg). De nombreux paramètres biologiques ont également été mesurés. Aucun effet n'a été mis en

évidence sur l'expression génique, ce qui a été confirmé par RT-PCR sur les gènes potentiellement cibles. Aucun effet n'est observé non plus sur la viabilité cellulaire, la nécrose et l'apoptose, le cycle cellulaire ou les HSP.

Qutob *et al.* [Qutob *et al.,* 2006] ont fait un balayage des ARN totaux de cellules humaines par *microarrays* (22 575 cibles ; N = 5) et une analyse de l'expression d'une famille de gène HSP (27, 40, 70A, 70B, 86, 105) à 1 900 MHz (0,1 et 10 W/kg) sans trouver d'effet dans 5 expériences distinctes. On peut noter que ces auteurs attachent une attention particulière à la prise en compte des faux positifs et à la vérification de la validité de leur résultat. L'absence d'effet sur l'expression des protéines HSP étudiées est confirmée par RT-PCR. Les auteurs envisagent de poursuivre des investigations de ce type dans d'autres lignées cellulaires et *in vivo* dans le cerveau de souris.

Zeng *et al.* [Zeng *et al,* 2006] ont examiné l'expression génique et la synthèse protéique de façon globale. Deux modes d'exposition aux radiofréquences ont été testés avec un signal GSM 1800, appliqué d'une part en continu pendant des temps variables (1, 3, 6, 12, 24 h) avec un DAS de 3,5 W/kg et d'autre part, de façon intermittente (5 min *on* / 10 min *off*) pendant 24 h avec un DAS de 2 W/kg et pendant des durées croissantes (1, 3, 6, 12, 24 h) avec un DAS de 3,5 W/kg. Des effets sur l'expression de 5 gènes observés par une technique de criblage (20 000 gènes ; N = 2) n'ont pas été confirmés par RT-PCR. L'analyse protéomique systématique montre de faibles modifications pour quelques protéines après exposition intermittente de 24 h en continu (3,5 W/kg), mais des tests supplémentaires n'ont pas permis de conforter l'hypothèse d'un changement dans l'expression protéique.

Hirose *et al.* [Hirose *et al.*, 2006] n'ont pas observé de modifications d'expression dans des fibroblastes humains en culture pour des exposition longues (24, 28 et 48 h) à des signaux W-CDMA à 2 142,5 MHz (UMTS) ou en onde continue avec des valeurs de DAS faibles (0,08, 0,25 et 0,8 W/kg). Les résultats obtenus avec des *microarrays* (38 000 gènes ; N = 2) sont confirmés par RT-PCR. En 2007, ils n'ont pas non plus montré de modification de la phosphorylation ou de la translocation de HSP27 [Hirose *et al.*, 2007], ni de variation d'expression génique (38 000 gènes ; N = 2) avec un modèle et des conditions d'exposition similaires. Dans chaque étude, des contrôles positifs permettent de valider la technique. En 2007, les auteurs ont également examiné plus spécifiquement l'effet de l'exposition aux radiofréquences sur l'expression, la phosphorylation ou la translocation des HSP étudiées. Aucune différence n'a été trouvée entre exposées et *shams*, quel que soit le signal et le DAS utilisé.

Chauhan *et al.* [Chauhan *et al.,* 2007], de la même équipe que Qutob, n'ont pas observé de modification de l'expression génique dans deux lignées cellulaires humaines d'origine gliale (système nerveux) ou monocytaire (immunitaire) après des expositions de 6 h et de 24 h à 1 900 MHz découpé dans le temps (signal *on* / *off* intermittent) avec une large gamme de DAS (0,1 ; 1 et 10 W/kg). Des contrôles *shams* et positifs sont réalisés et les tests sont effectués immédiatement ou 18 h après exposition. L'analyse par *microaarays* (22 000 gènes ; N = 5) est complétée par une analyse par RT-PCR ciblée sur des protéines de choc thermique (HSP) qui confirme l'absence de variation.

Huang *et al.* ont publié deux études en 2008 que l'on retrouve dans d'autres catégories car elles ne sont pas exclusivement dédiées à la recherche d'expression génique. L'une sur des cellules auditives ciliées est détaillée dans le chapitre 4.4.1.10, l'autre utilisant des cellules immunitaires humaines (lignée Jurkat) est également rattachée au chapitre 4.4.1.6. Une valeur de DAS (20 W/kg), bien au-delà des limites d'exposition pour la tête ou le corps, est utilisée dans la première étude [Huang *et al.,* 2008a] et deux valeurs (2 et 10 W/kg) pour la seconde [Huang *et al.,* 2008b]. Dans les deux cas, les auteurs exposent les cellules à des radiofréquences à 1 763 MHz (CDMA) avec le même système d'exposition pendant 24 h et/ou 48 h. La dosimétrie est réalisée par simulation numérique et confirmée de façon expérimentale. L'expression génique est examinée par *microarrays* (30 000 gènes criblés, dont 16 000 environ analysés; N = 5). Des contrôles positifs sont effectués.

Huang *et al.* [Huang *et al.,* 2008a] n'observent pas de variation d'expression génique autre que celle attribuable aux faux positifs (N = 3) après 24 h d'exposition à 20 W/kg. Huang *et al.* [Huang *et al.,* 2008b] trouvent une variation d'expression minime de 10 gènes (< 2 fois) pour un DAS de 10 W/kg, soit environ 0,06 % des gènes analysés, dont deux gènes intervenant dans des processus de la réponse immunitaire (diminution d'expression 1,8 et 1,4 fois ; N = 5). Ces variations ne s'avèrent pas statistiquement significatives non plus. Les auteurs estiment que l'exposition ne modifie pas le profil d'expression génique global des cellules. Par ailleurs, aucun effet n'a été observé concernant la prolifération cellulaire, la progression dans le cycle cellulaire et les lésions d'ADN dans les deux études.

Mayo *et al.* [Mayo *et al.,* 2006] ont rédigé, sous forme de commentaire, une analyse critique et argumentée de la méthodologie des études d'expression génique. Les études de Kutob *et al.* (2006) et de Withehead *et al.* (2006) sont citées en exemple.

- Exposition *in vivo*

Paparini *et al.* [Paparini *et al.,* 2008] n'ont pas observé de différence d'expression génique dans le cerveau de souris après 1 h d'exposition à un signal GSM 1 800 (DAS de 1,1 W/kg corps entier et 0,2 W/kg localement au niveau de la tête) comparé à un groupe *sham* (criblage de 22 600 gènes ; N = 3). Les auteurs ont réalisé une analyse statistique approfondie des résultats qui indique que certains gènes dont l'expression semblait varier à première vue ne sont en fait pas perturbés. Une analyse par RT-PCR a été conduite sur 30 de ces gènes et ne confirme pas l'existence d'un effet des radiofréquences, ce qui est en accord avec le résultat de l'analyse statistique approfondie.

Conclusion de la partie expression génique étudiée par criblage

Dix-neuf articles de recherche se rapportent à l'effet des radiofréquences sur l'expression génique.

Dans 16 études, des puces à ADN ou *microarrays* servent à analyser l'expression d'un nombre de gènes considérable, variable selon la technique. Une étude utilise une autre méthode d'analyse d'expression génique (*Serial Analysis of Gene Expression*, SAGE) [Lee S. *et al.*, 2006] et 2 articles portent uniquement sur la synthèse des protéines [Karinen *et al.*, 2008 ; Li *et al.*, 2007].

Les expériences de *microarrays* sont souvent faites une seule fois ou reproduites de façon indépendante 2 à 5 fois. Un minimum de 3 est souhaitable ainsi qu'une confirmation par une autre méthode (RT-PCR) pour que le résultat soit fiable.

L'essentiel des travaux utilise des modèles *in vitro* (cellules, 15 études). Seules 4 études concernent des expositions *in vivo*, dont 3 sur des modèles animaux [Belyaev *et al.*, 2006 ; Paparini *et al.*, 2008 et Nittby *et al.*, 2008] et 1 sur des humains [Karinen *et al.*, 2008].

Les expositions sont réalisées à des fréquences et des signaux utilisés pour les communications sans fil, essentiellement en téléphonie avec des valeurs de DAS testées allant de 0,01 W/kg à 20 W/kg. La plupart du temps, la dosimétrie semble correcte (numérique et expérimentale) sauf pour 3 études [Lee S. *et al.*, 2005, Belyaev *et al.*, 2006, Li *et al.*, 2007].

Des expositions de courtes durées - quelques heures maximum -, sont effectuées dans 6 études, tandis que des temps d'exposition longs sont testés dans 9 études. Plusieurs équipes ont testé des temps courts ainsi que des temps longs sur un même modèle pour des conditions d'expositions similaires.

Huit études rapportent des variations d'expression génique [Lee S. *et al.*, 2005 ; Nylund *et al.*, 2006 ; Remondini *et al.*, 2006 ; Zhao R. *et al.*, 2007a ; Li *et al.*, 2007 ; Belayev *et al.*, 2006 ; Nittby *et al.*, 2008 ; Karinen *et al.*, 2008]. L'amplitude des variations observées est mineures comparée à celle produite par de faibles doses d'agents ayant des effets connus. Les résultats de ces études ne convergent pas vers l'expression d'une famille de gènes en particulier qui pourrait conforter l'hypothèse d'un effet non thermique des radiofréquences sur une fonction cellulaire.

Les études analysées dans ce rapport qui font état d'effets des radiofréquences ne satisfont pas à l'ensemble des critères de qualité, ce qui diminue la portée de leurs résultats et la validité de leurs conclusions. Outre le fait que les faux positifs ne sont jamais évalués, il apparaît que, soit la partie physique est incomplète (dosimétrie ou contrôle des conditions), soit le nombre de répétitions des expériences est insuffisant (N = 1 ou 2), soit les résultats ne sont pas confirmés par RT-PCR, soit les contrôles ne sont pas valides ou absents. Plusieurs de ces cas de figure peuvent être cumulés dans une même étude. La seule équipe qui a confirmé par RT-PCR la variation d'expression de certains gènes détectés après un test en *microarrays* ne présente pas une dosimétrie correctement décrite permettant d'exclure un effet thermique. Ces lacunes ne permettent pas de considérer que des effets sont prouvés.

11 études ne montrent pas d'effet des radiofréquences sur l'expression génique [Whitehead *et al.*, 2006a ; Whitehead *et al.,* 2006b ; Gurisik *et al.*, 2006 ; Qutob *et al.*, 2006 ; Zeng *et al.*, 2006 ; Hirose *et al.*, 2006, 2007 ; Chauhan et coll., 2007 ; Huang *et al.*, 2008a et b ; Paparini *et al.*, 2008]. Les DAS testés vont jusqu'à 10 W/kg [Whitehead *et al.*, 2006a; Qutob *et al.*, 2006 ; Chauhan *et al.*, 2007 ; Huang *et al.*, 2008b] et même jusqu'à 20 W/kg [Huang *et al.* 2008b].

Les études qui concluent à une absence d'effet des radiofréquences sur l'expression génique dans les conditions expérimentales testées présentent une dosimétrie validée. Les auteurs prennent en compte les faux positifs et certains valident les faux positifs par une vérification par RT-PCR. Dans l'ensemble, les expériences sont reproduites un plus grand nombre de fois de façon indépendante, c'est-à-dire 3 fois et plus. Ceci est notamment le cas dans toutes les études qui étendent la gamme de DAS au-delà de 5 W/kg.

En conclusion, sur les bases des données scientifiques actuelles, on ne peut conclure à l'existence d'un effet sur l'expression génique et sur la synthèse des protéines pour des niveaux d'exposition non thermiques.

4.4.1.1.2 Etudes de l'expression de gènes spécifiques

Plusieurs études sont orientées vers l'expression de gènes spécifiques ou vers un mécanisme biologique particulier. Les analyses portent sur le niveau d'expression en termes de transcrits (ARN), ou sur les produits des gènes (protéines).

Seize articles sont analysés dans cette partie. La plupart des travaux concernent l'expression des proto-oncogènes c-fos, c-jun et c-myc, quelques uns concernent aussi l'expression de gènes impliqués dans la transduction du signal (ERK, MAPK), 3 articles portent sur l'expression de gènes impliqués dans l'apoptose et 5 sur des gènes exprimés dans les plantes (par une même équipe).

Neuf études sont conduites *in vitro* [Lee J *et al.*, 2006 ; Hirose et coll., 2006 ; Whitehead *et al.*, 2006, 2007 ; Chauhan 2006a et b, Zhao T. et coll., 2007 ; Buttiglione et coll., 2008 ; Huang *et al.*, 2008] et 2 *in vivo* sur des souris [Finnie *et al.*, 2005 ; Finnie *et al.*, 2007].

Dix études présentent une dosimétrie validée, obtenue de façon numérique et expérimentale et pour six d'entre elles, il n'est pas fait état d'un DAS [Zhao T. *et al.*, 2007, Roux *et al.*, 2006, 2008, Vian *et al.*, 2006, 2007 et Beaubois *et al.*, 2007].

Les valeurs du DAS utilisées vont de 0,08 à 20 W/kg. Les expositions sont réalisées avec des signaux utilisés dans les systèmes de communication sans fil. Les durées d'expositions sont de courtes et longues durées dans les études de Finnie, [Finnie *et al.*, 2005] et de Buttiglione *et al.*, [Buttiglione *et al.*, 2007]. Les autres études concernent des temps d'exposition longs allant de 6 à 48 h pour les cellules et jusqu'à 2 ans pour les souris.

Expression de proto-oncogènes et de gènes impliqués dans la transduction du signal

Ces études concernent l'expression génique examinée au niveau de la transcription des gènes (ARN) ou de leur produit (protéines).

Lee J. S. *et al.* [Lee J. S. *et al.,* 2006] ont examiné l'expression des protéines HSP27, HSP 70 et HSP90, ainsi que l'activation de protéines kinases (MAPKs, ERK, c-*jun terminal proteine kinase*, P38) dans une lignée lymphocytaire humaine (Jurkat) et des astrocytes primaires de rat (cellules du système nerveux). Ils n'ont pas trouvé d'effet induit par des signaux CDMA 849 et 1 763 MHz) (DAS de 20 W/kg) par rapport au *sham* et au contrôle positif. La dosimétrie fait état de mesures expérimentales et de simulations, sans détail.

Whitehead *et al.* [Whitehead *et al.,* 2005] ont analysé l'expression de l'oncogène c-fos par RT-PCR après extraction des ARN. Les auteurs ont réalisé cette étude dans le but de confirmer les résultats de [Goswami *et al.,* 1999] qui indiquaient des effets faibles mais significatifs du niveau d'expression de l'oncogène c-fos dans des cellules C3H 10T½, dérivées de fibroblastes d'embryons de souris. Ces résultats n'ont pu être reproduits et n'ont pas montré de modification d'expression de c-fos pour les signaux CDMA et FDMA à 5 W/kg. Dans les mêmes conditions, en 2007, les mêmes auteurs ont fait une analyse approfondie ciblée sur l'expression de proto-oncogènes c-jun et c-fos, des protéines de stress (HSPs), couplée avec l'étude de l'expression génique par criblage citée précédemment et n'ont pas trouvé d'effet dû à l'expostion non plus (Whitehead *et al.*, 2007.

Chauhan *et al.* ([Chauhan *et al.,* 2006a] ; [Chauhan *et al.* 2006b] ; [Chauhan *et al.* 2007]) n'ont pas mis en évidence de modification d'expression des oncogènes c-jun, c-fos et c-myc et des HSP 27, HSP40, HSP70, HSP 105 dans les lignées cellulaires humaines dérivées de lymphoblastome ou de glioblastome après exposition à 1,9 GHz (DAS 0,1 à 10 W/kg).

Huang *et al.* [Huang *et al.,* 2008] n'ont pas observé de modification dans le niveau d'expression de proteines de stress (ERK, p38, HSP) d'après des analyses sur gel après 24 h d'exposition de cellules auditives à 20 W/kg (CDMA-1763). Cette étude est également rattachée au paragraphe concernant l'expression génique par criblage et à celui sur l'audition.

Expression génique liée à l'apoptose

- Etudes *in vitro*

Hirose *et al.* [Hirose *et al.,* 2006], dans le même article que celui cité précédemment, ont également réalisé une analyse d'expression génique par RT-PCR en temps réel ciblée sur des gènes liés à l'apoptose et n'ont pas observé de modifications dues aux radiofréquences (notamment pour p53, *caspases*) dans des fibroblastes humains en culture pour exposés 28 h ou 48 h à des signaux UMTS avec des valeurs de DAS faibles (0,08 à 0,8 W/kg). Cet article est traité plus en détail dans la partie traitant de l'apoptose (*cf.* chapitre 4.4.1.4).

Zhao T. *et al.* [Zhao T. *et al.,* 2007] trouvent des modifications d'expression de gène liés à l'apoptose dans des cultures primaires de souris après avoir posé un téléphone mobile sur la

boîte de culture. Cette méthodologie n'étant pas recevable, l'étude ne peut être prise en compte.

Dans l'étude de Buttiglione *et al.* [Buttiglione *et al.,* 2007], des effets induits par l'exposition aux radiofréquences pour un DAS de 1 W/kg (pendant 5, 15, 30 min, 6 h et 24 h) sont observés après 24 h d'exposition d'une lignée de cellules humaines (du système nerveux). Il y a une diminution des ARN messagers des gènes Bcl2 et de la survivine, inhibiteurs de l'apoptose ainsi qu'un ralentissement du cycle cellulaire avec arrêt dans certaines phases. Un effet transitoire (avant 30 min) est observé sur le gène egr-1 codant pour un facteur de transcription parallèlement à l'activation de protéines kinases (MAPK) qui interviennent également dans la transcitpion du signal. Les effets faibles sur l'apoptose ne permettent toutefois pas de conclure que les radiofréquences induisent l'apoptose dans les conditions expérimentales. Compte tenus des biais possibles les auteurs proposent de réaliser des études complémentaires pour confirmer et approfondir, ou invalider ces résultats.

- Expositions *in vivo*

2 études relatent des expériences conduites sur des souris.

Finnie *et al.* [Finnie *et al.,* 2005] ont décrit des expériences réalisées avec des signaux GSM modulés à 900 MHz (4 W/kg) sur des souris femelles de 8 semaines (3 groupes de 10 : exposé, *sham* et contrôle). Il n'a pas été observé de variation d'expression précoce du gène c-fos dans le cerveau par immuno-histochimie dans les aires corticales par rapport au *sham* après une exposition de 60 minutes. En revanche, les auteurs notent une activation de l'expression de c-fos dans les coupes de souris immobilisées (*sham*s et exposées) par rapport aux contrôles libres, liée au stress de contention.

En 2007, la même équipe [Finnie*et al*., 2007] a exposé des souris pendant 2 ans (60 min / jour), à un signal GSM 900 avec un DAS de 5 W/kg. L'expérience utilise 30 souris en 3 groupes de 10 (exposé, *sham*, contrôle). Les auteurs n'observent pas non plus de différence entre les groupes *sham* et exposé, mais une expression accrue du gène c-fos chez les animaux ayant subi une contrainte par rapport aux animaux du groupe contrôle. Notons que les résultats présentés dans cette publication ont été obtenus sur les cerveaux de souris utilisées par ailleurs pour tester l'intégrité de la BHE [Finnie *et al.*, 2002]) et l'incidence de l'exposition chronique sur le développement de lymphomes [Utteridge *et al.* 2002].

Expositions de plantes

Roux *et al.* ([Finnie *et al,.* 2006] ; [Finnie *et al.,* 2008]), Vian *et al.* ([Vian *et al.,* 2006] ; [Vian *et al.,* 2007]) et Beaubois *et al.* [Beaubois *et al.,* 2007] : cette équipe a publié dans 5 articles des travaux effectués sur des plants de tomate exposés en chambre réverbérante produisant un champ électromagnétique quasi homogène non modulé à 900 MHz. Ils ont observé l'accumulation de transcrits de 5 gènes impliqués dans la réponse non spécifique des végétaux à une agression modérée ou un signal environnemental (brûlure, petite piqûre, goutte d'eau) à 4,2 W/m^2, selon une réponse typique en trois phases qui pourrait indiquer que les plantes perçoivent l'exposition aux radiofréquences. Les auteurs utilisent des plantes dont les feuilles représentent une grande surface exposée et précisent que ces résultats ne peuvent être extrapolés à l'animal ou à l'homme. Le niveau d'exposition non défini du fait de l'absence de dosimétrie ne peut pas permettre d'exclure la possibilité d'un effet thermique.

Seize articles sont analysés dans cette partie.

La plupart des travaux concernent l'expression des proto-oncogènes c-fos, c-jun et c-myc, quelques uns concernent aussi l'expression de gènes impliqués dans la transduction du signal (ERK, MAPK), 3 articles portent sur l'expression de gènes impliqués dans l'apoptose

et 5 sur des gènes exprimés dans les plantes (par une même équipe).

Neuf études sont conduites *in vitro* ([Lee J *et al.*, 2006] ; [Hirose *et al.*, 2006] ; [Whitehead *et al.*, 2006], [Whitehead *et al.*, 2007] ; [Chauhan 2006a] et [Chauhan 2006b], [Zhao T. *et al.*, 2007] ; [Buttiglione *et al.*, 2008] ; [Huang *et al.*, 2008]) et 2 *in vivo* sur des souris ([Finnie *et al.*, 2005] ; [Finnie *et al.*, 2007])

Les études présentent une dosimétrie validée, obtenue de façon numérique et expérimentale sauf pour Lee *et al.* [Lee *et al.,* 2006] où elle est mentionnnée sans description précise. Il n'est pas fait état d'un DAS dans 6 études ([Zhao T. *et al.*, 2007], [Roux *et al.,* 2006] ; [Roux *et al.,* 2008], [Vian *et al.,* 2006] ; [Vian *et al.,* 2007] et [Beaubois *et al.,* 2007]).

Les valeurs de DAS utilisées, lorsqu'elles sont fournies, vont de 1 à 20 W/kg.

Les expositions ont été réalisées avec des signaux utilisés dans les systèmes de communication sans fil. Les durées d'expositions sont courtes dans les études de Finnie, [Finnie *et al.*, 2005] et de Buttiglione *et al.* [Buttiglione *et al.*, 2007] qui testent aussi des temps plus longs. Les autres études concernent des temps d'exposition longs allant de 6 à 48 h pour les cellules et jusqu'à 2 ans pour les souris.

Sept articles rapportent des effets :

Deux études *in vitro* montrent des effets. L'une d'elle ne peut être prise en compte en raison de graves lacunes méthodologiques [Zhao T. *et al.*, 2007]. L'autre montre des effets à long terme ou à court terme sur l'expression de gènes et l'activation de protéines impliqués dans l'apoptose et la transduction du signal [Buttiglione *et al.*, 2007]. Ce résultat va à l'encontre de ceux de nombreuses études. Les auteurs suggèrent des études complémentaires pour confirmer et approfondir, ou invalider ces résultats.

Les 5 autres articles émanant d'une même équipe ([Roux *et al.,* 2006] ; [Roux *et al.,* 2008] ; [Vian *et al.,* 2006] ; [Vian *et al.,* 2007] et [Beaubois *et al.,* 2007]) portent sur les plantes et font état d'effets sur l'expression de gènes induits en cas de stress comparable à un léger *stimulus* environnemental. Aucune valeur du DAS n'étant fournie, il est indispensable de compléter la partie dosimétrie de ces études avant de conclure à un effet non thermique.

Neuf articles ne montrent pas d'effet sur l'expression des gènes d'expression précoces induits transitoirement lors d'un stress ou impliqués dans des voies de transduction du signal, ou lors des phénomènes d'apoptose ([Lee J.S. *et al.*, 2006] ; [Hirose *et al.*, 2006] ; [Whitehead *et al.*, 2006] ; [Whitehead *et al.*, 2007] ; [Chauhan, 2006a et [Chauhan, 2006b] ; [Huang *et al.*, 2008]) et 2 *in vivo* sur des souris avec des exposition de courtes durées et chroniques ([Finnie *et al.*, 2005] ; ([Finnie *et al.*, 2007]). Toutes ces études présentent une partie physique correcte, le DAS est obtenu avec une dosimétrie validée bien décrite, sauf dans un cas où elle est non décrite.

Au final, la majorité des études analysées ne montre pas d'effet des radiofréquences sur l'expression des protooncogènes examinés et des gènes liés à la transduction du signal ou à l'apoptose, ni sur la synthèse de leurs produits dans les conditions expérimentales testées.

4.4.1.1.3 Effet des radiofréquences sur les protéines de stress (HSP)

Un stress au niveau cellulaire est un événement qui engendre une réponse adaptative de la cellule, il n'est pas synonyme de perturbations supra-physiologiques mais il peut, selon les conditions, conduire à des situations délétères. Découvertes initialement dans le cadre de l'étude des réponses cellulaires à un choc thermique, les protéines de stress ont conservé l'appellation « protéines de choc thermique », plus communément HSP pour *heat shock protein*. Elles sont présentes dans tous les organismes vivants et participent à la défense

des cellules contre les agressions en préservant l'intégrité des autres protéines d'où leur autre appellation de protéines « chaperonnes ». Elles jouent un rôle essentiel dans la synthèse, le transport et le repliement des protéines dont l'efficacité est justement liée à leur présence et leur bon fonctionnement (activité liée en partie à leur conformation) en un lieu donné de la cellule. Les HSP interviennent en réponse à des agressions ou à des stimulations extérieures mais aussi dans des processus physiologiques normaux.

Certaines protéines de stress sont constitutives, c'est-à-dire qu'elles sont exprimées en permanence et appelées HSC (*heat schock cognate*). La plupart sont inductibles : leur expression augmente en réponse à des stress variés, comme une variation de température, la présence de métaux lourds, le manque d'oxygène, lors d'une agression chimique, ou encore durant les processus de réparation tissulaire, de différenciation et d'inflammation, *etc*. Il a été montré récemment que les HSP sont également impliquées dans les processus d'apoptose, dont la régulation est importante lors du développement des cancers, ainsi que de certaines maladies. De fait, un certain nombre d'auteurs s'intéressent aux effets sur l'apoptose en parallèle. Les familles de HSP sont classées en fonction de leur poids moléculaire qui varie de 15 à 110 kDa[56], par exemple les HSP70 font 70 kDa et il en existe plusieurs isoformes (différentes conformations de la molécule). Les HSP27 et 70 sont souvent étudiées car elles sont exprimées en réponse à de nombreux *stimuli*. Les HSP27 sont présentes dans toutes les cellules tandis que les HSP70 sont majoritairement localisées dans le système nerveux central mais elles sont aussi présentes dans d'autres tissus comme la peau, le muscle cardiaque, *etc*.

Compte-tenu de leur rôle, les HSP servent d'indicateurs de stress, pour cela leur expression est analysée au niveau des gènes ou de la protéine. L'expression génique est évaluée comme indiqué au chapitre 4.4.1.1. Les protéines peuvent être détectées *in situ* par immunofluorescence dans les cellules préalablement perméabilisées puis observées au microscope (analyse d'image, sur lames) ou passées dans un trieur de cellules (cytomètre en flux : FACS) qui va permettre de quantifier les HSP dans différentes populations cellulaires. La cytométrie permet d'analyser un grand nombre de cellules (souvent fixé à 10 000 par échantillon). D'autres méthodes sont employées plus ponctuellement.

Par ailleurs, l'induction de la réponse cellulaire au stress procède en plusieurs étapes, incluant l'activation du facteur de transcription des protéines chaperonnes inductibles (HSF, heat-shock factor)[57] qui passe par une activation de sa capacité à lier l'ADN et de son activité de facteur de transcription[58]. Certaines études utilisent ce facteur comme marqueur de stress.

De nombreuses recherches ont été conduites pour examiner si les radiofréquences agissent sur les HSP. Quinze articles dont une revue (Cotgreave *et al.*, 2005) et une lettre à l'éditeur (Lerlch, 2008) parus depuis début 2005 sont rattachés plus spécifiquement à ce chapitre.

Sur les 13 articles de recherche analysés, 11 relatent des expositions *in vitro* et 2 études ont été réalisées *in vivo*, en exposition de type GSM (Sanchez *et al.* ; 2008 ; Lee *et al.*, 2005). Les niveaux de DAS sont compris entre 0,4 et 10 W/kg pour la plupart, avec toujours au moins une valeur proche de la limite d'exposition locale de 2 W/kg. Une équipe utilise un niveau d'exposition extrêmement faible (Dawe *et al.*, 2006) mais l'étude est reproduite en

---

56 kDa = kilodalton , le dalton est l'unité de masse égale au seizième de la masse d'un atome d'oxygène, soit environ $1{,}66.10^{-24}$ g.

57 Le HSF est un facteur de transcription qui se fixe au promoteur des protéines HSP. Il existe sous forme monomérique dans la cellule (cytoplasme et noyau), incapable de lier l'ADN. En cas de stress cellulaire, il passe en forme trimérique (3 unités rassemblées) active et permet l'expression des gènes auxquels il se fixe. Cette étape est nécessaire pour initier la réponse cellulaire au stress.

58 Pirkkala *et al.*, Roles of the heat-shock transcription factors in regulation of the heat shoch protein and beyond. 2001, *Faseb J.*, 15, 1118-1131

2008 avec un DAS plus élevé, tandis que d'autres équipes vont au-delà de la limite d'apparition d'effets thermiques avec des valeurs de DAS jusqu'à 10 W/kg et plus (jusqu'à 200 W/kg) (Miyakoshi *et al.*, 2005 et Wang *et al.*, 2006).

- Etudes *in vitro*

Laszlo *et al.* (2005) n'ont pas observé d'induction de la réponse cellulaire au stress avec des lignées cellulaires de trois mammifères différents (humain, souris, hamster) exposées à 835,62 MHz avec des signaux FDMA et CDMA, ou en onde continue, pour des DAS de 0,6 et 5 W/kg pendant des temps plus ou moins long (5, 15, 30, 60 min et 24 h). La mesure de l'activation du facteur de transcription HSF est faite par hybridation sur gel avec une sonde marquée (fragment d'ADN cible contenant un isotope radioactif ^{32}P) puis quantification après transfert et autoradiographie. Pour évaluer la sensibilité du test utilisé en fonction de la température, l'activation de HSF a été mesurée de 37 à 43°C (sans exposition aux radiofréquences) : une augmentation de 1°C entraîne une variation d'environ 10 % de sa capacité à lier l'ADN. Les auteurs insistent sur l'importance du contrôle de la température dans les expériences compte-tenu de l'effet de la température sur le paramètre observé. La dosimétrie est faite par des méthodes numériques et expérimentales.

Lim *et al.* (2005) ont également examiné l'effet de la puissance avec trois valeurs de DAS (0,4, 2 et 3,6 W/kg en onde 900 MHz continue) et de la durée de l'exposition (20 min, 1 h et 4 h en onde continue à 2 W/kg ou modulée GSM à 0,4 W/kg) sur des cellules de sang humain (lymphocytes et monocytes). Les protéines HSP70 et HSP27 sont détectées par immunofluorescence. La quantification est réalisée par cytométrie en flux (sur 10 000 cellules) qui permet en même temps d'estimer le pourcentage de cellules qui répondent dans différentes populations de leucocytes (monocytes, lymphocytes, neutrophiles). Aucun effet de l'exposition n'a été observé quelles que soient les conditions d'exposition testées par rapport au *sham* ou au contrôle incubateur à 37°C. Le contrôle positif est obtenu par incubation des cellules à 42°C. La dosimétrie est réalisée par des méthodes numériques et expérimentales. Compte-tenu du nombre de répétitions assez faible (N = 3), les auteurs font des calculs statistiques pour savoir si la puissance de l'étude est suffisante pour détecter des variations telles que celles obtenues par Leszczynski *et al.* (2002) et Kwee *et al.* (2001), de l'ordre de 60 %. L'étude s'avère suffisante pour détecter un doublement de la réponse (passage de 5 % à 10 %).

Dawe *et al.* (2006) ont publié cet article suite à celui de De Pomerai *et al.* (2000, même équipe)[59] dans la revue *Nature* où les auteurs avaient trouvé une augmentation d'expression de la protéine HSP16 chez un vers nématode (*C. Elegans*, souche transgénique) exposé pendant 2,5 h en onde continue 750 ou 1 000 MHz dans des conditions non thermiques (DAS estimé de 4 à 40 mW/kg). Dans les conditions de croissance utilisées (à 26°C), une élévation de la température de 0,2°C est suffisante pour induire une expression accrue (+20 %) de cette protéine de stress, plus sensible à la température que HSP70 dans ce modèle biologique. L'expression est évaluée par le niveau d'expression de gènes rapporteurs, dont le produit est facile à doser, associés au promoteur du gène de la protéine de stress par construction génétique. Après calibration et amélioration du système d'exposition (détaillé dans l'article), les auteurs sont revenus sur ce résultat et ont indiqué qu'une augmentation de température était en grande partie à l'origine des résultats publiés en 2000. Le DAS utilisé est très faible, de nombreuses mesures de température sont effectuées, mais il n'y a pas de simulation numérique de l'exposition dont l'estimation est approximative. Par la suite, avec un système d'exposition bien caractérisé, permettant d'exposer à des niveaux plus élevés (1,8 W/kg) avec une dosimétrie complète, et des

[59] de Pomerai D, Daniells C, David H, Allan J, Duce I, Mutwakil M, Thomas D, Sewell P, Tattersall J, Jones D, Candido P. 2000, Non-thermal heat-shock response to microwaves. Nature, 405:417–418.

expériences réalisées en aveugle, aucun effet n'est retrouvé pour une exposition de durée équivalente à la même fréquence en onde continue ou modulée de type téléphonie (Dawe *et al.*, 2008).

[Wang *et al.,* 2006] ont étudié la réponse des cellules d'une lignée (A172) provenant d'un glioblastome humain (système nerveux central) exposées à 2 450 MHz avec une gamme étendue de niveaux de DAS (5, 10, 20, 50, 100 et 200 W/kg) ainsi que la réponse des cellules en fonction de la température (38-44°C) pendant 1 h ou 3 h. En effet, il y a une élévation de tempéraure du milieu de culture lorsque le DAS est élevé et il est nécessaire de faire des « contrôles température » pour voir si l'effet de la variation induite par l'exposition aux radiofréquences est comparable à celui d'une même élévation de température du milieu, sans exposition. Les résultats montrent qu'une exposition de 2 h à des DAS de 5 à 20 W/kg n'induit pas de changement statistiquement significatif de l'expression de HSP27 et 70, ni de la phosphorylation de HSP27. Au-delà, des variations sont observées à partir de 3 h en hyperthermie (à partir de 41°C) ou pour des niveaux d'exposition supérieurs à 50 W/kg. Les auteurs relatent des différences entre 41°C et 100 W/kg sur le taux de phosphorylation de HSP27, 100 W/kg étant censé correspondre à une incubation à 41°C maximum d'après la courbe de température en fonction du DAS. Néanmoins, cette étude a donné lieu à un commentaire de Lerchl (2008) évoquant le fait que le DAS réel au niveau des cellules pourrait être plus élevé qu'annoncé (DAS dans le milieu) car les cellules sont collées au fond de la boîte et que la répartition du DAS n'est pas homogène dans la boîte (points plus chauds). Par ailleurs, de grandes variations dans les températures mesurées apparaissent d'un graphe à l'autre dans la publication. L'auteur référent de l'article commenté (Wang *et al.*, 2006) a fait savoir à l'éditeur qu'il était d'accord avec ces commentaires et n'avait rien à rajouter.

[Simko *et al.,* 2006)] n'ont pas observé de modification de l'expression de HSP70 suite à une exposition pendant 1 h à 1 800 MHz en onde continue ou avec différentes modulations GSM (DAS 2 W/kg), en présence ou en absence de particules ultrafines (dérivés de combustion : UFP, < 1 µm). Ces particules sont en suspension dans l'environnement urbain et induisent des réactions de l'organisme, les auteurs ont décidé de tester si leur effet nocif pouvait être potentialisé par les ondes radiofréquences elles aussi présentes dans l'environnement. Le modèle cellulaire est représenté par une lignée de monocytes humains MonoMac6 (cellules du système immunitaire) qui sont capables de phagocyter les UFP. Cette activité est associée à un relargage de radicaux libres (ROS) dans le milieu extracellulaire que les auteurs ont également quantifié. En présence ou en absence d'UFP, 4 lots de cellules sont incubés en parallèle : *sham*, exposé aux radiofréquences, contrôle incubateur, contrôle positif. Ce dernier est obtenu par échauffement (42 - 43°C pendant 1 h) pour induire un stress thermique. L'augmentation de synthèse de ROS est plus forte avec les UFP que lors de l'échauffement, mais elle n'est pas potentialisée par l'exposition aux radiofréquences. Le taux de HSP 70 marquée par immunofluorescence dans les cellules est quantifié par cytométrie en flux et le taux de ROS est mesuré par une réaction biochimique dans le milieu de culture.

[Miyakoshi *et al*. (2006)] n'observent pas de différence de croissance entre *sham* et exposé à un rayonnement à 1,95 GHz en onde continue à 2 et 10 W/Kg, ni de différence d'expression des HSP examinées après 1 et 2 h d'exposition. Il y a par contre une diminution de la phosphorylation des HSP27 après exposition à 10 W/Kg.

Valbonesi *et al.* (2008) ont utilisé des trophoblastes humains (lignée HTR-8/Svneo) pour étudier l'effet d'un signal GSM à 1 817 MHz (DAS de 2 W/kg pendant 1 h) sur l'expression des HSP70 A, B et C inductibles et HSC70 constitutive (HSC70) en ce qui concerne la quantité de protéine et le niveaux de transcription du gène (quantité d'ARNm). L'intégrité de l'ADN a aussi été examinée par le test des comètes. Ces cellules embryonnaires indifférenciées sont à l'origine de différents types cellulaires et présentent l'avantage d'être sensibles à un grand nombre de *stimuli*. Un contrôle positif obtenu par incubation pendant 1 h à 43°C présente une augmentation de l'expression des HSP70 (isoformes A, B et C) inductibles par rapport au contrôle, sans changement pour la forme constitutive qui est

toujours exprimée (y compris dans les contrôles négatifs). Les contrôles positifs ne sont incubés que 1 h alors que le temps d'exposition aux radiofréquences est plus long.

De la même façon, Franzellitti *et al.* (2008, même équipe que précédemment) ont testé des niveaux d'expositions de 2 W/kg pendant 4, 16 et 24 h sur les trophoblastes à la fréquence 1800 MHz en onde continue ou modulée GSM selon deux types de signaux caractéristiques (modulation à 217 Hz et un mode « conversation »). Ces expositions n'induisent pas de modification de l'expression des protéines HSP70 inductibles examinées[60], ni de la forme constitutive (HSC70). En revanche, une modification du niveau de transcription du gène HSP70C (ARNm) est observée par RT-PCR par rapport aux *shams* avec une augmentation après exposition de 24 h à un type de signal GSM (217 Hz) et diminution avec l'autre (GSM-*talk*) après 4 et 16 h. Aucun effet n'est observé sur la viabilité cellulaire quelles que soient les conditions testées, y compris dans les témoins positifs. Les contrôles positifs ne sont pas fait en parallèle aux expositions et contrôles (*sham* et incubateur). Ils ne sont incubés que 1 h alors que le temps d'exposition aux radiofréquences est plus long pour les deux autres groupes se qui ne permet pas de statuer sur l'amplitude de l'effet observé. Les auteurs concluent que le signal GSM est susceptible d'induire des changements subtils non détectables au niveau de l'expression de la protéine elle-même, spécifiques à ce type cellulaire qui pourrait être un modèle intéressant pour les études des interactions ondes radiofréquences - système cellulaire.

Sanchez *et al.* (2006a) ont étudié l'effet d'une exposition GSM 900 de 2 h sur des cellules primaires de peau humaine (fibroblastes et kératinocytes) et de la peau reconstituée avec des kératinocytes et des fibroblastes humains. Ce modèle en 3D est éprouvé, employé notamment en recherche, pour tester des substances (médicaments, cosmétiques) ou pour des greffes de peau. La peau est l'organe le plus exposé aux radiofréquences émises par les téléphones mobiles. Un contrôle positif est réalisé par exposition aux rayonnements UVB, facteur de stress connu pour la peau. Les résultats n'indiquent pas d'effet de l'exposition sur l'apoptose et l'expression des HSP27 et 70 dans les cellules en culture, ni sur la prolifération cellulaire ou l'épaisseur de la peau reconstituée. En revanche, il y a une expression maintenue de HSP70 dans la peau reconstituée après 3 et 5 semaines de culture *post* exposition alors qu'elle diminue avec le temps de culture dans les *shams*. Des fibroblastes primaires de deux fournisseurs sont testés, ils ne présentent pas les mêmes profils d'expression des HSC70, mais ils ne sont pas cultivés dans le même milieu de culture. Les auteurs concluent que la réponse adaptative à l'exposition aux radiofréquences pourrait avoir lieu selon le type cellulaire et les conditions de culture, mais qu'elle ne paraît pas susceptible d'avoir des effets délétères au niveau de la peau. Il aurait pu être intéressant de tester en parallèle les deux souches de fibroblastes qui répondent différemment à l'exposition, et de comparer l'influence des deux milieux de culture sur chaque souche de façon à éliminer la possibilité d'un biais expérimental. Toutefois, ces auteurs n'ont pas retrouvé cet effet *in vivo* (2008).

Sanchez *et al.* (2007) n'ont pas observé de modification sur des kératinocytes (épiderme) et des fibroblastes de derme humains en culture primaire après 48 h d'exposition à un signal GSM 1800 avec un DAS de 2 W/kg sur le taux de HSC70, HSP27 et HSP70. Les protéines sont détectées par immunofluorescence (sur lame), l'apoptose est également analysée par cytométrie en flux (annexine 5/iodure de propidium). Les mesures sont faites à des temps variables de 2 à 48 h après l'exposition. Les résultats sont comparés à ceux obtenus avec un rayonnement UVB et à celui d'un choc thermique par élévation de température (45°C, 20 min), connus comme facteurs de stress et d'apoptose pour la peau. Les auteurs concluent que le signal GSM testé n'apparaît pas comme un facteur de stress pour les cellules de peau humaine *in vitro*.

[60] Il existe différentes formes de HSP70 (isoformes) qui réagissent différemment selon le stimulus, le tissu considéré et le stade du cycle cellulaire.

- Etudes *in vivo*

Sanchez *et al.* (2008) ont ensuite examiné l'expression des protéines de stress *in vivo* avec des signaux GSM 900 et GSM 1800, chez des rats *nude* (sans poil) répartis par groupes de 8 : exposés, *shams* et contrôles cage. L'exposition est soit aiguë (2 h, 5 W/kg), soit répétée à raison de 2 h/jour, 5 j/semaine pendant 3 mois (2,5 et 5 W/kg). Aucun effet des radiofréquences n'a été observé sur l'expression de HSC70, HSP 25 et HSP70 par immunomarquage sur des coupes minces de peau fixée juste après exposition, quelles que soient les conditions (DAS, type de signal utilisé, durée). La dosimétrie est faite de façon numérique, confirmée par mesures physiques sur des fantômes de rat. Notons que cet article fait partie d'un groupe de trois publications dans lesquelles les auteurs ont cherché à mettre en évidence des effets de l'exposition à un signal GSM (900 MHz et 1 800 MHz) sur des paramètres histologiques et physiques (épaisseur, nécrose, prolifération, collagène, élastine, *etc*.) de la peau de rat *nude* en conditions aiguë (2 h, 5 W/kg, Masuda *et al.*, 2006) ou semi-chronique (4 mois, Sanchez *et al.*, 2006b).

Lee *et al.* (2005) ont exposé pendant 10 semaines des souris d'une lignée déficiente en HSP 70 (créées au départ pour étudier le rôle des HSP) à un signal CDMA à 1 762,5 MHz (0,4 W/kg). L'expression de HSP 70, 90 et 27 et la phosphorylation de kinases (activées par le stress) ont été analysées par *western blot*. En parallèle, une analyse histopathologique des principaux tissus et organes a été faite ainsi que l'évaluation de la prolifération cellulaire et de l'apoptose. Les paramètres sont mesurés à des temps variables pendant, juste après l'exposition ou suite à un délai après l'exposition. Aucune différence statistiquement significative n'a été observée entre les groupes. Cette même équipe n'a pas non plus trouvé d'effet *in vitro* avec des signaux CDMA 849 MHz et 1 763 MHz (étude détaillée précédemment, *cf.* chapitre 4.4.1.1.1).

En résumé, sur les 13 articles de recherche analysés :

Onze articles relatent des expositions *in vitro* et 2 études ont été réalisées *in vivo*, en exposition de type GSM à 900 et 1800 MHz (Sanchez *et al.* ; 2008) ainsi qu'à un signal CDMA à 1 762,5 MHz (Lee *et al.*, 2005).

Les niveaux de DAS sont compris entre 0,4 et 10 W/kg pour la plupart, avec généralement au moins une valeur proche de la limite d'exposition locale de 2 W/kg. Une équipe utilise un niveau d'exposition extrêmement faible (Dawe *et al.*, 2006) à 1 000 MHz. L'étude a été reprise en 2008 avec un DAS plus élevé, tandis qu'une équipe va au delà de la limite d'apparition d'effets thermiques avec des valeurs de DAS jusqu'à 10 W/kg et plus (jusqu'à 200) à 2 450 MHz en onde continue (Miyakoshi *et al.*, 2005 et Wang *et al.*, 2006). Les signaux utilisés sont majoritairement ceux employés dans les systèmes de télécommunications mobiles de type GSM. Dans l'ensemble, la partie physique des études a été bien prise en compte, les systèmes utilisés sont adaptés et la dosimétrie décrite est correcte avec simulation numérique et confirmation par mesure physique. Seuls Dawe *et al.* présentent une dosimétrie incomplète en 2006, cette question est résolue dans l'article publié en 2008, ce qui permet de comparer leurs résultats avec ceux de l'ensemble de la communauté.

Quatre articles font état d'effets liés à l'exposition dont deux avec des DAS supérieurs à 10 W/kg. Miyakoshi *et al.* (2005) observent une diminution du taux de phosphorylation de HSP70 à 10 W/Kg et pas d'effet sur l'expression des HSP27 et 70, tandis que Wang *et al.* (2006) observent un effet à partir de 100 W/kg qui est vraisemblablement d'origine thermique au vu de la puissance appliquée. Sanchez *et al.* (2006) ont observé une différence entre *sham* et exposé à un signal GSM 900 (2 W/kg) dans un modèle de peau reconstituée (HSP70) et un profil d'expression différent entre deux souches de fibroblastes en culture mais dans des conditions de culture différentes. Les auteurs ont estimé que ces variations ne sont pas susceptibles d'avoir des répercussions au niveau de la peau et n'ont, par la suite, pas retrouvé d'effet sur des cellules isolées de peau *in vitro*, ni sur la peau *in*

vivo (Sanchez *et al.*, 2008). La troisième équipe n'observe pas d'effet lors d'exposition de 1 h à 2 W/kg à 1800 MHz continue ou GSM (Valbonesi *et al.*, 2008). Une modification du niveau de transcription du gène pour une isoforme de HSP70 sur les trois analysées (quantité d'ARNm) est observée par RT-PCR par rapport aux *shams,* avec une augmentation après exposition de 24 h à un type de signal GSM (modulation 217 Hz) et diminution avec l'autre (GSM-*talk*) après 4 et 16 h, sans effet sur la viabilité cellulaire (Franzellitti *et al.*, 2008). Cet effet n'est pas très cohérent et s'avère sans répercussion sur la quantité de protéines.

Neuf articles ne montrent pas d'effet d'une exposition aux radiofréquences sur la synthèse des HSP, en particulier dans des cellules immunitaires (monocytes et lymphocytes) et au niveau de la peau, ni sur l'activation du facteur de transcription HSF.

Par ailleurs, les études répertoriées dans la catégorie expression génique n'ont pas fait apparaître de consensus indiquant une expression accrue de protéines de stress sous l'effet des radiofréquences.

D'après l'ensemble des travaux analysés, les radiofréquences n'apparaissent pas être un facteur de stress pour les cellules, pour des niveaux d'exposition non thermiques.

4.4.1.2 Effet sur le stress oxydant et la production de radicaux libres

Les radicaux libres, espèces radicalaires ou encore « espèces réactives oxygénées » dont il est question ici, sont des dérivés réactifs de l'oxygène, communément appelées ROS dans le jargon scientifique pour *Reactive oxygen species*. Il s'agit d'espèces chimiques, possédant un ou plusieurs électrons non appariés, indiqué par un ou plusieurs points ($O^{\bullet}$). La présence d'un électron célibataire confère une grande instabilité à ces molécules qui cherchent à se stabiliser et peuvent réagir avec de nombreux composés dans des processus non spécifiques. Leur durée de vie en solution est très courte. L'électron célibataire sera cédé ou bien un électron sera récupéré par des réactions d'oxydation ou de réduction, respectivement. Parmi les plus connus se trouvent les radicaux supéroxyde $O_2^{\bullet -}$, le monoxyde d'azote $^{\bullet}NO$; l'hydroxyle $HO^{\bullet}$ et le peroxyle ($ROO^{\bullet}$). Ces deux derniers sont particulièrement réactifs.

La production de radicaux libres est normale et nécessaire pour tous les organismes vivants aérobies. Cela ne constitue pas en soi une situation de stress oxydant car la cellule dispose d'un système complexe et puissant de détoxification comprenant notamment les enzymes superoxyde dismutase (OD), catalase (CAT), glutathion peroxydase (GPX) et des petites molécules (vitamine E, vitamine C, *etc*.) qui évitent l'accumulation des ROS[61].

Le stress oxydant (ou stress oxydatif) est un type d'agression des constituants de la cellule dû aux espèces réactives oxygénées et azotées oxydantes. Il peut y avoir oxydation de l'ADN, des protéines, des lipides (constituants de la membrane cellulaire), des glucides, mais

[61] La SOD catalyse la transformation de deux ions superoxydes en eau oxygénée ($O_2^{\bullet -} + O_2^{\bullet -} + 2H^+ \rightarrow H_2O_2 + O_2$). Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2 ou HOOH = eau oxygénée), produit lors de la détoxification de l'ion superoxyde par la SOD est assimilé à un ROS car, en présence de fer, il se dismute en deux radicaux hydroxyle ($OH^{\bullet}$) par la réaction de Haber-Weiss. La CAT permet la dismutation du peroxyde d'hydrogène en oxygène et eau ($2H_2O_2 \rightarrow O_2 + 2H_2O$), évitant ainsi la formation de radicaux hydroxyles (HO•). La GPX, enzyme à sélénium, détruit l'eau oxygénée et les hydroperoxydes ROOH parallèlement à la réduction du glutathion (ROOH + 2GSH→GSSG + ROH + 2H2O). La régénération du glutathion réduit GSH qui est assuré par la glutathion réductase. Un déficit en GPX ou en CAT favorise l'accumulation de H_2O_2 et donc la formation de OH•.

aussi apparition de lésions secondaires dues au caractère cytotoxique et mutagène des métabolites libérés notamment lors de l'oxydation des lipides[62].

Si les ROS jouent un rôle actif essentiel à certains processus biologiques (apoptose, défense de l'organisme, vasodilatation capillaire, communication neuronale, *etc*.), ils peuvent aussi avoir des actions délétères sur les tissus (inflammation), voire cancérogènes si leur taux est trop élevé. Les mécanismes de protection contre les ROS sont moins performants avec l'âge et le stress oxydant paraît jouer un rôle dans l'apparition de maladies neurodégénératives ainsi que dans d'autres maladies (par exemple athérosclérose, hypertension, certaines formes de diabète).

Il est important de savoir si les radiofréquences sont susceptibles de faire varier la quantité de radicaux libres dans des cellules ou des organismes vivants.

Il n'est pas facile d'apprécier simplement et de manière fiable la réalité des modifications de l'équilibre pro-antioxydant. Ce dernier est estimé par la quantité de radicaux libres ou par le niveau d'activité des enzymes responsables de la dégradation des ROS. Par ailleurs, l'oxydation des lipides génère la formation de malondialdehyde (MDA) et celle des protéines entraîne la libération du groupement carbonyle des acides aminés[63] endommagés (Figure 23) qui vont pouvoir être employés comme marqueurs.

En pratique, la détection directe des espèces radicalaires peut être faite par des méthodes physiques, comme la résonance paramagnétique électronique (RPE), qui nécessite un équipement spécifique lourd et très cher. Il existe aussi des techniques pour évaluer le taux de radicaux libres captés par des molécules luminescentes (*trapping* ; TRAP) ; la mesure de luminescence est alors proportionnelle à la quantité de radicaux libres de l'échantillon.

En outre, de nombreuses investigations en laboratoire reposent sur trois types de méthodes : a) la détermination biochimique des réserves en certains constituants vitaminiques (vitamine C, E et rétinol) ou minéraux (sélénium, zinc par exemple) ou de composés endogènes (glutathion) ; b) la détermination d'activités enzymatiques impliquées dans les défenses antioxydantes (SOD, catalase, GPX) dans les plasmas, les globules rouges ou d'autres cellules ainsi que le taux de gluthation réduit (GSH) ; c) l'estimation des conséquences tissulaires d'une peroxydation (taux MDA[64] ou dérivés, isoprostanes, dérivés des acides nucléiques après peroxydation, test des comètes, *etc*.).

---

[62] - Favier A., *Le stress oxydant*, L'actualité chimique - novembre-décembre 2003, 108-115. http://ist.inserm.fr/basisdiaggen/AC/2003-11-12/Favier.pdf ;

[63] - Les protéines sont des enchaînements d'acides aminés.

[64] - La quantification du MDA est souvent utilisée, elle est réalisée par dosage colorimétrique (535 nm) d'un complexe coloré obtenu par condensation avec deux molécules d'acide thiobarbiturique.

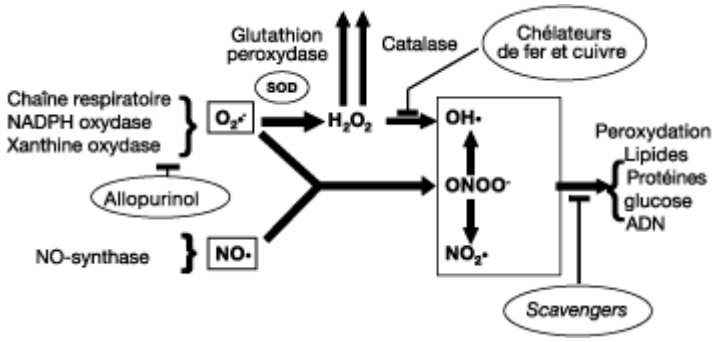


Figure 23 Réaction en chaîne des différents mécanismes de défense spécifiques (*illustration d'après X. Leverve, Conférences d'actualisation de la SFAR,* 2004, Elsevier SAS, p*. 295-302*).

Treize publications ont été rattachées à cette thématique. Parmi les études analysées, 7 ont été réalisées *in vitro*, dont deux sur un modèle végétal très simple et 6 *in vivo* sur des rats.

La plupart des expositions ont lieu à des fréquences de téléphonie mobile avec modulation GSM (et en onde continue pour deux équipes). Une étude concerne les systèmes de téléphonie mobile de 3ème génération (UMTS). Les valeurs du DAS sont essentiellement centrées autour des limites réglementaires de 0,3 à 5 W/kg. Plusieurs études testent l'effet de différents niveaux du DAS (Feirreira 2006, Lantow 2006a, Zeni 2007, Brescia 2009). Une équipe utilise une seule valeur du DAS très faible de 0,01 W/kg (Yurekli 2006) et deux études ne mentionnent pas ce paramètre (Tkalec *et al.*, 2005 et 2007).

Etudes *in vitro*

Lantow *et al.* (2006 a et b) ont exposé des cellules de sang humain (2006a) et des cellules tumorales d'origine immunitaires Mono Mac6 et K562 (2006b) pendant 45 min à 1 800 MHz en CW et avec un signal GSM intermittent (5 min *on* / 5 min *off* ; avec différents types de modulation) pour des DAS de 2 W/kg et de 0,5 à 2 W/kg (0,5 - 1 - 1,5 et 2). L'exposition est combinée ou non avec l'action d'un promoteur tumoral (phorbol-12-myristate-13-acétate : PMA). Des contrôles positifs sont effectués (effet de la température à 40°C ou effet LPS, stimulant du système immunitaire). Dans les deux études, les auteurs observent des effets inexpliqués dans certains *shams* (diminution des ROS). Ces *alea* soulignent l'importance des contrôles réalisés en plus des *shams* qui ont permis aux auteurs de détecter un effet faussement positif, lié à un problème expérimental. En effet une diminution du taux de ROS dans les sham aurait pu donner l'impression d'une augmentation dans les cellules exposées, alors que ces derniers n'ont pas variés. Au final, aucun effet de l'exposition n'a été mis en évidence sur la quantité de ROS produit en présence ou non de PMA, ni sur l'expression des protéines HSP70, mesurée afin d'évaluer leur implication possible comme inhibiteur de la production de ROS. La dosimétrie est validée. Ces articles sont également traités dans le chapitre 4.4.1.6.

Zeni *et al.* (2007) n'ont pas observé d'effet d'une exposition GSM 900 (DAS 0,3 et 1 W/kg) courte (10 et 30 min) seule ou combinée avec un agent mutagène (MX)[65] sur la synthèse de ROS dans des cellules murines en culture (lignée L929, fibroblastes). Par contre, le MX induit la synthèse de ROS dans les cellules *shams* aussi bien qu'exposées - ce qui confirme ses capacités à induire un stress oxydant – mais n'est pas augmentée par les

[65] 3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(5H)-furanone, substance cancérogène.

radiofréquences. La valeur du DAS est obtenue par simulation numérique et confirmée par des mesures physiques.

Hoyto *et al.* (2008) ont exposé des cellules humaines (SH-SY5Y, neuroblastome) et murines (L929, fibroblastes) pendant 1 h à un champ radiofréquences 872 MHz continu ou modulé GSM avec un DAS de 5 W/kg. Les cellules sont exposées aux radiofréquences seules ou combinées avec un traitement par des agents toxiques induisant un stress oxydant. La peroxydation lipidique est induite par le tert-butylhydroxyperoxyde (t-BOOH) tandis que l'induction de la formation de ROS est testée par dosage du glutathion réduit (GSH) suite à l'action de la ménadione. Par ailleurs, d'autres paramètres sont examinés : prolifération (test alamarBlue), viabilité cellulaire (comptage), apoptose (activité caspase-3) et fragmentation de l'ADN (électrophorèse). Quatre lots de cellules sont comparés (I : non exposé, II : exposé aux radiofréquences; III : traité par agent toxique (sans radiofréquences) ; IV : exposé aux radiofréquences avec un agent toxique). Les résultats indiquent une augmentation de la peroxydation lipidique induite par le t-BOOH dans les cellules SH-SY5Y exposées au signal GSM mais pas dans les L929 traitées par menadione, tandis que c'est le contraire pour l'activité caspase 3. Aucun effet n'a été identifié dans les autres conditions testées et pour les autres paramètres biologiques examinés. Aucun effet de l'exposition aux radiofréquences seules n'a été observé. L'analyse des graphiques permet de voir que le taux d'apoptose observé en condition « exposée GSM + menadione » n'est pas supérieur à celui obtenu avec exposition en onde continue (CW), mais que c'est le contrôle menadione seule qui présente un taux d'apoptose inférieur dans ce lot de cellules. Le nombre de répétitions de chaque expérience n'est pas mentionné. Au final, les auteurs concluent que les résultats ne confirment pas l'augmentation du stress oxydatif (pas de variation du taux de GSH dans les cellules), qu'un effet transitoire ne peut être exclu et que d'autres travaux devraient être faits pour tenter de reproduire les résultats.

Les résultats de Brescia *et al.* (2009), de la même équipe que Zeni *et al.* (2007), n'indiquent pas d'effet de l'exposition à un signal UMTS à 1 950 MHz (DAS 0,5 et 2 W/kg) de durée plus ou moins longue (de 5 à 60 min et 24 h) sur la viabilité, ni sur la production de ROS par des cellules humaines d'origine lymphocytaire (lignée Jurkat) traitée ou non avec du sulfate de fer ($FeSO_4$). Les ions ferreux (Fe2+) sont connus pour induire un stress oxydant via la formation de radicaux hydroxyles ($OH^{\bullet}$). Les cellules sont traitées en même temps ou avant l'exposition aux radiofréquences. La production des ROS est mesurée par cytométrie en flux à l'aide d'une sonde fluorescente (dichlorofluoresceine) sur 10 000 cellules par condition. Les dosimétries numérique et expérimentale sont bien décrites. La viabilité cellulaire est évaluée par deux méthodes complémentaires (test au rouge neutre et test à la réazurine) qui n'agissent pas sur les mêmes fonctions cellulaires au cas où une voie serait altérée par les radiofréquences.

Etudes sur des systèmes végétaux simples

Tkalec *et al.* (2005) ont observé des effets sur la croissance et l'activité peroxydase dans des lentilles d'eau cultivées en boîtes de pétri exposées à un champ radiofréquences de 400 ou 900 MHz continu ou modulé. Le modèle est intéressant par sa simplicité et la plante se reproduit rapidement en formant des clones qui sont comptés directement. Les résultats de croissance sur 14 jours sont présentés sous forme de moyenne des 7 réplications, sans écarts-types. Les auteurs trouvent une réponse dose-effet pour 2 h d'exposition à 400 MHz (23 - 41 – 390 V/m) à 3 jours de culture, tandis que les résultats à 900 MHz semblent incohérents (sans relation avec la durée d'exposition et les valeurs de champs). Néanmoins, c'est seulement pour la condition d'exposition à 900 MHz en signal modulé, à 41 V/m, pendant 2 h qu'ils trouvent une diminution de l'activité peroxydase de 41%. Il n'apparaît pas possible de relier l'effet observé sur l'activité peroxidase avec celui observé sur la croissance à 400 MHz. On relève dans cette étude l'absence de *sham* et d'indication sur le DAS.

Les mêmes auteurs (Tkalec *et al.*, 2007) ont publié une étude similaire du point de vue des conditions d'exposition (10 V/m, 2 h – 23 V/m, 2 h avec et sans modulation ; 41 V/m, 2 h –

23 V/m, 4 h, DAS non précisé) mais incluant un témoin positif (oxydant connu cadmium), un niveau d'exposition plus élevé (120 V/m) et avec plus de paramètres de stress oxydatif examinés : peroxydation lipidique (MDA), contenu en H2O2, activité catalase, taux d'autres enzymes antioxydantes (pyrogallol (PPX) et ascorbate peroxidase (APX)), expression HSP70 par *immunoblot*. Les expériences sont insuffisamment reproduites (2 fois). Il n'y pas de *sham* traité dans des conditions identiques aux boîtes exposées (en l'absence de champ radiofréquence), mais uniquement un contrôle. Le taux de ROS augmente un peu dans toutes les conditions. Dans ces deux études, les résultats apparaissent peu cohérents, et on ne peut éliminer une variation aléatoire, ni les relier à l'exposition aux radiofréquences.

Etudes *in vivo*

Oktem *et al.* (2005) ont exposé des rats 30 min/jour pendant 10 jours à un signal GSM 900 afin d'étudier des effets nocifs possibles des radiofréquences sur des homogénats de reins, et sur l'effet d'un traitement par la mélatonine. Les niveaux d'exposition testés ne sont pas précisés. Les auteurs justifient l'étude du rein qui serait l'organe le plus exposé lorsque le téléphone est porté à la ceinture. La mélatonine est employée pour ses propriétés indirectement antioxydantes *via* stimulation de l'expression de protéines antioxydantes. Les animaux sont répartis en 3 groupes de 8 : 1/ *sham* (avec injection journalière d'excipient alcool/eau salée), 2/ exposés (sans injection) et 3/ exposés + mélatonine (injection journalière, dissoute dans alcool/eau salée). Il n'y pas de *sham* sans injection pour le groupe exposé sans mélatonine. Il n'y pas de groupes contrôles cage et il manque un contrôle positif. Les animaux sont anesthésiés avant exposition. Les activités SOD, GPX et catalase diminuent tandis que les taux de MDA et d'un marqueur de dégradation tubulaire (urinaire) sont augmentés dans le groupe exposé par rapport au groupe *sham*. Aucun effet n'est observé pour le groupe exposé traité par une injection journalière de mélatonine. Les variations, lorsqu'elles sont statistiquement significatives, sont très faibles. Le groupe exposé traité par la mélatonine présente pour sa part une augmentation statistiquement significative de l'activité GPX par rapport au *sham*. Le nombre d'animaux testés n'est pas suffisant pour assurer la puissance de l'étude. Les résultats observés devraient être confirmés après contrôle des variables expérimentales pour pouvoir les interpréter.

Ozguner *et al.* (2005a), de la même équipe, propose dans la continuité de comparer l'effet protecteur de la mélatonine et du CAPE (acide phenetyl-ester caféique), un composant du propolis (résine recueillie par les abeilles sur l'écorce et les bourgeons de certains arbres) qui présente des propriété antioxydantes. Le protocole est le même que dans l'article de Oktem *et al.* (2005), avec 10 rats par groupe mais les agents antioxydants sont administrés par injection pendant 10 jours avant exposition. Les résultats pour le groupe exposés avec ou sans mélatonine sont identiques, sauf pour la catalase dont l'activité n'est pas modifiée par l'exposition, cette fois. Le CAPE n'a pas le même effet que la mélatonine et les auteurs concluent que c'est un antioxydant moins puissant. Comme dans l'étude précédente, il n'y a pas de groupe contrôle permettant de connaître les effets du traitement indépendamment de l'exposition aux radiofréquences ni hors du système d'exposition, et pas de *sham* sans injections. Il est mentionné qu'une valeur de DAS de 1,04 W/kg est obtenue par mesure, sans d'autres explications.

Ozguner *et al.* (2005b) relatent des effets similaires sur des extraits de cœurs de rats exposés dans des conditions expérimentales similaires, avec le CAPE comme antioxydant. La partie physique est peu documentée par les auteurs et les lacunes méthodologiques ne permettent pas de savoir d'où viennent les effets observés.

Feirreira *et al.* (2006) n'ont pas mis en évidence de modification du taux de ROS, ni de marqueur de stress oxydant au niveau de protéines ou des lipides chez des rats de différentes tranches d'âges, exposés à la fréquence 834 MHz durant 7 h 30, 7 nuits de suite. L'analyse est faite dans le cortex frontal et l'hippocampe à différents temps après l'exposition. La partie matériel et méthode est bien détaillée en ce qui concerne les

protocoles expérimentaux des dosages effectuées mais la partie physique semble peu maîtrisée avec un système d'exposition inadapté (téléphone mobile) et des calculs de DAS inappropriés.

Yurekli *et al.* (2006) ont mis en évidence une augmentation du taux de MDA et de l'activité SOD, parallèlement à une diminution de la concentration en gluthation réduit (GSH) dans le sang de rats exposés 7 h/j pendant 8 jours à un signal GSM à 945 MHz avec un DAS de 0,011 W/kg, comparé aux *shams* (9 par groupe). Un contrôle positif aurait permis d'évaluer l'importance des variations observées par rapport à des effets délétères connus. Par ailleurs, il y a deux phases dans le protocole : le groupe *sham* n'est pas traité en même temps que le groupe exposé et il n'y a pas de groupe contrôle cage, ce qui laisse ouverte la possibilité d'un biais expérimenta, d'autant que le nombre d'animaux est faible l. La dosimétrie est réalisée de façon rigoureuse.

Elhag *et al.* (2007) ont examiné les effets d'une exposition sur les concentrations en vitamines A, C et E plasmatiques. Les rats sont répartis en 3 groupes : 1/ contrôle, 2/ exposé 15 min/j pendant 4 jours ; 3/ exposé en une fois (aiguë). Une augmentation du taux de vitamine C et du GSH est observée dans les 2 groupes exposés, une diminution des vitamines E et A dans les exposés, ainsi qu'une diminution des activités CAT et SOD, plus importante dans le cas de l'exposition aiguë. Les variations fournies, de l'ordre de 20 à 60 % selon les cas, sont relatives au groupe contrôle car il n'y a pas de groupe *sham*. En conséquence, ces résultats n'apportent aucun élément de réponse quant à l'effet des radiofréquences.

En résumé, sur les 13 études analysées rattachées à la thématique «radiofréquences, radicaux libres et stress oxydant », il y a 7 études *in vitro* et 6 *in vivo*. Aucune des études *in vivo* n'est réalisée en aveugle et le nombre d'animaux par groupe est généralement assez faible (11 au *maximum*).

Plus de la moitié de ces travaux (7) présentent des lacunes méthodologiques dans la partie physique, pour laquelle la dosimétrie n'est pas correcte ou absente, ce qui ne permet pas de connaître l'énergie absorbée, ainsi que d'éventuels problèmes dans la partie biologique, notamment des contrôles incorrects qui ne permettent pas de rattacher les effets observés à l'exposition aux radiofréquences. Ces études sont conduites *in vivo* sauf deux qui utilisent un modèle végétal. Parmi elles, une équipe n'observe pas d'effet des radiofréquences (Ferreira *et al.*, 2006) et les 6 autres font état d'effets des radiofréquences sur le stress oxydant dont 3 publications sur le rat issues d'une même équipe (Oktem *et al.*, 2005 ; Ozguner *et al.* 2005a et b), une autre sur le rat par une autre équipe (Elhag *et al.*, 2007) et deux avec des lentilles d'eau (Tkalec *et al.*, 2005 et 2007).

Deux études présentent une partie physique correcte mais sont limitées d'un point de vue biologique. L'une, *in vivo*, montre des effets d'un signal GSM détecté dans des échantillons de sang de rat pour un niveau de DAS extrêmement faible (0,011 W/kg) mais il n'y a pas de groupe contrôle et les *shams* ne sont pas traités en même temps que le groupe exposé (Yurekli *et al.*, 2006). L'autre, *in vitro*, avec un DAS élevé (5 W/kg), indique des effets pour une lignée cellulaire (L939) sur deux testées, et uniquement avec le signal GSM combiné avec un mutagène (pas en onde continue). Cependant, comme les auteurs l'indiquent, les multiples variations introduites à tous les niveaux dans les conditions expérimentales ne favorisent pas le dégagement d'une conclusion claire (Hoyto *et al.*, 2008).

Des études de qualité tant pour les parties physique que biologique ont été réalisées *in vitro* avec des expositions radiofréquences à 900 et 1 800 MHz en onde continue et de type GSM (Lantow *et al.*, 2006a et b, Zeni *et al.*, 2007) et à 1 950 MHz avec un signal de type UMTS (Brescia *et al.*, 2009), pour des DAS de 0,5 à 2 W/kg. Dans les différentes conditions expérimentales testées, il n'est pas observé d'effet direct des radiofréquences sur la synthèse de radicaux libres, ni d'effet combiné avec des agents toxiques connus, dont l'action induit un stress oxydant qui aurait pu être potentialisé.

En conclusion, l'ensemble des résultats ne permet pas de conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur la synthèse de ROS pour des niveaux d'exposition non thermiques.

4.4.1.3 Effets sur l'ADN

Contrairement aux radiations ionisantes, l'énergie véhiculée par les radiofréquences n'est pas suffisante pour provoquer directement des cassures au sein des molécules d'ADN, et aucun mécanisme pouvant expliquer un tel effet biologique n'est actuellement décrit. Néanmoins, les effets des radiofréquences sur l'intégrité du matériel génétique (ADN, support moléculaire des chromosomes et donc des gènes), dits aussi effets génotoxiques, sont très étudiés et ont donné lieu à une littérature abondante car ils pourraient conduire à des mutations et, éventuellement à terme, au développement de cancers. Le processus de transformation d'une cellule normale en cellule tumorale est complexe[66]. Certaines études s'intéressent aux altérations de l'ADN induites directement par les radiofréquences (génotoxicité), d'autres aux effets combinés des ondes avec un agent mutagène pour voir si l'exposition est susceptible de modifier l'action de ce toxique sur l'ADN (co-génotoxicité).

L'investigation des effets potentiellement génotoxiques et co-génotoxiques des radiofréquences est faite au travers d'études *in vitro* sur des cellules en culture ou fraîchement isolées, souvent des lymphocytes obtenus par prélèvement sanguin, et *in vivo,* par l'exposition d'animaux ou d'humains puis analyse de l'état de l'ADN sur des prélèvements (sang ou autres tissus). Pour cette thématique de recherche, il y a une majorité d'études *in vitro* car l'idée est avant tout d'estimer si les champs électromagnétiques de faible intensité sont capables ou non d'agir au niveau du génome comme mutagène ou potentialisateur d'agents mutagènes connus. Les agents physiques ou substances qui ont un tel effet dans l'organisme vivant entier l'exercent également sur des cellules en culture, sauf s'ils nécessitent une transformation préalable par l'organisme pour devenir actif, ou agissent indirectement via une altération du métabolisme cellulaire.

---

[66] Les cellules cancéreuses se caractérisent par une croissance anarchique. Elles ne répondent plus aux mécanismes de contrôle qui régulent normalement la division cellulaire dans un tissu. Schématiquement, elles sont soit devenues "immortelles" par échappement au phénomène d'apoptose (*cf.* 4.4.1.4), soit elles n'arrêtent plus de se diviser. Le passage de l'état de cellules normales à celui de cellules tumorales invasives s'opère en plusieurs étapes dont certaines sont réversibles. Une mutation est à l'origine du processus dans la grande majorité des cas. Il existe aussi des prédispositions héréditaires et des gènes dits oncogènes qui sont capables de jouer un rôle dans le développement de cancers. On distingue classiquement 3 étapes dans le processus de cancérogenèse : initiation, promotion et croissance tumorale. La phase d'initiation est l'étape essentielle, induite par un agent tumoral chimique ou physique (substances toxiques chimiques ou naturelles, virus, radiations ionisantes, UV, erreurs de réplication, erreurs de réparation, radicaux libres, agents inconnus, *etc*.). Notons que la plupart des altérations de l'ADN proviennent du métabolisme lui-même, sans pour autant conduire systématiquement à un cancer, car il existe un système de réparation de l'ADN très actif. Ainsi, chez l'homme, le nombre de lésions spontanées de l'ADN est estimé à 50 000 par 24 h en moyenne dans une cellule normale. Des changements irréversibles se produisent dans la cellule initiée qui peut rester longtemps dans un état latent jusqu'à une étape de promotion. Les agents promoteurs ne sont généralement pas eux-mêmes des cancérigènes (hormones, promoteurs spécifiques, facteurs de croissance, facteurs de l'inflammation, radicaux libres, *etc*.). La cellule peut alors passer dans une phase de croissance caractéristique du cancer, son métabolisme change. Les tumeurs bénignes peuvent se produire dans n'importe quel tissu mais elles restent localisées tandis que les tumeurs malignes ont la capacité de partir coloniser d'autres régions et de former des métastases. Les tumeurs bénignes peuvent évoluer en tumeurs malignes. L'ensemble du phénomène procède par des jeux complexes d'activation, d'inhibition et d'interaction de voies biochimiques.

Différentes techniques sont employées pour évaluer le taux d'altération du matériel génétique des cellules eucaryotes (humaines, animales ou végétales) et procaryotes (bactéries). Les lymphocytes humains obtenus par prélèvement sanguin sont un modèle couramment utilisé pour ce type d'investigation. Sans faire un catalogue des techniques disponibles, celles qui ont été utilisées pour l'étude des effets des radiofréquences sont présentées brièvement ci-dessous.

Très schématiquement, le test des comètes permet de quantifier assez directement le taux d'altération de l'ADN en faisant migrer par électrophorèse les cellules préalablement perméabilisées dans un gel déposé sur des lames de microscope. Les fragments d'ADN, plus petits, sont entraînés plus loin en fonction de leur taille et forment une image en comète à l'avant des molécules intactes du noyau. Selon le procédé employé, il est possible de détecter des cassures double et/ou simple brin. Différents paramètres sont fournis par les logiciels d'analyse d'image pour quantifier le taux d'altération de l'ADN et il est connu que certains paramètres rendent mieux compte du taux de cassures que d'autres. En particulier, ceux qui intègrent à la fois la longueur de la comète et la quantité d'ADN qu'elle contient (relatif à l'intensité de la coloration) sont les plus fiables.

Le test des micronoyaux s'appuie sur la présence de fragments d'ADN circulaires détachés du génome, visibles au microscope dans le noyau des cellules. Ils résultent des altérations et des erreurs de réparation et persistent sur plusieurs générations de cellules. Ils peuvent être comptés par l'expérimentateur (opération fastidieuse pouvant entraîner des biais par sa subjectivité) ou bien quantifiés par cytométrie en flux qui permet l'analyse sur un plus grand nombre de cellules, mais peuvent alors être confondus avec des débris cellulaires.

La technique de détection de la protéine H2AX permet pour sa part de quantifier la forme phospohrylée de cette histone[67] qui forme des agrégats (*foci*) au niveau des lésions de l'ADN, en particulier les cassures double brin avec une meilleure sensibilité que le test des comètes.

La protéine 53BPR (P53 *binding protein* 1, liée à l'ADN en cas de lésion) est également utilisée pour mettre en évidence les lésions de l'ADN par immunofluorescence. Les méthodes d'observation des aberrations chromosomiques ou d'échanges de chromatides sœurs sont également utilisées pour détecter des événements précoces pouvant être associés à un processus de cancérisation.

La technique de FISH (*Hybridation Fluorescente In Situ*) consiste à colorer une partie d'un chromosome (centromère ou télomères par exemple) par hybridation de séquences complémentaires d'ADN en utilisant des sondes fluorescentes *in situ* (directement dans les cellules). C'est une technique ciblée qui ne permet pas d'étudier l'ensemble des chromosomes, mais seulement une partie d'un ou de deux chromosomes. Elle n'est pas adaptée pour étudier la génotoxicité sur l'ensemble du génome.

Une seule équipe emploie une technique de mesure de la viscosité (AVDT) pour rendre compte de l'état de condensation de la chromatine, ainsi qu'une méthode d'électrophorèse en champ pulsé (PFGE).

Enfin, le taux de mutation peut être évalué sur des bactéries par le test de *Ames* qui est un des tests classiquement employé pour tester la mutagénicité de substances chimiques afin de les classer comme cancérigènes ou non.

Tous ces tests sont délicats en ce qui concerne aussi bien leur mise en œuvre que l'analyse et l'exploitation des résultats, en particulier lorsque les effets observés sont faibles. Un mauvais état des cellules peut conduire à des faux positifs. Pour une interprétation correcte et avant de tirer des conclusions, les résultats obtenus doivent être reproductibles et confirmés par des approches différentes pour s'assurer de la réalité d'un effet des radiofréquences, comme, du reste, pour tout autre agent physique ou chimique testé.

[67] Histones : protéines qui interviennent dans les processus de réparation ou de réplication de l'ADN.

Notons que des effets thermiques sur les cassures d'ADN sont détectés habituellement à partir d'une élévation sensible de température pouvant atteindre de 4 à 6°C selon les cellules et la méthode de détection utilisée.

Cinquante-six publications ont été rattachées à cette thématique de recherche. 7 revues ont été lues (Colonna, 2005 ; Verschaeve, 2005 ; Behari and Paulraj, 2007 ; Vijayalaxmi and Prihoda, 2008 ; Rudiger, 2009 ; Verschaeve, 2009 ; Dasenbrock, 2005) ainsi que 3 lettres à l'éditeur (Vijayalaxmi, 2006 ; Lerchl A., 2009 ; Rudiger, 2009b). 3 articles en langue non anglaise n'ont pas été pris en compte.

Quarante-trois articles de recherche ont été analysés dont 28 études des effets potentiellement génotoxiques des radiofréquences, 11 études des effets cogénotoxiques des radiofréquences, c'est-à-dire en exposition combinée avec un agent génotoxique connu et 3 études concernant les effets mutagènes.

Les valeurs de DAS testées s'étagent de 0,05 à 200 W/kg, donc au-delà des conditions d'apparition d'effets thermiques.

La détection des cassures d'ADN par le test des comètes utilise très majoritairement la méthode alcaline qui permet de détecter des cassures simple et double brins.

4.4.1.3.1 Effets génotoxiques

Cette partie concerne 28 articles dont 21 études *in vitro*, 4 *in vivo* et 3 réalisées sur l'humain.

Quinze études font état d'effets des radiofréquences et 13 ne montrent pas d'effet dans des conditions d'exposition infra-thermiques. La partie dosimétrie est validée dans 21 articles concernant les études *in vitro* et *in vivo*.

Etudes *in vitro* de la génotoxicité des radiofréquences

- Etudes qui montrent des effets génotoxiques in vitro

Onze études ont été répertoriées, dont une publiée deux fois dans deux journaux différents (Yao *et al.* (2008a, 2008b). La partie dosimétrie est validée dans toutes les études sauf celle de Zotti-Martinelli (2005) où aucune valeur de DAS n'est mentionnée. Les fréquences vont 800 à 1 947,4 MHZ avec des signaux GSM, UMTS ou en onde continue.

Diem *et al.* (2005) ont travaillé dans le cadre du programme européen REFLEX à la fréquence 1 800 MHz continue ou GSM, en exposition continue ou intermittente sur des fibroblastes humains (ES1) et des cellules transformées GFSH-R17 de granulosa de rat, pendant des durées croissantes. Dans les deux types cellulaires, un effet est toujours observé en condition alcaline du test, il devient significatif à 16 h d'exposition. L'effet est supérieur en cas d'exposition intermittente mais pas lorsque l'exposition dure plus longtemps (même effet à 16 et 24 h d'exposition). Les effets n'ont pas été retrouvés lors d'une réplication de l'étude à l'identique réalisée en 2007 par Speit *et al.*

Une autre publication de la même équipe, Shwarz *et al.* (2008), montre des résultats positifs, même au DAS le plus faible (0,05 W/kg), avec des fibroblastes humains mais pas avec des lymphocytes exposés à un signal UMTS (0,05 - 0,1 - 0,5 - 1,0 - 2,0 W/kg). Le test des micronoyaux (MN) a également été utilisé. Dans ces deux articles, les écarts-types très faibles et tous identiques attirent l'attention, ce type de distribution est en effet tout à fait inhabituel dans ce type d'expérience. Le paramètre utilisé pour quantifier les cassures n'est pas le plus pertinent, le traitement particulier des résultats n'est pas bien expliqué. Tous ces éléments expliquent les interrogations qui ont pu être soulevées par ces études (Vijayalaxmi & al, 2006 ; Lerchl A., 2009) et qui ont été exprimées par [Vogel, 2008].

Lixia *et al.* (2006) ont testé l'effet d'une exposition GSM à 1 800 MHz sur des cellules de cristallin immédiatement après exposition ou après un délai (30, 60, 120 et 240 min) dans une lignée de cellules épithéliales de cristallin humaines, à 1, 2 et 3 W/kg. Une augmentation des cassures d'ADN a été observée. Parallèlement, ils n'ont pas relevé d'effet sur la prolifération cellulaire mais notent une augmentation de l'expression des HSP pour 2 et 3 W/kg, sans modification d'expression des ARNm. Les auteurs en concluent qu'il y aurait des lésions mais que les cellules sont capables de récupérer (les HSP aidant) et de maintenir leur niveau de prolifération. Le paramètre utilisé pour conclure sur les cassures d'ADN n'est pas le plus pertinent (longueur de la queue de comète) alors que le paramètre connu comme beaucoup plus fiable est donné, lui aussi, mais ne varie pas, ce qui amène à s'interroger sur l'existence réelle d'un effet.

Nikolova *et al.* (2005) ont observé une augmentation faible et transitoire des cassures d'ADN sur des cellules embryonnaires progénitrices de cellules du système nerveux de souris, à 6 h mais pas à 18 h d'exposition (GSM à 1710 MHz; 1,5 W/kg). Les auteurs ne considèrent pas les effets observés comme susceptibles de répercussions physiologiques.

Avec d'autres méthodes :

Zotti-Martelli *et al.* (2005) ont montré l'apparition de micronoyaux dans des lymphocytes humains exposés à un champ électromagnétique continu (1 800 MHz) pour différentes densités de puissance (5, 10 et 20 mW/cm^2, durée 60, 120 et 180 min) mais sans précision sur le DAS. Des mesures de température sous exposition indiquent qu'il n'y a pas d'élévation importante de la température (1°C à 20 mW/cm^2). L'expérience est faite deux fois à deux mois d'intervalle, l'effet varie avec la durée d'exposition mais pas de façon corrélée (plus d'effet à 60 et 180 mn qu'à 120 mn). L'absence de dosimétrie ne permet pas de conclure.

Belyaev *et al.* (2005, 2009), Markova *et al.* (2005), de la même équipe, ont comparé les lymphocytes du sang de donneurs se déclarant électrohypersensibles (EHS) et d'un nombre équivalent (5 à 7) de sujets normaux. L'exposition des lymphocytes prélevés est réalisée avec des signaux GSM à 905 MHz et à 915 MHz, ou UMTS (à 1 947 MHz), produisant des DAS similaires extrêmement faibles de 37 et 40 mW/kg respectivement (soit 0,037 et 0,04 W/kg) mais avec une grande inhomogénéité dans l'échantillon, pendant 1 ou 2 h. L'analyse de l'intégrité de l'ADN est faite principalement sur la base de la condensation de la chromatine (test AVDT), que seule cette équipe emploie et de la détection des agrégats de protéines H2AX et 53BP1. Dans l'étude de Belyaev *et al.* (2005), les cellules étaient également exposées (pendant 2 h) à un champ basse fréquence de 50 Hz (15 µT) indépendamment des expositions aux radiofréquences. Les auteurs ont trouvé les mêmes effets sur la condensation de l'ADN quel que soit le type d'exposition (radiofréquences ou 50 Hz) ainsi qu'une diminution de la détection de la protéine 53BPR. L'effet est semblable à celui obtenu par chauffage à 41°C et non spécifique aux sujets EHS. Les sondes utilisées pour mesurer la température ne sont pas adaptées pour fonctionner en environnement électromagnétique. Il est possible, de ce fait, qu'une augmentation de la température ne soit pas détectée. Les auteurs concluent qu'une modification de condensation de la chromatine masque l'accessibilité à cette protéine. Dans l'étude de Markova *et al.* (2005), les auteurs trouvent toujours une diminution de viscosité mais observent une augmentation du nombre d'agrégats (*foci*) détectés avec une exposition à 905 MHz pour 53PB1 et une diminution à 915 MHz pour 53PB1 et H2AX. Ces résulats contradictoires sont difficilement explicables pour des fréquences différentes de 10 MHz, alors que des effets identiques sont relatés avec 915 MHz et 50 Hz dans l'article précédent, indiquant plutôt une absence de spécificité. L'étude conduite en 2009 montre des différences entre les cellules des sujets EHS exposés en UMTS et en GSM à 915 MHz par rapport aux sujets non EHS, mais ne permet pas d'observer un effet « cohérent » à 905 MHz sauf chez un sujet, 24 h après exposition. Les résultats indiquent toujours des effets dans les deux populations étudiées, avec cette fois une différence entre sujets normaux et EHS à 1 750 MHz et 915 MHz, aux mêmes DAS que précédemment. Il y a une grande variabilité de la réponse, mais l'étude porte sur peu de cas. L'exposé des résultats est mal explicité. Les effets obtenus par les auteurs au fil des années manquent de concordance. Cependant, ils concluent que les résultats indiquent une

importance du signal de la porteuse (fréquence) et que les signaux UMTS auraient une efficience biologique supérieure au GSM, et donc pourraient induire un risque d'effet néfaste plus élevé pour la santé. L'examen détaillé des résultats nuance cette conclusion.

Yao *et al.* (2008a, 2008b) ont publié deux fois la même étude au cours de laquelle ils ont trouvé des effets sur des cellules épithéliales de cristallin avec le test des comètes et celui des micronoyaux. L'exposition est faite en signal GSM 1800 avec des DAS de 1, 2, 3 et 4 W/kg. L'effet du champ radiofréquences est testé seul ou avec superposition d'un champ magnétique de 2 µT de 30 à 90 Hz correspondant à un "bruit de fond" (*noise signal*) environnemental. Ce signal extrêmement basse fréquence seul n'a aucun effet sur la production de ROS, de dommage de l'ADN ni sur le test des comètes. L'effet génotoxique à été examiné avec le test des comètes ainsi que la détection de l'histone H2AX. Les auteurs ont également étudié la production de ROS, le cycle cellulaire (cytométrie en flux) et l'apoptose (cytométrie en flux). A l'inverse des expériences de co-génotoxicité, l'hypothèse n'est pas que les radiofréquences pourraient modifier l'effet d'un autre agent mais qu'un bruit électromagnétique pourrait modifier l'effet génotoxique des radiofréquences considéré comme avéré par les auteurs. Il n'y a pas d'effet des radiofréquences seules aux DAS de 1 et 2 W/kg. En revanche, à partir de 3 W/kg, il y a un accroissement du taux de cassures d'ADN détectées par le test des comètes et de la production de ROS, ainsi qu'un arrêt du cycle cellulaire en phase G0-G1. Un effet sur l'activation de H2AX n'apparaît qu'à 4 W/kg bien que ce test soit habituellement au moins aussi sensible que le test des comètes. Les effets observés sont nets et corrélés positivement à la valeur de DAS. Tous disparaissent avec superposition du champ basse fréquence à 2 µT. Cette étude est très atypique et les résultats sont peu réalistes (effet-dose, faibles écarts-type, notamment pour le test des comètes). Il n'est pas expliqué comment quelque chose qui n'a pas d'effet (2 µT) puisse supprimer un effet observé par ailleurs (avec les radiofréquences). Les auteurs fournissent des relevés de température qui n'indiquent pas d'élévation importante dans le milieu et l'examen de l'effet de la température (sans radiofréquences) sur les paramètres biologiques étudiés fait défaut (manque de contrôle).

Un article porte sur la détection d'anomalies génétiques examinées dans des lymphocytes issus de prélèvement sanguins humains par la méthode de coloration dite FISH :

Mazor *et al.* (2008) se sont intéressés pour leur part aux chromosomes 1, 10, 11 et 17 des lymphocytes (10 donneurs) exposés pendant 72 h à une onde continue à la fréquence de 800 MHz, produisant des DAS de 3 et 4 W/kg. Il y a augmentation du taux d'aneuploïdie après exposition pour les chromosomes 1 et 10 à 4 W/kg, et non à 3 W/kg. Le résultat contraire est obtenu pour les chromosomes 11 et 17 ou l'effet se situe à 2 W/kg. Notons que les deux valeurs de DAS sont très proches. Les auteurs concluent que ces résultats contribuent à indiquer l'existence d'un risque potentiel pour des valeurs de DAS proches des limites préconisées par l'ICNIRP. Néanmoins, bien que ce travail présente une partie dosimétrie bien faite, la cohérence et la portée de cette étude en terme d'effet biologique est limitée et l'extrapolation à la santé humaine faite par les auteurs n'apparaît pas justifiée en regard des expériences réalisées et des résultats obtenus.

- Etudes qui ne montrent pas d'effets génotoxiques in vitro

Dix études *in vitro* ne montrent pas d'effet génotoxique dans les conditions expérimentales utilisées. La dosimétrie est validée pour toutes les études.

Komatsubara *et al.* (2005) ont analysé les aberrations chromosomiques dans des cellules de peau embryonnaire (lignée) exposées pendant 2 h, à 2 450 MHz avec des DAS de 5, 10, 20, 50 et 100 W/kg en onde « continue » (CW), et en impulsion (émissions de 1 s séparées par 8 ou 17 s) avec un DAS moyen de 50 et 100 W/kg. Aux fortes puissances, la température est identique en ondes PW et CW pour les mêmes DAS et la température du milieu de culture

ne dépasse pas 39 et 41°C en 2 h, pour 50 et 100 W/ kg respectivement (mesurée par fibre optique). Aucun effet n'a été mis en évidence quelles que soient les conditions d'exposition.

Sannino *et al.* (2006), de la même équipe que Zeni *et al.* (2005, 2008), n'ont pas observé d'altération de l'ADN sur des lymphocytes humains exposés pendant 24 h à un signal UMTS (1 950 MHz) pour deux niveaux de DAS (0,5 et 2 W/kg) avec le test des comètes. Parallèlement, les auteurs n'ont pas noté de modification de la viabilité cellulaire liée à l'exposition. Les expériences sont réalisées en aveugle. La partie dosimétrie est détaillée, l'estimation par calculs numériques est complétée par des mesures expérimentales.

Scarfi *et al.* (2006) n'ont pas observé de variation du nombre de micronoyaux humains après 24 h d'exposition de lymphocytes en GSM 900 pour 3 valeurs de DAS (1, 5 et 10 W/kg). Les prélèvements proviennent de 10 donneurs sains (23 - 30 ans), réalisés indépendamment sur 5 sujets dans deux laboratoires différents avec des méthodes différentes de préparation des lames. Les expériences sont faites en double aveugle. L'analyse des lames est effectuée par deux personnes, et validée de façon croisée entre les deux laboratoires. Des contrôles positifs sont obtenus par incubation des cellules avec la mitomycine C. La dosimétrie par méthode numérique et confirmée expérimentalement.

Vijayalaxmi (2006) a étudié la réponse cytogénétique sur lymphocytes humains stimulés ou pas avec la PHA (stimulant du système immunitaire). Les résultats des recherches d'aberrations chromosomiques et des tests des micronoyaux n'indiquent pas d'effet dans les conditions expérimentales utilisées. Aucun effet cytotoxique n'a été observé après exposition à deux fréquences testées (2,45 GHz et 8,2 GHz) pour des DAS de 2 et 20 W/kg avec une température maintenue à 37°C dans les cultures.

Zeni *et al.* (2005, 2008) ont travaillé avec des leukocytes humains (cellules du sang), exposés dans la première étude à 900 MHz avec des signaux GSM et TDMA et un DAS de 0,3 et 0,1 W/kg, pendant 2 h, puis à un signal UMTS à 1950 MHz avec un DAS de 2,2 W/kg pendant 24 à 68 h dans la seconde étude. La température est contrôlée par fibre optique, la dosimétrie complète et le système bien décrit. Les cassures d'ADN (test des comètes), les échanges de chromatides sœurs, et les aberrations chromosomiques (SCE) ont été recherchés après exposition et comparés avec l'effet de mutagènes connus comme contrôles positifs. Les auteurs n'ont pas observé d'altération du génome dans aucune des conditions d'exposition radiofréquences testées.

Sakuma *et al.* (2006) n'ont pas observé d'altération avec le test des comètes pour lequels les auteurs donnent les résultats selon plusieurs paramètres de quantification des altérations. Les cellules ont été exposées à 2 142 MHz en onde continue ou modulée CDMA avec un DAS de 0,08 à 0,8 W/kg pendant 2 h et 24 h. Les tests ont été réalisés en aveugle.

Speit *et al.* (2007) n'ont pas trouvé d'effet des radiofréquences dans le cadre d'une replication de l'étude de Diem *et al.* (2005) en utilisant le même système d'exposition (signaux GSM et continus à 1 800 MHz) et les cellules fournies par l'équipe de Diem (lignées fibroblastes humains ES1). L'étude a été également conduite sur une lignée cellulaire de Hamster (V79) connue pour sa sensibilité et fréquemment utilisée dans les tests de génotoxicité. Les altérations d'ADN ont été analysées avec le test des comètes, quantifié selon plusieurs paramètres, et avec le test des micronoyaux. Cette équipe paraît mieux maîtriser la question des effets génotoxiques au vu des commentaires d'ordre méthodologique.

Huang *et al.* (2008a) ont exposé des cellules immunes T-Jurkat (lignée) à 1 763 MHz (signal CDMA) pour une gamme de DAS de 2 à 10 W/kg pendant 24 h. Aucun effet n'a été observé concernant les lésions d'ADN avec le test des comètes, ni sur la prolifération cellulaire, la progression dans le cycle cellulaire et l'expression des gènes. Cette étude est également rattachée au chapitre « effet des radiofréquences sur le système immunitaire ».

Valbonesi *et al.* (2008) ne trouvent pas d'effet sur des trophoblastes humains (lignée HTR-8/Svneo) exposés à un signal GSM à 1 817 MHz (DAS à 2 W/kg, pendant 1 h) sur l'expression des protéines HSP70 A, B et C inductibles et HSC70 constitutive en ce qui

concerne la quantité de protéines et le niveaux de transcription du gène (quantité d'ARNm). L'intégrité de l'ADN a aussi été examiné par le test de comètes. Ces cellules embryonnaires indifférenciées sont à l'origine de différents types cellulaires et présentent l'avantage d'être sensibles à un grand nombre de *stimuli*. Un contrôle positif est obtenu par incubation pendant 1 h à 43°C. Les contrôles positifs ne sont incubés que 1 h alors que le temps d'exposition aux radiofréquences est plus long. Cet article est également traité dans le chapitre sur l'expression génique.

Etudes *in vivo* de la génotoxicité des radiofréquences

Etudes qui font état d'effets génotoxiques in vivo.

Deux études *in vivo* trouvent des effets génotoxiques dans les conditions expérimentales utilisées :

Lai et Singh (2005) trouvent des altérations de l'ADN chez des rats exposés à 2 450 MHz (onde continue, 0,6 W/kg) et un effet protecteur si un champ magnétique incohérent de 45 mG (dit « bruit ELF »)[68] est appliqué en plus. Ces expériences ont été construites d'après le modèle proposé par Litovitz dans les années 90 basé sur l'hypothèse de l'existence de récepteurs membranaires aux champs électromagnétiques présents sur les cellules. D'après les auteurs, ceux-ci auraient la propriété de bloquer une variété d'effets biologiques très divers comme ceux sur le développement embryonnaire, sur la prolifération cellulaire, le comportement, ou l'expression génique, d'après les publications de l'équipe de Litovitz ou ceux de Lai seul ou Lai et Singh. Les expériences sont conduites sur quatre groupes de rats pendant 2h (8 exposés aux radiofréquences ; 7 exposés aux radiofréquences + bruit ELF ; 9 exposés au bruit seul, 16 *shams*). Elles sont étalées sur plusieurs jours à raison de deux ou trois rats par jour pour lesquels il semble y avoir un seul *sham* par jour. Il n'y a pas de groupe contrôle cage. Si la méthode des comètes est décrite de façon très détaillée, peu d'éléments permettent de comprendre précisément comment sont faites les expériences d'exposition aux radiofréquences. Le test des comètes est réalisé selon deux méthodes pour détecter des cassures simple et double brin. La longueur de la queue est le critère retenu. Ce n'est pas le plus pertinen,t mais il semble le seul utilisable du fait d'une méthode apparemment empirique d'analyse des images. Un seule lame est faite par condition et par rat sur laquelle 50 cellules sont analysées, ce qui ne permet pas d'estimer ni de réduire l'incertitude liée à la technique. De plus, les cellules dont l'ADN est trop abimé sont exclues de l'analyse car cela proviendrait du traitement des échantillons, d'après les auteurs, ce qui laisse un part de subjectivité importante dans le traitement des données. Le DAS est obtenu d'après la densité de puissance, sans détail sur la méthode si ce n'est une référence à un article de 1984. Notons que la totalité de la bibliographie citée dans l'article date des années 1990, seules deux références sont plus récentes (2000, 2004), dont une de l'auteur lui-même.

Paulraj *et al.* (2006a) ont observé des cassures d'ADN (comètes) dans des cellules de cerveau de rats exposés à 1,65 et 2,45 GHz. Compte tenu de la disposition des rats décrite par les auteurs, il est très possible que l'exposition de tous les animaux n'ait pas été identique (antenne cornet face aux cages, 3 cages devant et 3 derrière) cependant les résultats sont similaires pour tous les rats. Il n'y pas de dosimétrie numérique ni expérimentale, le DAS est estimé théoriquement à 1 et 2 W/kg selon une méthode publiée en 1978 (Durney et al).

Etudes qui ne montrent pas d'effets génotoxiques in vivo

Gorlitz *et al.* (2005) ont travaillé sur des souris exposées 2 h / jour, 5 jour / semaine à différentes modulations GSM à 902 MHz et à 1 747 MHz pendant 1 semaine (DAS 3,7, 11 et

[68] C'est à dire 4,5 µT.

33,2 W/kg) et pendant 6 semaines (2,8, 8,3 et 24,9 W/kg). L'analyse de l'ADN a été faite, en aveugle, avec le test des micronoyaux sur des lymphocytes de la rate, des cellules de la moelle osseuse (fémur), des érythrocytes du sang périphérique et kératinocytes (peau) avec 10 souris par condition (exposé, *sham*). Les auteurs ont pris des précautions pour éviter les biais expérimentaux et les animaux contraints pour l'exposition ont subi une habituation préalable. Un contrôle positif est effectué sur 5 souris traitées par cyclophosphamide (voie orale pendant 1 semaine). Notons que des tests préalables ont été réalisés pour s'assurer de l'absence d'effet thermique sous exposition.

Belyaev *et al.* (2006) n'ont pas mis en évidence de cassures d'ADN par électrophorèse sur gel à champ pulsé (PFGE), ni de modification de la conformation chromatinienne (AVDT) sur des broyats de cerveau, de thymus et de rate de rats exposés à un signal GSM 900, (DAS 0,04 W/kg) pendant 2 h. Les résultats fournis correspondent aux données rassemblées de 4 expériences (4 rats exposés et 4 *sham* chacune). Le système d'exposition est le même que celui mentionné précédemment, mais l'étude dosimétrique n'est pas adaptée car elle n'a pas été faite pour un rat.

Effet génotoxiques sur l'humain

Ces études concernent des expositions au téléphone lui même ou à des antennes. Le DAS n'est pas calculé et les conditions d'exposition ne sont pas définies précisément.

Deux études font état d'effets génotoxiques sur l'humain.

Gandhi et al (2005) ont recherché des effets génotoxiques dans les lymphocytes de 24 sujets utilisateurs de téléphones portables à l'aide du test des comètes et de l'examen des micronoyaux 3 à 4 h après le prélèvement sanguin. Pour le test des comètes, 100 noyaux sont examinés par échantillon, pour lesquels la longueur de la queue est mesurée de façon empirique. La moyenne de toutes les données du groupe exposé est comparée à celle du groupe témoin pour chaque type de test. Les données du groupe témoins ne sont pas fournies. Les échantillons ne sont pas appariés, il n'y a qu'une lame par individu et le critère d'analyse des comètes n'est pas le plus fiable. Compte-tenu de la variabilité intrinsèque des résultats de ce type de test, il semble difficile de comparer ainsi les 2 groupes pour vérifier la validité de cette approche. De plus, le délai approximatif de 3 ou 4 h avant la réalisation des tests de cytogenotoxicité peut induire des variations dans les résultats, du à l'évolution des altérations de l'ADN. L'exposition est estimée d'après un questionnaire, les sujets contrôles sont ceux qui n'utilisent pas de téléphone mobile et le DAS fourni est celui mentionné par le constructeur (DAS théorique *maximum*). Ces limitations méthodologiques majeures amènent à s'interroger sur les conclusions tranchées avancées par les auteurs.

Yadav & Sharma (2008) ont examiné la fréquence des cellules micronucléées, compté les micronoyaux et fait une analyse microscopique des caractères nucléaires sur des prélèvements d'épithélium buccal prélevé sur 109 sujets (85 exposés, 24 témoins). Les auteurs sont parvenus à établir une corrélation positive entre le temps d'exposition en année et la fréquence des micronoyaux. Etonnamment, cette étude est basée sur l'observation de cellules mortes issues d'une population hétérogène pouvant être exposées à d'autres facteurs que les radiofréquences. Le critère nucléaire employé est inconnu et les conditions d'exposition non définies. Par ailleurs, les micronoyaux ayant une durée de vie transitoire et les cellules de l'épithelium buccal se renouvellant beaucoup, le test ne semble donc pas pertinent pour observer des effets à long terme.

Une étude ne montre pas d'effet génotoxique sur l'humain.

Maes et al (2006) n'ont pas observé d'effet de l'exposition chronique sur l'intégrité de l'ADN des lymphocytes chez 49 employés de deux sociétés de télécommunication belges, ni sur l'intégrité de l'ADN, ni *in vitro* après prélèvement, sur la sensibilité de ces cellules à un agent

mutagène connu. Les auteurs ont utilisé le test des comètes, le test d'échange de chromatides sœurs ou la détection d'aberrations chromosomiques. Le niveau d'exposition n'est pas défini de manière précise, puisque les sujets sont exposés à des émetteurs radio, des antennes paraboliques et des antennes-relais, soit toute une gamme de fréquences (autour de 150 MHz, 450 et 900 MHz, 6 et 40 GHz) sur leur lieu de travail et le temps d'exposition est estimé d'après un questionnaire. Les techniciens sont considérés comme une population plus exposée par rapport au personnel administratif.

4.4.1.3.2 Effets co-génotoxiques

Quatorze articles concernent cette partie, dont 12 études *in vitro* et 2 *in vivo*.

Huit études font état d'un effet co-génotoxique des radiofréquences, 6 d'entre elles présentent une dosimétrie validée et deux ne font pas état de dosimétrie (Qian *et al.*, 2006 ; Tiwari *et al.* 2008).

Quatre études ne montrent pas d'effet des radiofréquences combinées avec un agent mutagène connu, 3 présentent une dosimétrie validée obtenue par simulation numérique et expérimentalement, et une troisième (Juutilainen *et al.* 2007), par deux méthodes expérimentales différentes, sans simulation numérique.

Etudes *in vitro* de la co-génotoxicité des radiofréquences

- Etudes qui font état d'effets co-génotoxiques in vitro

Huit études réalisées *in vitro* font état d'effets combinés des radiofréquences avec un autre agent chimique, ou physique (autre type de rayonnement).

Baohong *et al.* (2005, 2007) ont publié des études menées sur des lymphocytes humains exposés à un signal GSM 1800, à un DAS de 3 W/kg pendant des temps variant de 1,5 à 4 h, en présence ou non d'agents mutagènes connus : mitomycine C, bléomycine, methyl méthanesulfonate ou 4-nitroquinoline-1-oxide en 2005 et après exposition à un rayonnement ultra-violet (UVC) en 2007. Des différences ont été observées dans le taux d'altération de l'ADN entre cellules traitées par un agent mutagène seul et avec exposition aux radiofréquences en plus, immédiatement et 21 h après traitement. Pour l'exposition combinée avec les UVC, à 1,5 h il y a diminution du taux de cassures en exposition combinée par rapport aux UVC seuls et une augmentation à 4 h, mais il n'y a aucune corrélation de l'effet avec la dose d'UV utilisée avec ou sans exposition aux radiofréquences. Les auteurs concluent que les radiofréquences peuvent induire une augmentation ou une diminution du taux d'altération de l'ADN, provoquée par les UVC. Ils évoquent la possibilité d'un effet fenêtre. L'origine des variations observées n'est pas expliquée.

Qian *et al.* (2006) ont travaillé avec des cellules de pointes de racine de plante traitée avec le trioxide de chrome (CrO3). Les auteurs concluent que les radiofréquences ont une action antagoniste sur l'index mitotique et synergique sur la quantité de micronoyaux et les aberrations chromosomiques après avoir réalisé des expositions de 5 et 25 secondes. Ils trouvent une diminution du nombre de micronoyaux à 5 s d'exposition et une augmentation à 25 s. Aucune référence au système d'exposition ou à la dosimétrie n'est faite, ni même à la fréquence utilisée. L'étude est très peu détaillée pour la partie biologique également.

Tiwari *et al.* (2008) ont fait une étude de co-génotoxicité des signaux CDMA avec l'aphidocoline, un antimitotique inhibiteur de la réparation de l'ADN sur des lymphocytes humains. Le système d'exposition étant inadapté aux conditions expérimentales (téléphone mobile), les résultats de cet article ne peuvent être pris en compte.

Les travaux de Luukkonen *et al.* (2009) indiquent une augmentation des cassures d'ADN ainsi que de la production de ROS, sans modification de viabilité cellulaire, après exposition d'une lignée cellulaire, issue d'un neuroblastome humain, par une onde continue (CW) à 872 MHz en présence de ménadione (induit la production de ROS et des altérations d'ADN).

Cet effet n'est pas observé en cas de modulation GSM du signal à la même fréquence et à la même puissance pour produire un DAS de 5 W/kg pendant 1 h. Comme le soulignent les auteurs, il est curieux de constater une différence entre exposition CW et GSM au même DAS. Le paramètre utilisé pour quantifier les lésions semble adapté. Les répétitions de l'expérience pour le test des comètes (N = 3) sont peu nombreuses. Une vérification de la dosimétrie par mesure de température dans les échantillons sous exposition pour valider le calcul de DAS et l'équivalence du DAS en modes GSM et continu fait défaut.

Luukkonen *et al.* (2009) ont également réalisé une étude *in vivo* pour analyser les effets combinés de la ménadione et de l'exposition à 872 MHz (5 W/kg) en modes GSM et en onde continue sur des souris. Comparés aux *shams*, les résultats indiquent une augmentation de la production de ROS dans les globules rouges 30 et 60 min après exposition aux radiofréquences en onde continue mais pas avec le signal GSM. Là encore, la viabilité cellulaire n'est pas affectée. Les auteurs supposent que les cassures d'ADN sont consécutives à la libération de radicaux libres. Notons que, dans des travaux très récents[69], bien que non publiés, les mêmes auteurs ont présentés des effets avec une exposition au signal GSM uniquement dans des conditions similaires d'exposition, sur des cellules en culture tandis qu'ils retrouvent des effets en onde continue seulement sur un autre type cellulaire (BioEM2009). Ces résultats non concordants pourraient indiquer l'existence d'un biais méthodologique dans les expérimentations.

Kim *et al.* (2008) ont conclu qu'ils ne pouvaient exclure la possibilité d'un effet co-génotoxique après avoir exposé deux lignées cellulaires humaines pendant 48 h à un signal CDMA, de fréquence 835 MHz avec une valeur du DAS de 4 W/kg en présence et en absence d'agents mutagènes connus. Aucun effet de l'exposition aux radiofréquences seules n'est observé. Le test des comètes est utilisé pour une lignée (L5178Y, lymphoblastique) tandis que les aberrations chromosomiques sont observées dans l'autre (fibroblastique). Selon l'agent mutagène utilisé, l'effet est insignifiant ou peut atteindre un facteur 10, mais des tests différents étant utilisés dans chaque cas, il est difficile de les comparer.

Un article porte sur la détection d'anomalies génétiques examinées dans des lymphocytes issus de prélèvement sanguins humains par la méthode de coloration dite FISH :

Manti *et al.* (2008) ont étudié la combinaison d'une exposition de 24 h à des radiofréquences de type UMTS (1950 MHz) pour des DAS de 0,5 et 2 W/kg combinée à des rayons X pendant 24 h sur des lymphocytes de quatre donneurs. Seulement deux chromosomes (1 et 2) ont été examinés. Ils notent une augmentation du taux d'échanges par cellule supérieur en cas de co-exposition aux rayons X et aux radiofréquences pour un DAS de 2 W/kg. Toutefois, ce paramètre est variable en cas de perturbation de la cellule, comme c'est le cas avec les rayons X. Par ailleurs, les auteurs n'ont pas relevé d'augmentation du nombre de cellules anormales, ce qui serait alors en faveur de l'absence d'un effet co-génotoxique.

- *Etudes* in vitro *qui ne montrent pas d'effet co-génotoxiques in vitro*

Quatre études réalisées *in vitro* ne montrent pas d'effet combiné des radiofréquences avec un autre agent chimique, ou physique (autre type de rayonnement).

Stronati *et al.* (2006) n'ont pas observé d'effet co-génotoxique en traitant des lymphocytes humains par rayons X avant ou après exposition aux radiofréquences (GSM à 935 MHz, DAS de 1 et 2 W/kg). L'intégrité de l'ADN a été analysée par une batterie de tests : test des comètes, détection des aberrations chromosomiques instables, échange de chromatides

[69] A. Höytö,J. Luukkonen, J. Juutilainen, J. Naarala, Radiofrequency radiation affects cellular oxidative stress and apoptosis. Proceedings of the Joint Meeting of the European BioElectromagnetics Association and the Bioelectromagnetics Society - BioEM2009, Davos, Suisse, juin 2009.

sœurs, micronoyaux et index de division nucléaire. L'étude est bien décrite, avec analyse des incertitudes et duplication de certains essais dans deux laboratoires différents.

Trois équipes ont également utilisé des méthodes classiques de détection de mutagénicité avec évaluation du taux de mutation par dénombrement des colonies mutées *in vitro* :

Wang *et al.* (2005) ont examiné l'effet des radiofréquences (2 h) avec ou sans initiation préalable avec methylcholanthrene (MC), avec ou sans traitement au TPA sur le degré de malignité de cellules murines (lignée C3H10T1) (soit 4 conditions et *shams* correspondants). Les valeurs de DAS s'étalent bien au-delà du seuil des effets thermiques (5, 10, 20, 50, 100 et 200 W/kg), à une fréquence de 2 450 MHz en onde continue. La température du milieu de culture est suivie avec une sonde adéquate. L'effet de l'élévation de température a été testé indépendamment de l'exposition aux radiofréquences sur les paramètres d'intérêt (de 38 à 44°C). Il y a une augmentation de la transformation maligne (en type II et III) pour les DAS au-delà de 100 W/kg en présence de MC, avec ou sans TPA. Ceci n'est pas observé dans le groupe traité par la chaleur pour une élévation de température équivalente. Les auteurs concluent que les radiofréquences ne sont pas susceptibles de contribuer au stade d'initiation, mais qu'elles pourraient contribuer à la promotion à puissance très élevée pour des valeurs de DAS qui dépassent largement les conditions d'apparition d'effets thermiques.

Koyama *et al.* (2007) ont testé l'effet d'une exposition de 2 h à 2 450 MHz en onde continue sur des cellules eucaryotes d'ovaire de Hamster (lignée CHO/K1) combinée avec l'action d'un agent mutagène, les colonies mutantes étant comptées par la suite. Le test de *Ames* a été utilisé pour évaluer le potentiel mutagène des radiofréquences dans les mêmes conditions d'exposition (sans agent mutagène associé), pour une durée de 30 min. Parallèlement, les effets d'une élévation de température sont testés en absence d'exposition. Les auteurs n'observent pas d'augmentation du taux de mutation sous l'effet des radiofréquences dans les conditions expérimentales utilisées. En revanche, ils observent une plus forte action de la bléomycine avec le DAS de 200 W/kg qu'ils attribuent à l'élévation de température induite dans le milieu par l'exposition à une puissance élevée d'émission. Il s'agit donc d'un effet thermique, normal à ce niveau de DAS élevé.

Hirose *et al.* (2008) ont employé un protocole qui consiste à compter le nombre de colonies de cellules BALB/3T3 mutantes induites par le traitement, classiquement employées pour tester des agents potentiellement mutagènes. Les expériences sont conduites en aveugle et la partie dosimétrie est détaillée, la température sous exposition est mesurée avec une sonde à fibre optique. L'effet des radiofréquences (W-CDMA, 2 142 MHz, 0,08 et 0,8 W/kg) est examiné avec ou sans facteur d'initiation 3-methylcholanthrene (MCA) ainsi qu'avec et sans promoteur tumoral (TPA). L'exposition est de longue durée (6 semaines). Les auteurs en concluent que les radiofréquences testées n'apparaissent pas excercer un rôle dans l'initiation, la promotion ou la co-promotion tumorale.

Etudes in vivo de la co-génotoxicité des radiofréquences

- Etudes in vivo qui ne montrent pas d'effets co-génotoxiques

Deux études de co-génotoxicité *in vivo* conduites sur des durées d'exposition longues (chroniques) ne montrent pas d'effet des radiofréquences pour des DAS de 0,3 à 1,5 W/kg et différents types de signaux utilisés en téléphonie.

Verschaeve *et al.* (2006) ont réalisé une étude à long terme sur des rats exposés pendant 2 ans (2 h / jour, 5 jours / semaine) et traités avec l'agent mutagène 3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(5H)-furanone (MX, voie orale), toxique sur le cerveau mais pas sur le sang et le foie. Au total, 4 groupes de 72 animaux (contrôles cage, *sham* traités MX, exposés à 0,3 W/kg + MX et exposés à 0,9 W/kg +MX) ont été suivis. Les analyses ont été

réalisées sur des extraits de cerveau et de foie à l'issu de l'expérience, ainsi que dans le sang à 3, 6 et 24 mois, par le test des comètes et celui des micronoyaux. La dosimétrie est bien décrite. Les auteurs ont conclu que la co-exposition des radiofréquences (GSM 900, 0,3 et 0,9 W/kg) n'entraîne pas plus d'altération de l'ADN que le traitement par MX seul. Il aurait été intéressant d'avoir un suivi de groupes d'animaux à l'issu de la période d'exposition pour comparer le nombre de tumeurs apparaissant dans les différentes conditions expérimentales.

Juutilainen *et al.* (2007) n'ont pas trouvé non plus d'effet chez des souris de deux souches différentes (20 par groupe) exposées pendant 78 semaines à divers types de signaux de téléphonie mobile de fréquence 902,5 MHz combinés soit avec des rayons X, soit avec des rayons UV et comparées aux *shams* correspondants. L'analyse a été faite par comptage des micronoyaux sur des prélèvements sanguins dans lesquels l'attention a été portée sur les érythrocytes circulants non matures qui témoignent de l'intégrité de la moelle osseuse. La méthodologie est bien décrite avec des tests réalisés en aveugle. L'absence de différence entre les conditions testées indique qu'il n'y a pas de toxicité des radiofréquences au niveau de la moelle osseuse ayant des répercussions sur l'érythropoièse dans les conditions expérimentales.

Etude de la mutagénicité des radiofréquences

Une équipe a centré ses travaux sur la recherche de mutation uniquement. Les autres études sont analysées dans le paragraphe précédent (Wang *et al*., 2005 ; Koyama *et al.* 2007 ; Hirose *et al.* (2008).

Chang *et al.* (2005) ont utilisé le test de *Ames* sur des bactéries (*E .Coli*) pour évaluer le potentiel mutagène des radiofréquences (CDMA, 835 MHz, 4 W/kg) en présence ou en absence d'agents mutagènes connus et concluent à l'absence d'effet mutagène ou co-mutagène de l'exposition. Dans la même étude, des expériences ont été conduites pour examiner l'influence de l'exposition aux radiofréquences sur la dégradation de l'ADN due aux radicaux libres à l'aide d'un test spécifique. Aucune modification due à l'exposition n'a été observée. Le système d'exposition est le même que celui utilisé par Kim *et al.* (2008), la méthode d'obtention du DAS n'est pas décrite dans cette étude.

En tout, 4 équipes ont cherché à mettre en évidence une influence des radiofréquences sur le taux de mutation, aucune n'a pu mettre en évidence l'existence d'un effet mutagène.

En résumé, 43 articles concernant les effets des radiofréquences sur le matériel génétique (ADN) ont été analysés. Les études s'intéressent à l'effet direct des radiofréquences ou sur leur capacité à modifier l'effet d'un autre agent toxique connu, soit respectivement aux effets génotoxique et co-génotoxique. Elles pourraient exercer par ce biais un rôle dans les phases d'initiation ou de promotion tumorale. Parallèlement, les effets potentiellement mutagènes des radiofréquences ont été spécifiquement recherchés dans 3 articles et une équipe a publié un article uniquement sur ce thème.

Les valeurs des DAS testées s'étalent de 0,05 à 200 W/kg, allant donc au delà des conditions thermiques, mais la majorité des études utilisent des valeurs situées entre 1 et 5 W/kg.

Les fréquences vont de 800 à 2 450 MHz avec des signaux principalement GSM et UMTS ou en onde continue. La majorité des études présentent une dosimétrie correcte.

28 articles sont consacrés uniquement aux effets génotoxiques, dont 21 études *in vitro*, 4 *in vivo* et 3 réalisées sur l'humain. Quinze études font état d'effets des radiofréquences et 13 ne montrent pas d'effet dans des conditions d'exposition infra-thermiques.

Quatorze articles concernent les effets potentiellement co-génotoxiques des radiofréquences, dont 12 études *in vitro* et 2 *in vivo*. Huit études font état d'un effet des radiofréquences, 6 d'entre elles présentent une dosimétrie validée et deux ne font pas état de dosimétrie (Qian *et al.*, 2006 ; Tiwari *et al.* 2008). Quatre études ne montrent pas d'effet des radiofréquences combinées avec un agent mutagène connu, 3 présentent une dosimétrie validée obtenue par simulation numérique et expérimentalement, et elle est obtenue par deux méthodes expérimentales différentes, sans simulation numérique dans la troisième (Juutilainen *et al.* 2007).

Un nombre d'études important a été fait avec une méthodologie validée pour la partie biologie (tests en aveugle, critères retenus pertinents, contrôles appropriés, *etc*.) et un contrôle des conditions expérimentales pour la prise en compte des éventuelles variations de température due à l'exposition et des faux positifs. Ces études ne montrent pas d'effets des radiofréquences sur l'intégrité de l'ADN directement, ni de potentialisation d'agents mutagènes connus y compris *in vivo* pour des expositions chroniques, de plusieurs semaines à 2 ans, avec des DAS allant de 0,3 à 30 W/kg selon les études (Gorlitz *et al*., 2005 ; Verschaeve *et al*., 2006 ; Juutilainen *et al*., 2007).

D'une manière générale, il ressort de cette analyse que les travaux concernant les effets des radiofréquences sur l'ADN sont réalisées dans des conditions expérimentales à la limite de la sensibilité des techniques utilisées. En l'absence d'une méthodologie très rigoureuse pour la partie biologie (expériences rarement en aveugle, critères d'analyse non pertinents, faible nombre de répétitions, manque de contrôles, *etc.*) effets aléatoires non reproductibles peuvent être observés liés à la variabilité intrinsèque et connue des tests utilisés. C'est le cas de la majorité des études montrant des effets positifs.

Notons que toutes les études conduites en l'absence de dosimétrie *in vitro* (Zotti-Martelli *et al.*, 2005 ; Qian *et al.*, 2006 et Tiwari *et al.*,2008), et *in vivo* (Paulraj *et al.*, 2006a) trouvent des effets. De plus, elles ne présentent pas non plus une méthodologie très rigoureuse pour la partie biologie. De même, les études conduites sur l'humain n'ont pas une méthodologie qui permet de considérer que les effets relatés sont attribuables aux radiofréquences lorsqu'il s'agit d'exposition au téléphone mobile. Une étude sur l'humain considère une exposition passive aux radiofréquences émises par divers émetteurs et conclut à l'absence d'effet mais les conditions d'exposition sont beaucoup trop mal définies pour permettre une conclusion robuste.

En conclusion, l'analyse détaillée et critique des travaux réalisés à ce jour permet de dire que, malgré le nombre important d'études rapportant des effets génotoxiques ou co-génotoxiques des radiofréquences, les résultats ne prouvent pas l'existence de tels effets. Les résultats fiables convergent vers une absence d'effet génotoxique ou co-génotoxique non thermique des radiofréquences à court terme, ainsi qu'à long terme. De même, les tests *in vitro* de mutagénicité employés dans plusieurs études n'apportent pas la preuve d'effet mutagène ni co-mutagène des radiofréquences en condition non thermique.

4.4.1.4 Effets sur l'apoptose

L'apoptose est un processus de mort cellulaire auto-induite par la cellule en réponse à un stress ou à un vieillissement cellulaire. C'est un processus physiologique hautement régulé dans l'organisme qui vise à conserver l'homéostasie cellulaire. Elle se produit au cours du développement embryonnaire mais également tout au long de la vie de l'individu. Un excès d'apoptose peut provoquer des maladies par excès de mort cellulaire comme c'est le cas dans les maladies neurodégénératives, par exemple la maladie d'Alzheimer. En revanche, une apoptose défectueuse peut entraîner la prolifération de cellules anormales qui devraient

normalement être éliminées, comme par exemple des cellules potentiellement cancéreuses. Un effet sur le processus apoptotique pourrait donc avoir des conséquences très néfastes à l'échelle de l'individu.

Il existe 2 voies principales d'apoptose dans la cellule : la voie mitochondriale par relargage du cytochrome c qui s'accompagne d'une variation du potentiel mitochondrial, et la voie des récepteurs de mort situés dans la membrane plasmique (exemple : récepteur fas appelé également CD95). Ces deux voies conduisent à l'activation de protéines spécifiques dans la cellule qui sont les véritables effecteurs du processus apoptotique : les caspases. Un des substrats des caspases est la ou poly(ADP-ribose)polymerase) ou PARP qui est une enzyme impliquée dans la détection des cassures de l'ADN. Récemment, a été mise en évidence une voie apoptotique ne passant pas par les caspases mais par l'AIF (*Apoptosis Inducing Factor*). L'apoptose est sous le contrôle de gènes spéficiques qui se divisent en gènes « anti-apoptotiques » (exemple : le gène bcl2), ou « pro-apoptotiques » (exemple : le gène bax).

Une série d'évènements, qui peuvent être étudiés par des techniques ciblées, caractérise l'apoptose : perte de l'asymétrie membranaire normale (translocation des phosphatidylsérines côté externe de la membrane avec capacité de se lier à l'annexine V), perte d'eau et d'électrolytes (d'où condensation du cytoplasme, du noyau et de la chromatine), fragmentation de l'ADN, puis fragmentation de toute la cellule en corps apoptotiques digérés par les macrophages environnants.

Treize articles dans la littérature ont pour thème les effets des ondes électromagnétiques sur le processus apoptotique. Cependant, d'autres publications comportent une partie de leurs résultats sur l'apoptose, mais ont été traitées dans d'autres chapitres correspondant au thème *princeps* de ces publications. Un article n'est pas écrit en langue anglaise et n'a donc pas été évalué (Meng *et al.*, 2006). Une étude a été réalisée *in vivo* sur des rates (Oral *et al.*, 2006), et toutes les autres *in vitro*. Les publications sont présentées ci-après par ordre chronologiques (de la plus ancienne à la plus récente) et pour une même année par ordre alphabétique (nom du premier auteur).

Caraglia *et al.* (2005) ont exposé une lignée cellulaire humaine provenant d'un cancer épidermoïde oropharyngé (cellules KB) à un signal de fréquence 1,95 GHz à un DAS de 3,6 W/kg pendant des temps d'exposition variables (1 h, 2 h, 3 h et 48 h) afin d'étudier les effets des ondes électromagnétiques sur l'apoptose, la voie de survie et la dégradation des protéines intervenant dans ces voies par le protéasome. En utilisant de nombreuses techniques, ils ont mis en évidence des effets des radiofréquences avec notamment une induction de l'apoptose (20 % après 1 h, de 32 à 45 % après 2 h et 3 h), une diminution de l'activité de Erk-1 et Erk-2, une modulation de la dégradation ubiquitine dépendante de ras et de raf-1 par le protéasome, une diminution de l'expression des HSP90 max à 3 h. La transfection des cellules par un plasmide contenant des HSP90 s'oppose complètement à l'apoptose et à l'activité réduite de Erk-1/2 induite par les radiofréquences. U0126 (inhibiteur de la voie Erk-1/2) s'oppose complètement aux effets de la transfection de HSP90. La conclusion des auteurs est que, pour la première fois, leurs résultats démontrent que les microondes induisent l'apoptose par le biais de l'inactivation de la voie de survie ras -> Erk. Cet effet passe par l'augmentation de la dégradation de ras et de raf-1 par le protéasome, elle-même secondaire à une diminution de l'expression de HSP90. Cette étude représente un travail important mais de nombreuses erreurs et imprécisions ont été notées : le résumé parle d'une étude *in vivo* alors qu'il s'agit d'une étude *in vitro*, la fréquence notée dans le résumé est 1,95 MHz, alors qu'ensuite elle apparaît à 1,95 GHz (ce qui semble plus cohérent) ; dans le texte, la durée d'exposition est tantôt de 1 h, 2 h ou 3 h, tantôt de 48 h ; il n'y a pas de dosimétrie ; les résultats semblent parfois discordants, *etc*. Au total, il semble indispensable que cette étude soit répliquée pour que les résultats et les conclusions soient vérifiés.

Nikolova *et al.* (2005) ont travaillé sur des cellules issues de lignées pro-génitrices neurales (cellules ES). Ils ont exposé les cellules aux champs électromagnétiques basse fréquence (50 Hz) ou radiofréquences (1,71 GHz) pendant 6 h ou 48 h avec un DAS de 1,5 W/kg. Ils ont réalisé : une étude en RT-PCR pour analyser l'expression génique de gènes impliqués dans le cycle cellulaire et l'apoptose, le test des comètes pour évaluer les cassures d'ADN, une analyse de métaphases pour rechercher des aberrations chromosomiques et des échanges de chromatides sœurs, un marquage au BrdU pour étudier la prolifération cellulaire, un test spécifique pour étudier la fonction mitochondriale et une analyse en cytométie de flux. Ils ont mis en évidence des variations dans les taux de transcrits, une augmentation du taux de cassures d'ADN double brins à 6 h mais non à 48 h avec les radiofréquences, sans effet cytogénétique (pas d'augmentation du taux d'aberrations chromosomiques ni du taux d'échange entre chromatides sœurs). Que ce soit pour les radiofréquences ou les basses fréquences, aucun effet sur la prolifération ou sur l'apoptose n'a été retrouvé, ni aucun effet cytogénétique. Les auteurs concluent que les champs électromagnétiques sont capables d'induire des réponses au niveau transcriptionnel de gènes impliqués dans le cycle cellulaire et l'apoptose dans les cellules pro-génitrices neurales, mais que ces effets sont compensés au niveau traductionnel et post-traductionnel et ne conduisent pas à des changements dans la physiologie cellulaire. Les résultats sont assez discordants et ininterprétables, car un taux augmenté de cassures double brins devrait logiquement conduire à une augmentation du taux d'anomalies chromosomiques (effet cytogénétique), ce qui n'est pas le cas.

Hirose *et al.* (2006) ont exposé des cellules humaines provenant de lignées A172 (gliome) et IMR-90 (poumon fœtal) à des signaux WCDMA ou CW pendant 24 ou 48 h à des DAS de 0,08, 0,250 et 0,8 W/kg. Ils ont quantifié le taux d'apoptose (test de l'annexine V par IF), et ont réalisé un criblage des ARNm relatif à la protéine p53 par *microarrays* et une analyse de l'expression génique par RT-PCR en temps réel ciblée sur l'apoptose (TaqMan *probes*). Ils n'ont pas observé d'effet de l'exposition sur les paramètres observés par rapport aux *shams*, contrairement aux résultats obtenus avec leurs contrôles positifs. Leur conclusion est que l'exposition à de faibles niveaux de radiofréquences (jusqu'à 0,8 W/kg) n'induit pas d'apoptose passant par p53, ni de lésions d'ADN, ni d'autre stress dans les cellules humaines.

Joubert *et al.* (2006) n'ont pas mis en évidence d'augmentation du taux de cellules apoptotiques après exposition de cellules issues d'une lignée de neuroblastome (cellules SH-SY5Y) à un signal de 900 MHz pendant 24 h. Les ondes électromagnétiques étaient de 2 types : soit continues (CW) avec un DAS de 2 W/kg, soit modulées (GSM) avec un DAS moyen de 0,25 W/kg. L'apoptose a été évaluée soit tout de suite après l'exposition, soit 24 h après l'exposition par 3 méthodes : comptage après marquage des cellules en DAPI (4',6-diamino-2-phenylindole), cytométrie de flux avec double marquage des cellules (Iodure de propidium ou PI et TdT-*mediated dUTP nick-end labeling* ou TUNEL), mesure de l'activité de la caspase 3 par fluorimétrie. Aucune variation du taux de cellules apoptotiques quelle que soit la méthode de détermination employée n'a été retrouvée, alors que les contrôles positifs montraient un taux d'apoptose très augmenté. Les auteurs concluent que dans les conditions expérimentales employées, l'exposition aux microondes (GSM ou CW) n'augmente pas de manière significative le taux d'apoptose de cellules issues d'une lignée humaine de neuroblastome SH-SY5Y.

Merola *et al.* (2006) ont exposé une lignée cellulaire LAN-5 issue d'un neuroblastome à un signal GSM (900 MHz, 24, 48 et 72 h, à un DAS égal à 1 W/kg dans une cellule fil-plaque équipée d'un système refroidissant. Plusieurs méthodes ont été employées pour étudier la viabilité cellulaire, la prolifération et l'apoptose : le test WST-1 (mesure de la viabilité cellulaire par conversion métabolique d'un marqueur qui se transforme en un produit rouge

soluble dans le milieu de culture), analyse de l'expression de B-myb et de M-myc (marqueurs de prolifération), de neurofilaments (marqueurs de différenciation), de la PARP par *western blot* (pour l'apoptose), test dosant l'activité des caspases 3 et 7 (pour l'apoptose), exposition combinée avec l'acide rétinoïque (inducteur de la différenciation) et avec la camptothecine (inducteur de l'apoptose). Aucun effet n'a été observé concernant la prolifération cellulaire spontanée ou après privation de sérum, ni d'effet sur la différenciation cellulaire après exposition à l'acide rétinoïque (5 µM - 24 h), ni d'effet sur l'apoptose. Selon les auteurs, leurs résultats, dans les conditions expérimentales utilisées, suggèrent qu'une exposition à un signal de 900 MHz ne semble pas entraîner une réponse généralisée de stress dans des cellules de type neuronal.

L'équipe de Oral *et al.* (2006) est le seul groupe de recherche à avoir travaillé sur le thème de l'apoptose *in vivo* sur des rates Wistar albinos, en recherchant des effets sur l'endomètre (muqueuse utérine). Cet article a également été traité dans le chapitre « effets sur la reproduction ». Trois groupes de rates ont été constitués : contrôle (I), exposé (II), et exposé avec vitamines E et C (III). L'exposition a été effectuée pendant 30 jours (30 min / jour) à un DAS de 0,016 à 4 W/kg à 900 MHz. Sur du tissu endométrial, des marquages sur coupes en paraffine de la caspase 3, de la caspase 8, et de bcl-2 et bax ont été réalisés par méthode immunohistochimique, ainsi qu'une analyse biochimique (dosage de MDA ou malondialdéhyde, reflet du stress oxydatif). Les résultats montrent : un taux de MDA supérieur dans le groupe II et dans le groupe III par rapport au groupe I, un marquage de la caspase 3 faible au niveau de la surface de l'épithélium, faible au niveau des cellules endothéliales des capillaires dans le stroma (groupe I), une augmentation du marquage pour le groupe II et une absence de marquage pour le groupe III, un résultat identique pour la caspase 8. Pour *bax,* un marquage intense sur les cellules épithéliales, glandulaires et stromales dans le groupe II a été observé, et l'inverse pour bcl-2 (marquage faible dans groupe II), avec un ratio bcl-2/bax en faveur de l'apoptose pour le groupe II. Les auteurs concluent que les vitamines A et E peuvent protéger de l'apoptose induite par les radiofréquences à 900 MHz. Concernant cette publication, il faut noter l'absence de dosimétrie dans l'article, avec un DAS donné variant du simple à 250 fois sa valeur (de 0,016 à 4 W/kg), ainsi que la discordance entre les résultats et la discussion pour les marquages de bcl-2 et de *bax*.

Chauhan *et al.* (2007) ont évalué plusieurs effets biologiques, parmi lesquels l'apoptose, sur trois lignées humaines de cellules immunes (TK6, HL60 et MonoMac6) après exposition à 1,9 GHz pendant 6 h (5 min *on* / 10 min *off*, DAS de 0,1 W/kg et de 10 W/kg). Ils n'ont pas mis en évidence de différence dans le taux d'apoptose, ni dans la viabilité cellulaire, ni dans le taux de cellules en G2/M et le taux de cytokines présentes dans le surnageant des cultures après exposition aux ondes. Le test des comètes a été utilisé pour l'évaluation de l'apoptose et la cytométrie de flux pour l'analyse du cycle cellulaire et des cytokines dans le surnageant. En revanche, tous les paramètres mesurés étaient modifiés dans les contrôles positifs exposés à la chaleur (1 h à 43°C). D'après les auteurs, l'exposition aux radiofréquences dans les conditions expérimentales testées n'induit aucun effet biologique. Il faut noter que les données dosimétriques sont insuffisantes.

Joubert *et al.* (2007) - qui n'avaient pas mis en évidence d'effet apoptotique d'ondes GSM et CW sur des cellules humaines SH-SY5Y issues d'une lignée cellulaire provenant d'un neuroblastome - ont soumis des neurones primaires corticaux de rat provenant de rats embryonnaires Wistar à un signal GSM (900 MHz, 24 h, DAS de 0,25 W/kg). Les mêmes techniques que précédemment ont été employées (comptage après marquage des cellules en DAPI ; cytométrie de flux avec double marquage des cellules : PI et TUNEL ; mesure de l'activité de la caspase 3 par fluorimétrie). Aucune augmentation du taux d'apoptose n'a été

observée sur les neurones exposés comparés aux *shams*, contrairement aux contrôles positifs qui montraient une forte augmentation du taux d'apoptose.

Zhao *et al.* (2007) ont exposé des cultures primaires de neurones et d'astrocytes provenant de souris embryonnaires pendant 2 h à un signal de 1 900 MHz émis par un téléphone mobile posé directement sur la boîte de culture. Ils ont réalisé une étude en puces à ADN (test *GEArray Q series mouse* : analyse de 96 gènes impliqués dans l'apoptose) et une étude en RT-PCR en temps réel pour les gènes dont l'expression semblait modifiée en puces. Dans les neurones ont été trouvées, d'une part, une augmentation de l'expression génique de 8 gènes et, d'autre part, une diminution pour un gène. Le contrôle en RT-PCR a montré que les ARNms de Asc, des caspases 2 et 6 étaient augmentés dans les exposés, que ce soit en mode *on* ou *stand-by*. Concernant les astrocytes, les mêmes résultats ont été obtenus, mais uniquement sur le mode « on » avec en plus une augmentation des ARNms de Bax. Les auteurs concluent qu'une exposition courte aux ondes émises par les téléphones mobiles peut réguler positivement certains intermédiaires spécifiques des voies apoptotiques, et que les neurones ont un seuil d'activation plus bas que les astrocytes. Les ondes émises par les téléphones mobiles peuvent donc, d'après les auteurs, avoir la capacité de causer un dysfonctionnement ou la mort en activant certaines voies de mort spécifiques intracellulaires. Aucune donnée dosimétrique n'est fournie par les auteurs. Aucune mention d'un relevé de la température locale n'est faite.

Joubert *et al.* (2008) ont mis en évidence une possible induction de l'apoptose par les radiofréquences passant par une voie mitochondriale indépendante des caspases. Ils ont exposé des neurones primaires corticaux provenant de rats Wistar embryonnaires à un signal de 900 MHz, en ondes continues (CW) pendant 24 h. L'apoptose a été évaluée à 0 h *post*-exposition et à 24 h *post*-exposition par les techniques déjà employées auparavant couplées à un immunomarquage des noyaux par l'AIF (*Apoptosis Inducing Factor*). Une augmentation de la température locale de +2°C a été enregistrée pendant l'exposition aux ondes. Quatre conditions ont donc été comparées : *sham*, CW, 37°C, 39°C, et un contrôle positif a été effectué. A 0 h *post*-exposition, le taux d'apoptose était augmenté de manière similaire dans les neurones exposés et dans le groupe exposé à 39°C (par rapport aux témoins et au groupé exposé à 37°C), alors qu'à 24 h *post*-exposition, le taux d'apoptose était augmenté uniquement dans les neurones exposés (taux multiplié par un facteur 2 environ). Les résultats obtenus étaient concordants dans les 2 méthodes de détermination employées. En revanche, aucune variation de l'activité de la caspase 3 n'a été constatée en dehors des contrôles positifs. Le marquage des noyaux par l'AIF a montré une augmentation d'un facteur 3 du taux de noyaux AIF positifs à 0 h *post*-exposition et d'un facteur 7 à 24 h *post*-exposition dans les neurones exposés. Selon les auteurs, les microondes, et notamment les ondes continues à 900 MHz, pourraient éventuellement induire l'apoptose neuronale par la voie de l'AIF, mais des effets thermiques locaux ne peuvent être exclus.

Moquet *et al.* (2008) ont soumis des cellules provenant d'une lignée murine de neuroblastome N2a à des signaux GSM (basique, "*talk*") et CW à un DAS de 2 W/kg pendant 24 h. Ils ont déterminé le taux de cellules apoptotiques par utilisation de plusieurs Kits (Annexine V/FITC, *CaspaTag pan-caspase et Apo-Direct kit*) à différents temps *post*-exposition. Ils n'ont pas mis en évidence de différence dans les taux de cellules apoptotiques après exposition aux radiofréquences, contrairement aux résultats obtenus avec les contrôles positifs. Ils concluent que ces résultats confortent l'hypothèse selon laquelle les radiofréquences n'induisent pas l'apoptose des cellules cérébrales.

Palumbo *et al.* (2008) ont exposé des cellules Jurkat (lignée cellulaire) et des lymphocytes humains provenant de donneurs à un signal GSM (900 MHz, DAS de 1,35 W/kg) pendant 1 h dans 2 cellules fil-plaque. Un contrôle de la température et une étude de dosimétrie numérique ont été réalisés. Différentes techniques ont été utilisées afin d'étudier le

processus apoptotique, la survie et le cycle cellulaires : mesure de l'activité de la caspase 3, cytométrie en flux, analyse en *western blot*. Une augmentation de l'activité de la caspase 3 dans les cellules en prolifération a été mise en évidence, augmentation significative 6 h après l'exposition (cellules Jurkat et lymphocytes). Aucun effet sur les lymphocytes non stimulés (quiescents) n'a été constaté. De même, il n'a pas été observé d'augmentation du taux d'apoptose (lymphocytes et les cellules Jurkat), de clivage de la PARP (cellules Jurkat) ni d'effet sur la viabilité et le cycle cellulaire (cellules Jurkat et lymphocytes humains). La conclusion des auteurs est qu'il est difficile de déterminer la signification biologique de leurs résultats et que des études complémentaires sont nécessaires pour à la fois confirmer l'augmentation de l'activité de la caspase 3 dans d'autres expérimentations, et comprendre si cette augmentation représente une réponse apoptotique avortée ou un mécanisme protéolytique modulant des voies de signalisation spécifiques. Ces résultats sont difficilement interprétables dans la mesure où un taux d'apoptose augmenté est souvent constaté sur des lymphocytes stimulés, et que seul un paramètre sur tous ceux testés dans l'étude est significatif. De plus, ce paramètre est le seul à avoir été évalué sur 3 expérimentations, alors que les autres l'ont été sur 4 voire 5.

En résumé, parmi les 12 articles étudiés concernant les effets sur l'apoptose, 4 ont mis en évidence un effet avec variation du taux de cellules apoptotiques après exposition à des ondes électromagnétiques. Un article parmi ces 4 a utilisé des ondes continues (CW) avec un effet potentiel, corrélé à une augmentation de température (Joubert *et al.*, 2007). Concernant les 3 autres articles montrant un effet dont un réalisé *in vivo* (Oral *et al.*, 2007), la méthodologie est insuffisante, soit du fait de l'utilisation d'un système d'exposition inadapté pour ce genre d'étude (Zhao *et al.*, 2007), soit par absence de dosimétrie (Caraglia *et al.*, 2005 ; Zhao *et al.*, 2007 ; Oral *et al.*, 2007). D'autre part, dans 2 autres publications bien conduites, des variations soit dans l'expression de gènes impliqués dans l'apoptose (Nikolova *et al.*, 2005), soit dans l'activité de la caspase 3 (Palumbo *et al.*, 2008) ont été mises en évidence sans effet sur le taux d'apoptose ni sur le cycle cellulaire. Les résultats présentés semblent toutefois discordants dans ces deux études. Les 6 articles restants ne montrent pas d'effet sur le processus apoptotique (Hirose *et al.*, 2006 ; Joubert *et al.*, 2006 ; Merola *et al.*, 2006 ; Chauhan *et al.*, 2007 ; Joubert *et al.*, 2007 ; Moquet *et al.*, 2008).

En conclusion, il ne semble pas exister d'effet inducteur non thermique des radiofréquences sur l'apoptose cellulaire. Il est important de noter que les études utilisant des cellules d'origine cérébrale (provenant de gliome ou de neuroblastome), les plus exposées en cas d'utilisation d'un téléphone mobile, ne montrent pas d'effet des radiofréquences sur les taux d'apoptose.

4.4.1.5 Effet sur le développement des cancers chez l'animal

Il s'agit de savoir si les radiofréquences peuvent favoriser l'apparition et le developpement de cancers, c'est-à-dire si elles peuvent présenter des propriétés dites cancérigènes. Les études conduites sur l'animal, classiquement le rat ou la souris, visent à déterminer si le nombre et le développement de tumeurs sont modifiés par l'exposition aux radiofréquences, en présence ou non d'un agent mutagène connu. C'est l'étape incontournable pour confirmer qu'un agent détecté comme génotoxique ou co-génotoxique lors d'expériences *in vitro* est effectivement cancérigène *in vivo*. Il y a deux catégories d'agents cancérigènes, ceux qui sont capables seuls d'entraîner l'apparition de tumeur (initiateur et promoteur) et ceux qui nécessitent l'action d'un autre agent sur la cellule initiée. La grande majorité des agents provoquant des tumeurs chez ces modèles animaux sont également cancérigènes pour l'homme, et vice versa. De même, la grande majorité des agents cancérigènes sont à

l'origine de mutations. Il convient cependant d'être toujours très prudent avant toute tentative d'extrapolation des résultats de l'animal à l'humain.

En pratique, les expériences consistent à exposer des animaux à un champ électromagnétique et à en examiner l'influence sur l'incidence de différents types de tumeurs ou de transformations malignes. Outre l'apparition de tumeurs spontanées survenant avec l'âge, il est possible d'utiliser des lignées d'animaux transgéniques porteurs de mutations qui les prédisposent à certains types de cancers, ou encore d'examiner l'effet d'une exposition aux radiofréquences combinée avec l'action d'agents mutagènes connus.

Classiquement, l'éthylnitrosourée (ENU) est utilisé pour initier des tumeurs du système nerveux central (cerveau, moelle épinière) chez le rat. Il agit sur la descendance quand il est administré à la femelle gestante à un stade précis. Le dimethylbenz(a)anthracène (DMBA) est plutôt employé pour induire des tumeurs mammaires (traitement oral) ou des cancers de la peau (application locale). L'action de ces deux substances est liée à l'activation de proto-oncogènes. Le 3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(5H)-furanone (MX) induit des tumeurs multiples de tous types. Les esters de phorbol extraits de plantes, tels que le TPA (tri-phorbol-ester), font partie des substances appelées promoteurs tumoraux qui favorisent la transformation des cellules normales initiées en cellules tumorales au niveau de la peau. Ils sont souvent utilisés pour potentialiser l'effet d'un mutagène connu dans les groupes contrôles positifs.

Pour ce qui est des modèles animaux, les souches de souris Eμ-*Pim*1, OF1, ou encore AKR/J sont génétiquement prédisposées au développement de lymphomes[70] malins. Les souris *Patched*1 sont particulièrement sensibles aux radiations ionisantes et développent des tumeurs dans divers organes, notamment le cervelet et la peau. Les souris B6C3F1 sont sujettes à tous types de tumeurs.

Quinze articles ont été rattachés à cette thématique dont deux revues de littérature (Moulder *et al.*, 2005, Kholi *et al.*, 2009). Sur les 13 articles de recherche analysés, les auteurs utilisent le rat (6 études) ou la souris (5 études) comme modèles expérimentaux, soumis à des expositions longues, pour la plupart chroniques (1 à 2 ans) sauf trois en semi-chronique (moins de 6 mois) et une de 5 jours. Les fréquences testées vont de 800 à 1 966 MHz avec divers types de signaux utilisés par les systèmes de communications sans fil (TDMA, W-CDMA, GSM, UMTS). Les valeurs de DAS sont comprises entre 0,3 et 4 W/kg, sauf pour une équipe qui utilise aussi un DAS plus faible (0,08 W/kg ; Hirose *et al.*, 2008). Une étude ne fait pas état du niveau d'exposition (Anghileri *et al.* (2005).

Anghileri *et al.* (2005) ont utilisé des souris issues d'une lignée présentant une carcinogenèse accrue des tissus lymphatiques dépendante de l'âge. Un groupe de 20 animaux est exposé 1 h par semaine, pendant 4 mois, pour examiner l'impact d'une exposition aux radiofréquences sur l'apparition de tumeurs avec l'âge, avec un suivi de 18 mois puis examen histopathologique des souris mortes. D'autres souris (10 à12) sont exposées pendant 1 h (une seule fois) pour évaluer le transport transmembranaire de calcium (isotope radioactif) préalablement injecté par voie intramusculaire ou intrapéritonéale. Les mesures sont effectuées sur la moitié du groupe 1 h et sur l'autre moitié à 24h après exposition dans des prélèvement sanguins et des extrait tissulaires de foie, rate, cerveau (d'après l'hypothèse que ce phénomène pourrait être corrélé à l'apparition de tumeurs). Une étude de la péroxydation lipidique est mentionnée sans détail méthodologique. D'après les auteurs, les RF provoqueraient une infiltration lymphocytaire diffuse, une ascite lymphoblastique, des tumeurs extraganglionnaires de différents types et

[70] prolifération cancéreuse qui se manifeste dans le tissu lymphoïde, notamment dans les ganglions lymphatiques. *NB : le tissu lymphoïde* est un tissu conjonctif réticulé contenant des lymphocytes, caractéristique des *organes lymphoïdes* (rate, thymus, ganglions lymphatiques, amygdales).

une mortalité augmentée par rapport aux contrôles. Le taux de calcium augmente avec exposition dans les organes examinés. Ils en concluent que le processus de cancérogenèse débuterait plus tôt chez les souris exposées et passerait par des modifications de l'homéostasie calcique et par l'involution thymique liée à l'âge. L'article se termine par une discussion sur l'immunité et le rôle du thymus dans la survie des mammifères. Notons que le calcium est connu pour jouer un rôle dans toute activation cellulaire et le fait que ces phénomènes puissent avoir un lien n'est actuellement pas documenté. Pour la partie biologie, les auteurs se réfèrent aux données de l'éleveur pour l'incidence des tumeurs examinées (6% à 18 mois, obtenu sur 200 souris, soit 1,2 sur un groupe de 20), et ne font pas de contrôle cage. Cela met en évidence que le nombre d'animaux utilisé est très insuffisant pour faire des observations pertinentes. Des discordances ont été relevées entre le texte et les résultats présentés sous forme de tableaux qui ne sont pas discutés par les auteurs, que ce soit dans les nombres d'animaux ou dans les données (par exemple : poids du foie et de la rate augmenté chez *shams* par rapport aux souris exposées, de même pour le taux de lymphocytes augmentés dans le sang des animaux non exposés, etc.), indiquant l'existence probable de biais. Pour la partie physique, en l'absence de dosimétrie, le DAS n'est pas connu et le système d'exposition décrit succinctement, utilisant notamment un téléphone mobile est inadapté. D'une façon plus générale, les auteurs se basent une monographie qui date de 30 ans sur les rayonnements électromagnétiques (Tyler, 1975) et sur des travaux anciens de manière générale, sans prise en compte de l'état actuel des connaissances. Compte-tenu de l'ensemble de ces considérations, cette étude n'apporte aucune preuve d'un effet des radiofréquences.

Huang *et al.* (2005) n'ont pas montré d'effet d'une exposition aux fréquences 849 MHz et 1763 MHz, avec un DAS de 0,4 W/kg, sur le développement de tumeurs de la peau initiées chez des souris par application locale de DMBA. L'exposition était faite en 2 cycles de 45 min d'exposition séparés par 15 min d'intervalle (5 jours/semaine) pendant 19 semaines (environ 5 mois). La dose de mutagène est telle que des tumeurs n'apparaisent que sous l'effet d'un promoteur, les contrôles positifs sont obtenus par traitement au TPA, aucune tumeur ne se développe chez lez animaux exposés aux radiofréquences.La dosimétrie est validée de façon numérique et expérimentale.

Zook *et al.* (2006) n'ont pas apporté de preuve qu'une exposition modifie l'incidence ou les caractéristiques de tumeurs cérébrales diverses (gliomes, astrocytomes, autres) induites par l'éthylnitrosourée (ENU). Cette étude porteant sur 1 080 animaux, fait suite à celle réalisée par les mêmes auteurs en 2001, qui n'avaient pas montré d'effet co-promoteur des radiofréquences chez le rat. Le but est ici d'approfondir plus en détail la possibilité d'un effet éventuel sur le temps de latence et d'autres caractéristiques des tumeurs (type, volume, histologie, degré de malignité). Le traitement ENU est administré sur les rates gestantes. Les ratons sont répartis en 3 groupes exposé, *sham* et contrôle. L'exposition chronique est conduite quotidiennement (6 h / jour) du 52ème au 325ème jour (11 mois) à la fréquence de 872 MHz modulée, avec un DAS de 1 W/kg. Le suivi de poids est réalisé en parallèle, les rats contrôles prennent plus de poids et présentent un peu plus de tumeurs par rapport aux deux autres groupes (exposé et *sham*).

Shirai *et al.* (2005 et 2007) n'ont pas observé d'effet cancérogène ni co-cancérogène des radiofréquences dans les conditions expérimentales testées avec un signal TDMA (1 439 MHz) en 2005, ni W-CDMA (1 950 MHz) en 2007. Dans les deux études, les auteurs ont examiné l'effet de l'exposition chronique (2 ans à partir de l'âge de 5 semaines, exposition locale chronique 90 min / jour, 5 j / semaine) à deux niveaux de puissance (DAS de 0,67 et 2 W/kg) sur la vitesse de développement de tumeurs dans le système nerveux central de rats (cerveau et moelle épinière). L'initiation intra-utérine des tumeurs est faite par l'ENU administré aux rates à 18 jours de gestation. La prise alimentaire et la survie ont été suivies durant la période de l'expérience. Sur 5 rats par groupe, une prise de sang a été

effectuée 2 jours avant la fin de l'expérience pour réaliser des dosages hormonaux de corticostérone et mélatonine, ainsi que d'acétylcholine sur 5 autres. A la fin, après anesthésie et autopsie, les organes sont prélevés pour examen et pesée (rate, foie, coeur, cerveau, glande pituitaire, glandes surrénales, testicules, ovaires), coupes de cerveau et histologie des lésions. La température est suivie dans chaque chambre. Aucun effet sur les paramètres n'a été observé, sauf une diminution de l'incidence des tumeurs pituitaires à 2 W/kg chez les mâles dans l'étude de 2005, mais ceci n'avait pas été mis en évidence dans d'autres études similaires (Zook 2001 et 2006, Shirai 2007 La dosimétrie est validée de manière numérique (FDTD) et expérimentale avec une caméra thermique (Watanabe *et al.*, 2000) complétée par l'utilisation de fantômes de rat de 126, 253, et 359 g (poids croissant avec l'âge des animaux).

Heikkinen *et al.* (2006) n'ont pas observé d'effet combiné d'une exposition GSM 900 (0,3 et 0,9 W/kg) avec le 3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(5H)-furanone (MX) administré dans l'eau de boisson des rats pendant deux ans, comparé au groupe *sham*. Cet agent provoque des tumeurs multiples. Les auteurs observent quelques différences ponctuelles au niveau de certains organes (en dehors des tumeurs), qu'ils attribuent au vieillissement des animaux et non à l'exposition aux radiofréquences.

Yu *et al.* (2006) ont exposé des rats préalablement traités au DMBA à un signal GSM 900 (0,44 ; 1,33 et 4 W/kg) 4 h / jour, 5 j / semaine pendant 4 mois et demi (en aveugle). L'étude porte sur 500 rats répartis en 5 groupes de 100 : trois exposés, un contrôle et un *sham*. Les auteurs suivent un protocole expérimental rigoureux et notent plus de tumeurs mammaires ainsi qu'un poids plus élevé des rats dans le groupe contrôle cage par rapport aux groupes exposés et *sham*. Notons que c'est un phénomène couramment observé, possiblement lié au stress subi par les animaux exposés et *shams* lors des manipulations, ou encore à l'exercice qui en découle. Aucun effet de l'exposition aux radiofréquences n'est observé sur le développement tumoral.

Dans des conditions similaires, Oberto *et al.* (2007) ne trouvent pas non plus d'augmentation du nombre de lymphomes, ni d'autres tumeurs chez des souris transgéniques Eμ-*Pim*1 exposées à un signal GSM 900 avec une puissance correspondant à trois niveaux de DAS 0,5, 1,4 et 4 W/kg, tous les jours pendant 1 an et demi à raison de 1 h/jour. Les auteurs notent plus de cancers et une prise de poids supérieure dans le groupe contrôle par rapport à tous les autres groupes.

Smith *et al.* (2007) ont réalisé un travail considérable sur des rats exposés à deux types de signaux GSM 900 et GSM 1800 à 1 747 MHz (0,44, 1,33 et 4 W/kg), 2 h / jour, 5 j / semaine, 52 ou 104 semaines (> 2 ans). L'examen régulier des rats vivants (examen clinique général, palpation, poids, alimentation, examen ophtalmologique, examen clinico-pathologique, analyses de sang) a été suivi d'observations *post-mortem* : nécropsie, poids des organes, examen histopathologique de tous les organes. Tous les examens cliniques sont faits en aveugle, les résultats ne montrent pas d'effet des radiofréquences sur le développement des tumeurs bénignes, malignes et des métastases par rapport aux *shams*.

Sommer *et al.* (2007) n'ont pas trouvé d'influence des radiofréquences sur l'incidence et le développement de lymphomes chez des souris AKR/J exposées en permanence à un signal UTMS (1 966 MHz) avec un DAS de 0,4 W/kg pendant un peu plus de 8 mois. Dans cette étude, les auteurs notent que les souris du groupe contrôle (30) présentent un poids inférieur par rapport à tous les autres groupes (160 exposées, 160 *shams*).

Saran *et al.* (2007) ont utilisé des souriceaux nouveaux-nés *Patched1 (Ptcl*$^{+/-}$*)*, comparés à des souriceaux non mutants (200 de chaque) exposés pendant 1 h à un signal GSM 900 (DAS 0,4 W/kg) du 2ème au 6ème jour après la naissance. Les expériences sont faites en double aveugle, la dosimétrie est obtenue par deux méthodes. Cette étude est détaillée dans le chapitre consacré aux effets des radiofréquences sur le développement. Aucun effet de l'exposition aux radiofréquences n'a été mis en évidence sur l'incidence des tumeurs, quel que soit leur type.

Tillmann *et al.* (2007) ont réalisé une étude avec 1 170 souris B6C3F1 sujettes au développement de multiples tumeurs recherchées dans tous les organes (poumon, foie, utérus, glande surrénales, glandes pituitaires, *etc*.). Plusieurs conditions sont testées, les animaux sont exposés à des radiofréquences à 902 MHz et 1 747 MHz avec trois niveaux de DAS (0,4, 1,3 et 4 W/kg) durant 2 ans (2 h / jour, 5 j / semaine). Plus de tumeurs apparaissent chez les femelles que chez les mâles dans toutes les conditions. En revanche, il n'y a pas de différence entre animaux exposés et *shams* pour l'ensemble des tumeurs considérées (incidence et sévérité) sauf pour l'adénome hépatique dont l'incidence diminue chez les mâles avec exposition (significatif à 4 W/Kg).

Hruby *et al.* (2008), ont examiné le nombre de tumeurs mammaires induites chez des rats par le DMBA combiné avec l'exposition à une onde GSM à 902 MHz pendant 6 mois (4 h / j, 5 j / semaine, 6 mois) aux DAS 0,4 ; 1,3 et 4 W/kg, par rapport à des *sham* et des contrôles cages (100 par groupe). Les résultats ne sont pas très cohérents car il y a plus de tumeurs chez les exposés aux radiofréquences que chez les *shams*, mais également plus de tumeurs chez les animaux du groupe contrôle cage que chez les *shams*. Les auteurs mentionnent que la variabilité semble inhérente au traitement par le DMBA. De fait, les différences observées entre les groupes ne sont pas considérées comme relatives à un effet de l'exposition des radiofréquences sur la progression ou la promotion des tumeurs mammaires. Cette étude est similaire à celle de Yu *et al.* (2006).

En résumé, 15 articles ont été rattachés à la thématique sur le cancer dont deux revues de littérature.

Les 13 études analysées, toutes *in vivo*, utilisent le rat (6 études) ou la souris (5 études) comme modèles expérimentaux, soumis à des expositions longues, pour la plupart chroniques (1 à 2 ans) sauf 3 en semi-chronique (moins de 6 mois), et une de 5 jours durant un stade de développement précoce (néonatal). Les radiofréquences ont été employées de façon à évaluer leur rôle d'initiateur (radiofréquences seules) et/ou de promoteur tumoral, combinées avec l'action d'un agent mutagène connu ou chez des animaux prédisposés génétiquement. Une étude porte sur le cancer de la peau, deux études concernent les lymphomes, deux les tumeurs mammaires, trois les tumeurs du système nerveux central, et enfin cinq s'intéressent à l'apparition de tumeurs multiples.

Les fréquences testées vont de 800 MHz à 1 966 MHz avec divers types de signaux utilisés pour les systèmes de communications sans fil (TDMA, W-CDMA, GSM, UMTS). Toutes les études testent au moins une valeur de DAS de l'ordre de la valeur limite d'exposition professionnelle (corps entier), c'est-à-dire 0,4 W/kg. Cependant, en général, plusieurs valeurs de DAS comprises entre 0,3 et 4 W/kg sont utilisées. Une étude utilise un DAS plus faible de 0,08 W/kg, valeur qui correspond à la valeur limite réglementaire (corps entier) pour le public (Hirose *et al.*, 2008). Une étude ne fait pas état du DAS. Les études analysées semblent de bonne qualité, avec des systèmes d'exposition et une dosimétrie bien décrits.

Des études font état de résultats contradictoires. Dans un article, une augmentation du nombre de tumeurs sous l'effet des radiofréquences est décrite dans des conditions expérimentales qui semblent incomplètes pour pouvoir conclure. Deux études observent une diminution du nombre de tumeurs sous l'effet de l'exposition aux radiofréquences. C'est le cas pour des tumeurs pituitaires à 2 W/kg, toutefois l'effet paraît artéfactuel car, comme le soulignent les auteurs, il n'est retrouvé ni par la même équipe, ni par une autre dans des conditions d'exposition similaires. L'autre cas de diminution concerne l'adénome hépatique dont l'incidence diminue à partir de 4 W/kg, chez un type de souris transgéniques. Il convient de se garder de généraliser ou d'extrapoler un tel résultat ponctuel.

En conclusion, les résultats de ces études récentes n'apportent pas de preuve d'une augmentation d'incidence ou de l'aggravation des cancers (effet cancérogène ou co-cancérogène) dans les conditions expérimentales testées pour des niveaux d'exposition aux

radiofréquences non thermiques (jusqu'à 4 W/kg), notamment en cas d'expositions chroniques et semi-chroniques.

4.4.1.6 Effets immunologiques

Le système immunitaire est un système qui sert notamment à l'organisme à se protéger contre les agents extérieurs. Il est composé de glandes (dont la rate) et de cellules. Les cellules les plus importantes de ce système sont les lymphocytes, qui peuvent produire des anticorps (lymphocytes B), ou qui peuvent agir directement sur les agents pathogènes pour les éliminer (lymphocytes T). Les lymphocytes possèdent des marqueurs de surface qui permettent de reconnaître des sous populations spécifiques et établissent de véritables dialogues intercellulaires par l'intermédiaire de molécules (les cytokines) qui vont réguler la réponse immunitaire. Une atteinte du système immunitaire peut conduire à des défenses défectueuses vis-à-vis des agressions et est importante à rechercher.

Un total de 15 articles portant sur l'immunité a été publié. Parmi eux, 3 articles n'ont pas été rédigés en anglais et n'ont pas été retenus pour être expertisés (Chuian *et al.*, 2005 ; Zheng *et al.*, 2006 ; Glushkova *et al.*, 2007). Deux revues ont été écrites sur le sujet (Boscolo *et al.*, 2007 ; Johansson *et al.*, 2009). Parmi les publications retenues, 3 ont testé les effets d'ondes radiofréquences sur des lignées cellulaires : cellules humaines mono mac 6 (Lantow *et al.*, 2006b; Lantow *et al.*, 2006c), cellules K562 (Lantow *et al.*, 2006c), et cellules Jurkat (Huang *et al.*, 2008). Nasta *et al.* (2006) ont utilisé des cellules extraites de la rate de souris après exposition des animaux *in vivo*. Dans 5 articles, les expérimentations ont été réalisées *in vitro* à partir de sang humain (Capri *et al.*, 2005 ; Lantow *et al.*, 2006a ; Scarfi *et al.*, 2006 ; Stankiewicz *et al.*, 2006 ; Tuschl *et al.*, 2006). Une dernière étude a été réalisée sur des sujets présentant une dermatite atopique, qui est une maladie de peau de caractère immunologique (Johansson *et al.*, 2008).

Seules 2 études ont retrouvé des effets (Capri *et al.*, 2005 ; Stankiewicz *et al.*, 2006). Capri *et al.* (2005) ont réalisé une analyse en cytométrie de flux de marqueurs lymphocytaires (CD25, CD95 et CD28) sur des lymphocytes activés ou non (CD4+ et CD8+), avec comparaison de jeunes donneurs et de donneurs âgés. Aucune différence dans les pourcentages de CD25+/- D95+/- et CD28+/- n'a été mise en évidence entre les échantillons exposés et les *shams* (donneurs âgés et jeunes) après exposition à des signaux GSM (1 800 MHz) à 2 W/kg pendant 44 h. En revanche, une légère diminution de l'expression de CD95 dans les lymphocytes CD4+ chez les sujets âgés après exposition aux radiofréquences a été observée. Cette différence a été mise en évidence seulement après prise en considération de l'intensité de la fluorescence et non pas sur les résultats bruts.

Stankiewicz *et al.* (2006) ont trouvé que l'activité immunitaire *in vitro* de lymphocytes et de monocytes humains pouvait être stimulée par des ondes GSM 900 à 0,024 W/kg (15 min / j, 3 jours). L'équipe a examiné la réponse lymphocytaire à la PHA (Phytohémaglutinine A) et à la concavaline A par la saturation des récepteurs IL-2, l'activité des lymphocytes T suppresseurs et l'activité des monocytes (production de monokines). Toutefois, le système d'exposition utilisé est inadapté pour le type d'étude effectuée : une mini chambre anéchoïque (40 x 40 x 40 cm) placée dans une étuve et contenant un téléphone mobile (appelé "antenne d'émission microonde"), ce qui rend les résultats inexploitables.

Aucun des 8 articles restants retenus ne décrit d'effet significatif. Lantow *et al.* (2006b) ont exposé des lignées cellulaires humaines mono mac 6 et K562 à des signaux de 1 800 MHz (CW et différents types de GSM, DAS à 0,5, 1, 1,5 et 2 W/kg) pendant 45 min seuls ou en co-exposition avec le LPS (Lipoplysaccharide), le PMA (Phorbol 12 Myristate 13 Acétate) ou

la chaleur (40°C). La production de ROS (*reactive oxygen species*) et d'ions supéroxydes a été mesurée. Aucune différence dans la production de radicaux libres n'a été retrouvée dans les conditions testées, sauf lorsque les résultats obtenus pour le signal GSM à 2 W/kg étaient comparés à ceux des *shams*. Une augmentation de la production était alors notée et disparaissait si la comparaison était effectuée avec les contrôles étuves. Cette différence est expliquée par l'existence d'un biais expérimental par les auteurs qui concluent à l'absence d'effet au final. La même équipe, en travaillant sur des cellules mono mac 6 n'a pas retrouvé d'effet des GSM à 1 800 MHz (2 W/kg, 12 h) seuls ou associés (PMA ou gliotoxine) sur le cycle cellulaire, le taux de croissance et l'apoptose (Lantow *et al.*, 2006c).

Scarfi *et al.* (2006) ont exposé des lymphocytes humains provenant de 10 donneurs à un signal GSM (24 h) à des DAS allant jusqu'à 10 W/kg. En utilisant le test des micronoyaux, ils ont évalué la cytotoxité et la génotoxicité des radiofréquences. Aucun effet n'a été trouvé. L'intérêt de cette étude réside dans le fait que 2 laboratoires indépendants (l'un à Rome et l'autre à Naples) ont réalisé l'étude et ont abouti aux mêmes résultats.

La dernière étude menée sur une lignée cellulaire a été effectuée par Huang *et al.* (2008). Des cellules T-Jurkat ont été exposées à 1763 MHz (signal CDMA, DAS de 2 à 10 W/kg, 24 h). Aucun effet n'a été observé concernant la prolifération cellulaire, la progression dans le cycle cellulaire, les lésions d'ADN et l'expression des gènes. Les auteurs ont notamment utilisé une technique de CGHarrays (ou puces à ADN) qui a permis d'analyser l'expression de 16 000 gènes (sur un total de 30 000).

Nasta *et al.* (2006) ont exposé des souris C57BL/6 corps entier à des fréquences de type GSM 900 (2 W/kg, 2 h / j, 5 j / semaine pendant 4 semaines). Ils ont étudié les différentes sous-populations lymphocytaires sur les cellules extraites de la rate, le taux global d'anticorps et la production d'anticorps induite par le LPS ainsi que la réponse spécifique à un antigène (ovalbumine) administré *in vivo,* soit seul, soit combiné à l'exposition. Aucun effet n'a été retrouvé.

Les études suivantes ont été réalisées à partir de sang humain. L'équipe de Lantow *et al.* (2006a) a évalué l'expression des HSP et la production de radicaux libres sur des monocytes et des lymphocytes provenant de sang humain ombilical après exposition à des signaux de fréquence 1 800 MHz (CW et différents types de GSM, DAS à 2 W/kg) pendant 45 min seuls ou combiné avec la PMA ou la chaleur. Une augmentation de la production de ROS dans les monocytes exposés par rapport aux *shams* et aux contrôles incubateur a été observée, mais a été attribuée par les auteurs à une diminution du relargage de ROS dans les témoins.

Tuschl *et al.*, (2008) ont exposé des cellules humaines impliquées dans la réponse immunitaire provenant de sang périphérique de donneurs à des signaux GSM à 1 950 MHz (DAS 1 W/kg, 8 h en discontinu). La production d'interleukine 2 (IL2) et d'interféron (IFN) gamma par les lymphocytes, la production d'IL 1 et de TNF-alpha (*Tumor Necrosis Factor*) par les monocytes, l'activité de gènes impliqués dans la réponse immunitaire comme le gène du récepteur à l'IL2 et la cytotoxicité des cellules LAK (*Lymphocyte Activated Killer*) sur la lignée K562 ont été mesurées. La seule différence notée par les auteurs entre les cellules exposées et celles non exposées concernait le gène de l'IL4 mais pour un seul donneur. Les auteurs ont considéré qu'il s'agissait d'un artéfact et qu'aucune différence significative ne pouvait être retenue.

La dernière étude a été menée chez l'humain (Johansson *et al.*, 2008) : 15 sujets présentant une dermatite atopique et 15 sujets contrôles ont été exposés à un signal GSM 900 (1 W/kg,

30 min / j pendant 6 mois). Des prélèvements sanguins ont été réalisés avant et après exposition afin de doser la substance P(SP), le récepteur R1 du TNF (TNF-R1) et le BDNF (*Brain Derived Neurotrophic factor*). Des caractères physiques ont également été mesurés comme le rythme cardiaque, et un questionnaire a été rempli par les patients. Une différence entre les patients atteints de dermatite atopique et les témoins a été constatée concernant les taux de TNF-R1 (augmenté) et de BDNF (diminué), alors que la SP était à des taux comparables. Cependant l'analyse statistique montre qu'il n'y a aucune différence significative après exposition, que ce soit chez les patients atteints ou chez les témoins. Les auteurs signalent que peu de symptômes en rapport avec l'exposition aux ondes ont été rapportés chez les patients atteints et encore moins chez les sujets témoins.

En résumé, 10 études portant sur les effets des radiofréquences sur les cellules du système immunitaire ont été évaluées. La plupart a été réalisée *in vitro*. Seules deux publications ont mis en évidence un effet (Capri *et al.*, 2005 ; Stankiewicz *et al.*, 2006). L'équipe de Capri *et al.* (2005) a trouvé une légère diminution de l'expression de CD95 dans les lymphocytes CD4+ chez les sujets âgés après exposition aux radiofréquences sur un échantillon de petite taille. Cette différence a été mise en évidence seulement après prise en considération de l'intensité de la fluorescence et non pas sur les résultats bruts. D'après Stankiewicz *et al.* (2006), l'activité immunitaire *in vitro* de lymphocytes et de monocytes humains pourrait être stimulée par des ondes GSM 900. Cette dernière étude ne peut être prise en compte dans la mesure où l'exposition aux ondes était réalisée *in vitro* avec un téléphone mobile. Les huit études restantes ne montrent pas d'effet.

En conclusion et au vu des articles examinés, il n'existe pas de preuves permettant de conclure à un effet délétère des radiofréquences (essentiellement à 900 et 1 800 MHz) sur les cellules du système immunitaire.

4.4.1.7 Effets sur le système nerveux

Le système nerveux (SN) est un organe essentiel pour le corps humain puisqu'il contrôle toutes ses fonctions. Il est divisé en système nerveux central (encéphale et moelle épinière) et système nerveux périphérique (nerfs). Le cerveau est l'élément central du SN. Situé dans la boîte crânienne, il est particulièrement exposé aux ondes émises par un téléphone mobile. De ce fait, l'étude des effets des radiofréquences sur cet organe est indispensable du fait de l'utilisation massive des téléphones mobiles.

4.4.1.7.1 Effets sur la barrière hémato-encéphalique (BHE)

Le cerveau humain adulte pèse approximativement 1,4 kg, soit environ 2 % du poids du corps. Il utilise à lui seul approximativement un quart de l'oxygène et du glucose consommés par l'organisme au repos. Ceci fait de cet organe en fonctionnement l'un des tissus dépendant le plus des ressources énergétiques. Malgré ces besoins nutritifs élevés, le maintien de l'homéostasie du microenvironnement cérébral est essentiel. Cette protection du microenvironnement cérébral nécessite un isolement du cerveau vis-à-vis de l'environnement externe en prévenant l'accès de la plupart des substances circulantes tout en facilitant le prélèvement de nutriments et substrats du métabolisme et l'élimination des déchets du métabolisme. Cette fonction hautement spécialisée est assurée par un système appelé barrière hémato-encéphalique (BHE).

Le système vasculaire est un réseau complexe de vaisseaux connectant les tissus et organes de l'organisme. La BHE régule les échanges entre le sang et le cerveau, elle siège à l'interface des deux. C'est une structure formée essentiellement par les cellules endothéliales qui forment le revêtement interne des vaisseaux sanguins, mais également par l'existence de prolongements des cellules gliales qui enveloppent les capillaires. L'organisation histologique et

les propriétés de ces cellules permettent à la BHE d'être une véritable barrière sélective et métaboliquement active exerçant un contrôle sur le passage des solutés.

Certaines zones spécifiques et localisées du cerveau sont dépourvues de BHE. Les cellules endothéliales n'y forment pas de jonctions serrées et sont fenêtrées pour permettre l'échange libre de molécules entre le sang et les neurones adjacents. Ces régions (sept noyaux cérébraux) sont impliquées dans la régulation hormonale d'autres systèmes d'organes. Des échanges libres entre sang et neurones permettent à ces centres régulateurs de répondre à des modifications de concentration sanguine de peptides et d'autres substances.

Une augmentation de la perméabilité de la BHE pourrait être à l'origine d'altérations au niveau du métabolisme cérébral et de l'activité synaptique des neurones. Elle est impliquée dans le mécanisme de nombreux états pathologiques : maladie neurologique auto-immune chronique (sclérose en plaques), pathologies infectieuses (méningites, paludisme, SIDA) mais également au cours de l'ischémie, de l'hypertension, des traumatismes crâniens ou des tumeurs cérébrales.

De ce fait, des investigations sont conduites *in vivo* ou *in vitro* pour examiner l'effet des radiofréquences sur l'intégrité de la BHE.

In vivo, différentes méthodes sont employées, toutes reposant sur une évaluation de la perméabilité de la BHE. Celle-ci peut être estimée par observation du passage de molécules comme l'albumine, le fibrinogène ou les immunoglobulines ou des lymphocytes qui sont des composants endogènes n'ayant pas besoin d'être injectés à l'animal. On parle alors par exemple d'extravasation de l'albumine. Ces molécules sont visualisées par immunohistochimie sur coupes de cerveau ou sont dosées dans des extraits (comptage, mesure de la fluorescence).

Lors des expérimentations *in vivo* où les animaux sont immobilisés durant la phase d'exposition, l'étape d'habituation préalable aux systèmes d'exposition est particulièrement importante car le stress de contention peut modifier la perméabilité de la BHE.

D'autres techniques consistent à injecter à l'animal des molécules, marquées par un isotope radioactif, ou fluorescentes, ou encore colorées (bleu Evans) qui ne passent pas la barrière dans des conditions physiologiques habituelles et servent de traceurs, tel que le sucrose marqué au carbone-14, la fluorescéine, *etc*.

Des techniques peuvent être utilisées pour détecter la perméabilité de la BHE *in vivo*, par imagerie par résonance nucléaire IRM, ou tomographie par émission de positron (PET) non invasives, et par microdialyse intracérébrale.

Une méthode complémentaire consiste à évaluer une altération du tissu nerveux par détection des neurones dégénérescents - dits *dark neurones* - car ils peuvent être mis en évidence par coloration au Crésyl violet (non spécifique des neurones) ou avec une molécule fluorescente (Fluoro-JadeB) qui est plus spécifique de ce type cellulaire, évitant ainsi les faux positifs.

In vitro, les études peuvent être conduites sur des modèles de BHE reconstituée avec lequel il est possible de mesurer la perméabilité par passage de molécules dans deux compartiments ou par mesure de la résistance électrique. Les modèles sont composés d'un type cellulaire au moins (cellules endothéliales) pouvant être co-cultivé avec d'autres cellules (astrocytes, cellules gliales, etc.) selon la complexité du modèle.

Pour cette catégorie, 17 articles ont été examinés dont une revue et 3 études qui sont détaillées par ailleurs dans le chapitre 4.4.1.8 « effet sur le développement » (Kuribayashi *et*

al., 2005 ; Finnie *et al.*, 2006a ; Kumlin *et al.*, 2007). La synthèse finale portera donc sur 16 articles.

Sur les 13 articles de recherches analysés ci-dessous :

- trois études *in vitro* ont été faites sur des temps relativement long avec des signaux GSM à 1 800 MHz (Franke, Ringeltestein, *et al.*, 2005), UMTS-1966 (Franke, Streckert *et al.*, 2005), avec des dosimétries respectivement validées (0,3 W/kg) ou incomplète (0,02 à 1,64 W/kg), soit aiguë (temps court) onde continue à 915 MHz et une sans dosimétrie (aucun DAS fourni) en onde pulsée (20 Hz) (Kuo *et al.*, 2008) sans dosimétrie (aucun DAS fourni) ;
- huit études *in vivo* ont été réalisées sur des rats en exposition la plupart du temps lointaine de type chronique (Grafstrom *et al.*, 2008), semi-chronique (Cosquer *et al.*, 2005 ; Finnie *et al.*, 2006b) ou aiguë (Eberhardt *et al.*, 2008 ; Nittby *et al.*, 2009 ; Masuda *et al.*, 2009 ; McQuade *et al.*, 2009 ; Poulletier de Gannes *et al.*, 2009) ;
- deux études concernent l'humain, réalisées par la même équipe (Söderqvist, 2009a et b).

Etudes *in vitro*

Franke, Ringeltestein, *et al.* (2005a) n'ont pas observé de modification de la perméabilité au sucrose pour des expositions de 1 à 5 jours en signal GSM à 1800 MHz. Il n'est pas précisé dans quel délai après l'exposition les tests de perméabilité au sucrose ont été réalisés. La dosimétrie est bien décrite.

La même équipe (Franke, Streckert *et al.*, 2005b) n'a pas observé non plus d'effet avec un signal UMTS dans des expériences réalisées en double aveugle où la perméabilité et la résistance électrique ont été mesurées, ni pendant, ni après exposition. La température est contrôlée, la dosimétrie numérique est bien décrite mais il n'y a pas d'explication sur le calcul du DAS à partir du champ électrique.

Kuo *et al.* (2008) ont cherché à faire passer des antiviraux anti-HIV à travers la BHE, en association avec divers types de molécules facilitant la perméabilisation. Mais les résultats présentés semblent contradictoires à l'examen des figures. Le DAS nest pas connu et les conditions d'exposition ne sont pas clairement décrites. De ces faits, les résultats de cette étude ne peuvent pas être interprétés.

Etudes *in vivo*

Toutes les études sont conduites sur des rats ou des souris.

Trois études ont été conduites en Suéde par l'équipe de Salford :

Eberhardt *et al.* (2008) ont observé un effet sur la perméabilité de la BHE par passage de l'albumine et sur la dégénérescence neuronale (crésyl violet) pour des DAS de 0,12 et 1,2 mW/kg en exposition GSM à 900 MHz chez des rats mâles et femelles. Les DAS testés sont 0,1, 1, 10 et 100 mW/kg pour les males, 0,13, 1,3, 13 et 130 mW/kg pour les groupes femelles (7 ou 8 rats par groupe). Le DAS est différent car les mâles et femelles n'ont pas le même poids. Des effets significatifs sont observés sur le passage d'albumine et le nombre de *dark neurones* sont d'autant plus observés que le DAS est faible. Cette même équipe avait trouvé des effets similaires en 2003 (Salford *et al.*, 2003), mais le maximum de dégénérescence neuronale était observé pour un autre niveau de DAS (200 mW/kg). Les auteurs n'ont pas d'explication. De même, ils se demandent comment la fuite d'albumine observée, du fait de son amplitude faible, pourrait être reliée à la dégénérescence neuronale,

bien qu'une corrélation soit observée. Il n'y a pas d'effet lié au sexe ou à la position dans la chambre d'exposition ni sur d'autre types cellulaires autour des neurones altérés.

En 2009, la même équipe (Nittby *et al.*, 2009) a réalisé une étude dans des conditions similaires avec les DAS 0, 0,12, 1,2, 12 et 120 mW/kg sur 48 rats Fischer, pendant 2 à 3 mois. Les auteurs observent une augmentation de la perméabilité de la BHE à l'albumine, faible mais statistiquement significative à 12 mW/kg (0,012 W/kg) et pour des délais variables. En revanche il n'y a pas d'effet sur le nombre de *dark neurones*. Les examens des coupes sont faits en aveugle. L'article est constitué pour moitié d'une introduction faisant une revue essentiellement restreinte aux travaux de l'équipe de Salford.

Grafstrom *et al.* (2008) n'ont pas observé de perméabilisation de la BHE en utilisant plusieurs types de marqueurs, ni d'apparition de *dark neurones* ou d'atteintes neuronales après avoir exposé des rats à un signal GSM 900 avec des de DAS de 0,6 et 60 mW/kg, 2 h / semaine pendant 55 semaines. Notons que d'une part, les tests d'intégrité de la BHE sont faits 5 à 7 semaines après la fin d'exposition. D'autre part, 56 rats de 4 à 6 mois sont utilisés au début de l'exposition (de 200 g pour les femelles et 350 g pour les mâles, autant de mâles que de femelles) dont 32 sont exposés, 16 *sham* et 8 « contrôles cages ». Leur poids en fin d'expérimentation est de 300 g pour les femelles et 545 g pour les mâles. Au final, l'échantillon utilisé est très disparate.

Notons que, pour ces trois études, il n'y a pas de dosimétrie. Une simulation numérique est mentionnée pour l'obtention du DAS, sans précision sur la méthode qui a permis de la définir, et il n'est pas fait état de dosimétrie expérimentale.

Cosquer *et al.* (2005) n'observent pas d'effet d'une exposition semi-chronique à 2 450 GHz PW, 45 min / jour pendant 10 jours, ni par observation indirecte à l'aide d'un test de cognition, ni sur le passage de bleu *Evans*. Pour la cognition les auteurs ont recherché si les radiofréquences modifient la réponse comportementale de l'animal à l'injection d'un antagoniste muscarinique (scopolamine) passant peu la BHE. En revanche, la réponse des rats contrôle cage diffère de celle des *sham*s ou des exposés (effet du stress) malgré l'habituation des animaux aux manipulations avant de commencer les tests. Les rats sont placés dans des cages individuelles, ce qui n'est pas souhaitable pour le comportement social. La dosimétrie est complète, le DAS est de 3 W/kg au niveau du cerveau.

Finnie *et al.* (2006b) n'ont pas observé d'extravasation de l'albumine chez des souriceaux nouveau-nés exposés à un signal GSM 900 (4 W/kg), 60 min / jour pendant les 7 premiers jours après la naissance. Les mêmes auteurs n'avaient pas trouvé d'effet dans les mêmes conditions d'exposition sur des cerveaux de fœtus de souris exposées durant toute la gestation. Finnie *et al*., 2006a). Ces études sont détaillées dans le chapitre 4.4.1.8 « effets sur le developpement ».

Trois équipes ont tenté de reproduire les résultats obtenus par l'équipe suédoise de Salford *et al.* Depuis 1997, celle-ci rapporte des effets des radiofréquences de faible puissance sur la BHE (changement de perméabilité et/ou présence de *dark neurones*) à partir d'une série d'expériences pour des fréquences 900 et 915 MHz continue et modulée GSM, avec des DAS allant de 0,002 à 5 W/kg. Ces résultats ne montrent pas d'effet dose-réponse, des effets pouvant être obtenus aux faibles valeurs de DAS et non aux DAS plus élevés selon les cas[71].

Les trois études de réplication sont présentées ci-dessous :

[71] En 2006, compte tenu des répercussions sanitaires possibles d'un tel effet sur la BHE, l'OMS avait signifié l'urgence de reproduire ces résultats dans d'autres laboratoires pour les confirmer ou pas (RF research agenda, 2006, www.who.int/peh-emf/research/agenda/en/index.html).

Masuda *et al.* (2009) n'ont pas observé de passage d'albumine, ni d'apparitions de *dark neurones* dans des expériences visant à reproduire les résultats de l'équipe de Salford *et al.* (2003) avec un système d'exposition identique (cellule de transmission électromagnétique, TEM, à deux compartiments). La dosimétrie est expérimentale avec calcul de DAS à partir des mesures de puissance incidente, réfléchie et transmise, il n'est pas fait état de simulations numériques. Les expériences sont faites en aveugle. Les animaux sont exposés à un signal 915 MHz en onde continue (DAS 0,02, 0,2 et 2 W/kg) pendant 2 h. Quatre vingt deux rats mâles par groupes de 16 (8 pour analyses à J 14 et 8 à J 50) Des contrôles positifs sont réalisés avec deux modèles différents de rupture de barrière (froid, produit chimique).

McQuade *et al.* (2008) n'ont pas observé d'effet lié à une exposition aux radiofréquences de 30 min à la fréquence GSM à 915 MHz (deux types de modulation 217 Hz et 16 Hz), et continue (DAS de 0,0018 à 20 W/kg) sur des rats mâles de 125 - 300 g ayant subi une habituation en plusieurs étapes (512 rats par groupes de 27 à 42). La perméabilité de la BHE au bleu *Evans* est examinée sur des coupes de cerveau au microscope. Les contrôles positifs sont obtenus de deux façons (échauffement et chimique). L'analyse des coupes est faite en aveugle par deux expérimentateurs, pour plus de précaution, une partie des lames est envoyée dans l'équipe de Salford pour comptage, les résultats obtenus sont les mêmes. Le système d'exposition a été construit en accord avec Salford (après visite) pour reproduire l'étude le plus fidèlement possible. La dosimétrie expérimentale est obtenue par calcul comme dans l'étude de Masuda *et al.*, (2009) ainsi que par calorimétrie. La température est mesurée avec une sonde compatible aux radiofréquences. Une méthode d'analyse statistique des résultats identique à celle de Salford a été employée. Notons que les auteurs ont été surpris de ne pas observer d'altération de la BHE au DAS de 20 W/kg, mais les mesures effectuées localement ont montré que la température n'excédait pas 40,6°C, ce qui n'est pas suffisant pour entraîner un effet thermique.

Poulletier de Gannes *et al.* (2009) ne confirment pas non plus les résultats de Salford après avoir exposé des rats à un signal GSM 900, (DASde 0,14 et 2 W/kg) pendant 2 h après habituation progressive, ni sur l'intégrité de la BHE, ni sur la dégénérescence neuronale. L'apoptose des neurones a été également examinée. Les auteurs utilisent plusieurs méthodes pour évaluer la dégénérescence neuronale dont la coloration au Fluoro-Jade plus spécifique. Cette étude présente une dosimétrie numérique et expérimentale complète.

Dans ces trois études, comparées avec les travaux de l'équipe de Salford, l'échantillon est homogène avec des rats de même âge, de même poids et tous du même sexe mâle, l'utilisation de femelles pouvant entraîner des variations d'ordre hormonal. Salford *et al.* utilisent des rats d'âges variables et de sexes différents sans en tenir compte dans l'analyse des résultats. Pour la partie exposition, selon les équipes, les valeurs du DAS utilisées sont plus élevées ou dans une gamme de puissance plus large.

<u>Etudes sur l'humain</u>

Söderqvist, Carlberg, Hansson Mild, Hardell (2009a)

Les auteurs ont réalisé une étude de provocation pour laquelle ils ont exposé 41 volontaires (17 hommes et 24 femmes, âgés de 18 à 30 ans) pendant 30 minutes à un signal GSM 890 MHz. Une valeur de DAS de 1 W/kg est fournie, sans qu'une dosimétrie numérique ou expérimentale ne soit mentionnée. Les sujets sont installés devant un écran LCD et regardent un DVD pendant l'exposition. Quatre prélèvements sanguins ont été effectués pour chaque volontaire : à l'arrivée au laboratoire, après 30 minutes de repos, à la fin de l'exposition, et 60 minutes après la fin de l'exposition. Selon les auteurs, les résultats ne montreraient aucune variation des taux de protéines S100b après provocation, et montreraient en revanche une augmentation significative du taux de transthyrétrine (TTR) 60 minutes après la provocation par rapport aux mesures effectuées juste avant la provocation (médianes : 0,235 g/l *vs* 0,230 g/l). Cependant, il semble y avoir soit un effet des

conditions de conservation des échantillons, soit un effet lié à l'environnement du volontaire au moment du prélèvement. Par ailleurs, il convient de remarquer que cette variation est inférieure au coefficient de variation de la mesure indiquée par les auteurs : 5,5 % pour une concentration de 0,28 g/l, et qu'il existe une variation significative entre les taux mesurés avant et au début de la provocation pouvant, à elle seule, expliquer ces résulats. Ces observations nuancent les conclusions.

Söderqvist, Carlberg et Hardell (2009b) ont analysé les taux de protéine S100b et de TTR en fonction de l'utilisation récente (entre environ 10 et 400 minutes) de téléphones mobiles ou DECT chez des volontaires. Le résumé de l'article fait état de 1000 personnes recrutées par téléphone,314 participent effectivement, soit un taux de participation faible de 31,4 %, ce qui présente un risque de biais de sélection. L'échantillon comprend plus de femmes que d'hommes et la moyenne d'âge est plus forte chez les participants que chez les non participants. Cet échantillon semble inhomogène au regard d'un des paramètres mesurés, le TTR. En effet, physiologiquement, les hommes ont une concentration en TTR plus forte que les femmes, les plus de 47 ans ont une plus forte concentration de TTR que les jeunes, et cette concentration est plus élevée chez les fumeurs.

Les résultats indiquent une absence de variation des taux de protéines S100b avec l'utilisation passée ou récente de téléphone. S'agissant de la TTR, les auteurs relèvent une variation significative du taux de TTR dans la journée. Ils indiquent que des taux élevés sont associés chez l'homme à une utilisation de téléphones mobiles depuis plusieurs années, et que l'utilisation récente d'un téléphone mobile entraîne chez la femme une augmentation des taux de TTR. Cependant, ces résultats ne semblent pas statistiquement significatifs. Dans ces études, les auteurs ont utilisé des dosages de la protéine S100b et de la TTR comme marqueurs de l'intégrité de la barrière hémato-encéphalique dans les prélèvements sanguins. Ces protéines endogènes circulantes ne sont pas communément utilisées comme marqueurs malgré leur intérêt. De ce fait, un travail de validation de ce paramètre serait nécessaire. Les auteurs précisent qu'il faudrait utiliser des marqueurs plus spécifiques du cerveau. Par ailleurs, la TTR devrait être analysée dans le liquide céphalo-rachidien (LCR), ce qui n'est pas possible pour des raisons éthiques. Les résultats de ces études sont limités par ces biais.

La synthèse des effets sur la BHE porte sur 16 articles de recherche, elle comprend :

<u>Trois études *in vitro*</u> :

2 d'entre elles ne montrent pas d'effet d'exposition semi-chronique GSM ou UMTS pour des DAS allant de 0,02 à 1,64 W/kg obtenus avec une dosimétrie validée, mais incomplète dans un cas (Franke *et al.*, 2005 a et b).

Une étude trouve des effets des radiofréquences à 915 MHz avec des caractéristiques de modulation et le système d'exposition ne sont pas courants et aucune dosimétrie ne permet de connaître le DAS (Kuo *et al.* 2008).

<u>Deux études chez l'humain</u>

Deux études font état d'une variation faible du taux de protéines circulantes chez l'homme mais présentent des lacunes méthodologiques qui ne permettent pas d'en exploiter les résultats, en particulier concernant le choix du paramètre qui n'est pas validé, variable selon les individus et non mesuré dans liquide céphalo-rachidien (LCR) mais dans le sang (Söderqvist, 2009a et b).

<u>Onze études *in vivo* :</u>

Les effets de l'exposition aux radiofréquences sur la perméabilité de la BHE et/ou l'intégrité

neuronale ont été recherchés *in vivo* en exposition aiguë, semi-chronique ou chronique avec une large gamme de DAS allant de 0,0018 à 20 W/kg pour des signaux GSM 900, TDMA à 1 439 MHz ou 2 450 MHz (continu et modulé).

Deux études conduites par l'équipe de Salford en Suède indiquent des effets hétérogènes d'une exposition GSM 900 dans une gamme de valeurs de DAS très faibles (0,12 à 130 mW/kg).

L'autre étude de la même équipe ne montre pas d'effet d'un signal GSM 900 en exposition chronique à 0,6 et 60 mW/kg (Grafstrom *et al.*, 2005 - équipe de Salford). Les parties physique et biologie présentent des lacunes ne permettant pas de valider les résultats.

Huit études présentent des parties biologique et physique validées et ne montrent pas d'effets.

Pour deux d'entre elles, la dosimétrie expérimentale est correcte mais il n'est pas fait état de simulations numériques (McQuade *et al.*, 2009 et Masuda *et al.*, 2009). Les autres études présentent une dosimétrie numérique et expérimentale pour des expositions en GSM 900 (Poulletier *et al.*, 2009) tandis que les 5 autres sont en exposition semi-chronique, en signal 2 450 MHz modulé (Cosquer *et al.*, 2005), TDMA à 1 439 Mhz (Kuribayashi *et al.*, 2005) et 900 MHz (Finnie *et al.*, 2006a et b, Kumlin *et al.*, 2007).

Quatre de ces études *in vivo* s'intéressent à des stades de développement précoces.

Trois études (en semi-chronique) n'ont pas montré d'altération de la BHE chez des ratons exposés à un signal TDMA à 1 439 Mhz (0,2 et 6 W/kg) (Kuribayashi *et al.*, 2005), chez des fœtus de souris gestantes et des souriceaux nouveau-nés exposés à un signal GSM 900 (4 W/kg) (Finnie *et al.*, 2006a et b) ou à la même fréquence (0,3 et 3 W/kg) chez des jeunes rats (Kumlin *et al.*, 2007). Dans cette dernière étude une amélioration des performances est observée après exposition lors de tests de cognition.

Parmi les études *in vivo*, trois équipes - aux Etats-Unis, en France et au Japon (McQuade *et al.*, 2009 ; Masuda *et al.*, 2009 ; Poulletier *et al.*, 2009) - ont tenté de reproduire les résultats obtenus par l'équipe de Salford *et al.* (900 - 915 MHz). Ces travaux conduits avec rigueur et en aveugle n'ont pas permis de confirmer les résultats de l'équipe suédoise, mais en revanche ont permis de mettre l'accent sur une série de biais méthodologiques pouvant les expliquer.

Notons que l'équipe de Salford trouve, selon les expériences, des effets soit sur la perméabilité de la BHE, soit sur la dégénérescence neuronale pour des valeurs du DAS différentes selon les expériences, parfois d'autant plus importants que les valeurs du DAS sont faibles et parfois ne trouve pas d'effet des radiofréquences. Ces résultats, ainsi que ceux obtenus par ces auteurs dans les années antérieures semblent incohérents. Il serait souhaitable que les auteurs tentent de reproduire ces expériences dans un autre laboratoire, ou accueillent une équipe extérieure sur place afin d'élucider la question une fois pour toute. Il semble maintenant qu'il n'y ait plus lieu d'entreprendre des études de réplications supplémentaires dans des laboratoires indépendants.

En conclusion, es travaux conduits depuis 2005 n'apportent pas de preuve convaincante d'un effet des radiofréquences sur l'intégrité de la BHE. Ils convergent vers une absence d'effet pour des DAS allant jusqu'à 6 W/kg et même au-delà (jusqu'à 20 W/kg en exposition aigüe) sur les modèles biologiques utilisés.

4.4.1.7.2 *Effets des champs électromagnétiques radiofréquences sur la cognition et le bien-être*

L'étude conjointe des effets des champs électromagnétiques sur le bien-être et la cognition a été le fait du rapport dit TNO (Zwamborn *et al.*, 2003) et de l'étude de réplication qui en a été faite en Suisse (Regel *et al.*, 2006).

Rappelons que le rapport dit TNO concernait une étude de provocation, comparant deux populations de sujets (déclarés hypersensibles aux ondes électromagnétiques (EHS) *vs* témoins normaux) et décrivait une diminution du bien-être dans les deux groupes, mais significativement plus marquée chez les hypersensibles, après exposition à un champ électrique de 1 V/m, simulant celui émis par une station de base UMTS. Ce rapport a été analysé par l'Affse en 2005 [Afsse, 2005] Le GT concluait alors : *« L'analyse de la méthodologie de l'étude et de ces résultats montre bien qu'il convient, si l'on veut échapper à la critique et obtenir des résultats exploitables, d'approfondir la conception d'une telle étude en maîtrisant les différents stades de l'expérimentation. Dans l'attente des résultats de l'étude de réplication suisse et de l'étude anglaise d'Elaine Fox qui va démarrer, le groupe d'experts estime qu'il n'est pas souhaitable de faire d'autres études de réplication de ce type en France. »*

Il faut rappeler aussi que les auteurs du rapport TNO concluaient eux-mêmes : *« Since this research is the first one to find a statistically significant relation on Well-Being by using a subset of Bulpitt's questionnaire, reproduction of our research by a research group independent of TNO is necessary*[72]*."* De plus, les données contenues dans ce rapport n'ont, à notre connaissance, jamais été publiées dans une revue à comité de lecture.

L'étude de réplication suisse a été publiée en 2006 (Regel *et al.*, 2006). Il s'agit d'une étude de provocation utilisant un signal identique à celui d'une station de base UMTS, appliqué selon un protocole double-aveugle, *cross over*, et tirage au sort chez 117 sujets sains (33 sujets EHS et 84 témoins non EHS). Les sujets EHS ont été recrutés de façon très rigoureuse de façon à ne pas présenter d'autre altération de leur santé que leur hypersensibilité déclarée à la téléphonie mobile ou à la téléphonie sans-fil. Les témoins ont été appariés en âge, sexe et lieu de résidence. Tous les sujets ont participé à 3 sessions expérimentales à une semaine d'intervalle (à la même heure de la journée), après avoir eu une session d'entraînement une semaine plus tôt. Ils avaient du s'abstenir de prise médicamenteuse au cours des 24 heures précédentes, et d'utilisation de téléphones mobiles et sans-fil au cours des 12 heures précédentes. Les conditions d'exposition et de dosimétrie, décrites en détail et avec précision, étaient strictement contrôlées pour assurer une exposition identique à celle utilisée dans l'étude TNO (1 V/m), mais aussi une exposition à un champ de 10 V/m. La durée d'exposition était de 45 min. Avant et après exposition, les sujets avaient à remplir trois questionnaires de bien-être, le questionnaire utilisé dans l'étude TNO, un questionnaire validé pour les études *test-retest* à court intervalle et un questionnaire original portant sur des facteurs non explorés par les deux autres questionnaires. Pendant l'exposition, les sujets avaient à effectuer des tests cognitifs, déjà utilisés dans d'autres études (diverses formes de temps de réaction) ou dans l'étude TNO (test d'attention visuelle sélective).

Aucune relation entre le bien-être et le niveau d'exposition n'a été observée, aussi bien chez les sujets EHS que chez les témoins quel qu'ait été le questionnaire et le niveau d'exposition, alors qu'une diminution significative du score de santé au 3ème questionnaire a été observée une semaine après l'expérimentation. En ce qui concerne les tests cognitifs, deux effets marginaux ont été observés lors de l'exposition à 10 V/m : une diminution du

[72] *"Dès lors que cette recherche est le première à trouver un effet statistiquement significatif sur le bien-être évalué à l'aide d'un sous-ensemble du questionnaire de Bulpitt, il est nécessaire qu'un groupe de recherche indépendant du TNO réplique cette recherche. »*

temps de réaction lors d'un test à deux choix chez les sujets EHS (-20 ms ; p = 0,005), et une légère augmentation du nombre d'erreurs à l'épreuve *1-back* chez les témoins (97,3 % de réponses justes *vs* 98,2 % pendant l'exposition simulée ; p = 0,046). Ces deux effets ont disparu après ajustement pour tenir compte des multiples critères étudiés. Les auteurs ont analysé les causes pouvant expliquer les différences entre leurs résultats et ceux de l'étude TNO. Rejoignant les critiques faites antérieurement, ils estiment que la cause principale est que l'échelle de bien-être utilisée dans l'étude TNO était un sous-ensemble, non validé pour les études *test-retest* à court intervalle, de l'échelle de Blulpitt et Fletcher (1990). Ils mettent également en cause la taille des échantillons étudiés (24 sujets EHS et 24 témoins dans l'étude TNO *vs* 33 sujets EHS et 64 témoins dans leur étude), le non appariement correct des sujets EHS et des témoins dans l'étude TNO, et le *design* même des séances d'exposition (les expositions réelles et simulées étant réalisées au cours de la même session dans l'étude TNO, alors qu'elles étaient appliquées à une semaine d'intervalle dans leur étude, évitant ainsi la confusion des effets éventuels).

L'étude de Regel et al. est bien plus convaincante que l'étude TNO.

Dans le rapport Bioinitiative, H. Lai ne mentionne pas l'étude TNO (Zwanborn *et al.* 2003), alors qu'il y fait figurer sa réfutation (Regel *et al.*, 2006). La conclusion de cette section du rapport BioInitiative, en ce qui concerne la cognition, est la suivante : *« Ainsi une majorité d'études (13/23) ont montré que l'exposition aux téléphones cellulaires pourrait affecter les fonctions cognitives et les performances dans différentes tâches comportementales. Il est intéressant de noter que la plupart des études ont montré une facilitation et une amélioration des performances. »*

Dans une méta-analyse récente [Barth *et al.,* 2008], sur les 40 études retrouvées entre 1999 et 2007 dans les bases de données, 19 seulement ont été considérées comme pertinentes et 10 ont rempli les six critères imposés pour entrer dans la métanalyse, à savoir : (1) étude comportant, soit deux groupes de sujets (exposés et non exposés) avec des mesures de base, soit un groupe de sujets soumis à des mesures répétées (avec et sans exposition), (2) moyenne et écart-type des variables dépendantes documentés pour les deux groupes, (3) application d'une exposition en simple ou double aveugle, (4) double exposition, réelle et simulée, à un champ radiofréquences de type GSM compris entre ~900 MHz et ~1 800 MHz, (5) sélection de sujets considérés comme normaux, et (6) étude incluant au moins un test neuropsychologique utilisé dans une étude remplissant les mêmes critères. Les auteurs ont pu mettre en évidence quelques différences significatives. L'attention, mesuré par une tâche de soustraction, semble être affectée pendant l'exposition : le temps de réaction est diminué. La mémoire de travail, mesurée par le test *N-back*, est elle aussi modifiée mais de manière contradictoire : le temps de réaction est diminué dans la condition *0-back target*, et augmenté dans la condition *2-back target*, et le nombre d'erreurs est augmenté dans la condition *2-back non-target*. Dans la discussion, les auteurs signalent que ces effets ne concernent que deux tests sur les 29 étudiés et sont *« si faibles que leur implication dans les performances de la vie quotidienne peut être pratiquement éliminée. »* Ils discutent aussi soigneusement les résultats, qu'ils qualifient de paradoxaux, du test *N-back* et concluent que, dans la mesure où *« ces résultats ne peuvent pas être expliqués par les modèles scientifiques conventionnels de relation dose-effets, ils doivent être jugés avec prudence. »*

On peut rapprocher de cette méta-analyse, la revue de Valentini *et al.* (Bioelectromagnetices 2007;28:415-32) sur les effets des champs électromagnétiques sur les données électroencéphalographiques chez l'homme. Sur les 49 articles pertinents retrouvés dans les bases de données entre 1995 et 2006, ils n'ont retenu que les 32 remplissant des critères stricts de méthodologie et d'analyse statistique. Leurs conclusions sont les suivantes. En ce qui concerne l'EEG de veille (6 références), le résultat le plus clair et le plus récurrent est un changement dans la bande *alpha* ; dans le sens d'une augmentation de la puissance *alpha*,

ce qui est cohérent avec les données cognitives montrant une diminution du temps de réaction pouvant traduire une amélioration de l'attention. En ce qui concerne l'EEG de sommeil (8 références), l'effet le plus stable des expositions à un signal de type GSM est l'augmentation des puissances *alpha* et *sigma* pendant les premières phases du sommeil non paradoxal (NREM) après 30 minutes d'exposition. En ce qui concerne les potentiels évoqués (14 références), les résultats sont contradictoires et ne permettent aucune conclusion.

En conclusion : L'altération du bien-être après exposition à des champs électromagnétiques, qui avait été observée dans l'étude TNO, n'a pas pu être reproduite par une étude rigoureuse. Les études portant sur les effets cognitifs des champs électromagnétiques chez l'homme ont utilisé des méthodes très diverses et parfois insuffisamment rigoureuses. Les rares effets reproductibles qui ont été observés vont dans le sens d'une amélioration des performances (diminution du temps de réaction). Mais, ils sont très légers et peu susceptibles d'avoir une influence sur les activités de la vie quotidienne. Ils pourraient être étayés par des données de l'EEG de veille.

4.4.1.7.3 Effets sur le cerveau (autres que cognitifs)

En excluant les articles portant sur la cognition et sur l'activité électroencéphalographique, 16 articles portent spécifiquement sur les effets des radiofréquences sur le cerveau, dont une revue (non prise en compte) concernant les effets neurophysiologiques des champs électromagnétiques des téléphones mobiles (Valentini *et al.*, 2007).

Etude sur le métabolisme cérébral par ^{1}H SRM ou spectrométrie par résonance magnétique du proton

Fondée sur le même principe physique que l'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique), la SRM (Spectrométrie par Résonance Magnétique) est une technique qui fournit des informations sur le métabolisme des cellules qui constituent les tissus. Son but est de détecter toutes les variations de la concentration de certains métabolites, caractérisant ainsi des pathologies. Par différentes méthodes de localisation, l'obtention de spectres permet la quantification de ces métabolites résonants à des fréquences spécifiques. Les domaines d'application de cette technique sont : le cerveau, le muscle, la prostate et d'autres organes tels que le rein et le foie. La SRM du proton (^{1}H SRM) sur le cerveau est de loin l'application la plus utilisée. Elle est, dans certains cas, une méthode de diagnostic dont la sensibilité est supérieure à celle de l'IRM. Les principaux métabolites observables en ^{1}H SRM sont :

- le N-Acétyl-Aspartate (NAA) : présent dans les neurones, le NAA est qualifié de marqueur d'intégrité neuronale. Il est un reflet de la densité et du fonctionnement neuronal. A l'apparition de certaines pathologies, sa concentration diminue ;
- la Choline (Cho) : la choline libre, en faible concentration, renseigne sur la densité cellulaire. Le pic de la choline accentué en cas de tumeur traduit soit une démyélinisation ou un *turn-over* membranaire important dû à une prolifération membranaire. Il est un marqueur de souffrance membranaire ;
- le myo-Inositol (mI) est responsable des échanges à travers les membranes. Une augmentation de la concentration de ce métabolite est rencontrée lors des processus qui impliquent une activation gliale; sa diminution est parfois reliée à des phénomènes d'hyperosmolarité ;
- la Créatine (Cr) : son pic n'est pas affecté lors d'une pathologie et sert très souvent de référence. Elle est prise en compte pour le calcul de certains ratios de métabolites. Elle est témoin du métabolisme énergétique cellulaire.

Khiat *et al.* (2006) ont utilisé la ^{1}H SRM pour évaluer si l'utilisation intensive d'un téléphone mobile pouvait altérer le métabolisme cérébral. A partir de 36 sujets, ils ont déterminé 2 groupes de sujets : un groupe témoin non utilisateur de 15 personnes et un groupe de sujets utilisateurs intensifs (21 sujets tous utilisateurs du côté droit). Les « utilisateurs » se servaient d'un téléphone mobile depuis 2 à 10 ans (moyenne 5,5 ± 2,2 ans) pendant 1 à 4 h / jour (moyenne: 2,4 ±1,1 ans). Ils ont ciblé deux zones : le lobe temporal droit et la zone ponto-bulbaire et ont mesuré les ratios NAA/Cr, Cho/Cr et mI/Cr. Aucune variation dans les valeurs moyennes des rapports n'a été retrouvée entre les utilisateurs et les contrôles, ni entre le lobe temporal droit et la zone ponto-bulbaire. De plus, la comparaison entre le côté exposé et le côté non exposé chez les 21 utilisateurs ne montrait pas de changement dans les ratios. Les auteurs concluent qu'aucune variation dans le métabolisme cérébral n'a pu être mise en évidence après utilisation intensive d'un téléphone mobile. Cette étude bien menée, objective et originale est la première de ce type. Il faut cependant souligner qu'elle concerne seulement un petit échantillon de population, mais qu'elle ne peut être applicable sur un plus gros échantillon du fait de son coût.

Etude de la circulation cérébrale :

- Etude de la macrocirculation (par PET-scan) :

La tomographie par émission de positons (TEP) est une méthode d'imagerie médicale pratiquée par les spécialistes en médecine nucléaire qui permet de mesurer en trois dimensions l'activité métabolique d'un organe grâce aux émissions produites par les positons issus de la désintégration d'un produit radioactif injecté au préalable (terminologie anglo-saxonne : *positron emission tomography* - PET ou PETscan-). La TEP repose sur le principe général de la scintigraphie qui consiste à injecter un traceur dont on connaît le comportement et les propriétés biologiques pour obtenir une image du fonctionnement d'un organe. Ce traceur est marqué par un atome radioactif (carbone, fluor, azote, oxygène, *etc*.) qui émet des positons dont la destruction produit elle-même deux photons. La détection de la trajectoire de ces photons par le collimateur de la caméra TEP permet de localiser le lieu de leur émission et donc la concentration du traceur en chaque point de l'organe. C'est cette information quantitative que l'on représente sous la forme d'une image faisant apparaître en couleurs les zones de forte concentration du traceur. Ainsi la TEP permet de visualiser les activités du métabolisme des cellules : on parle d'imagerie fonctionnelle par opposition aux techniques d'imagerie dites structurelles comme celles basées sur les rayons X (radiologie ou CT-scan) qui réalisent des images de l'anatomie. Le débit sanguin cérébral étant étroitement asservi au métabolisme du cerveau, et en même temps plus rapide à mesurer, c'est ce paramètre qui est généralement utilisé pour étudier les bases cérébrales des activités cognitives à l'aide du paradigme dit d'activation. Ce dernier consiste à soustraire entre elles des images quantitatives obtenues dans des conditions ne différant que par l'exécution d'une tâche cognitive bien définie ; on peut ainsi mettre en relation la réalisation de cette tâche avec des augmentations ou des diminutions très localisées de l'activité mébolique. Ce paradigme n'a pas été directement appliqué à l'étude des effets biologiques et sanitaires des ondes radiofréquences. Mais deux équipes, celle de l'Université de Zurich, Suisse (Huber *et al.* 2002 ; Huber *et al.* 2005) et celle de l'Université de Turku, Finlande (Haarala *et al.* 2003 ; Aalto *et al.* 2006), ont étudié les effets d'une exposition à un signal de téléphonie mobile sur la distribution tridimensionnelle du débit sanguin cérébral. Ces études sont rapportées ici parce qu'elles ne comportent pas de partie cognitive. Par ailleurs, les deux équipes ayant reproduit leurs premiers résultats, seuls leurs derniers articles sont analysés ci-dessous.

Huber *et al.* (2005) ont exposé 16 sujets à un signal GSM 900 pendant 30 minutes (DAS de 1 W/kg). En fait, chaque sujet a eu 3 expositions réalisées en double aveugle : *sham*, exposition à un signal de type téléphone mobile (ou signal combiné), exposition à un signal de type station de base. Un PET-scan était réalisé 10 min après exposition avec injection de

300-350 MBq d'eau radio-marquée. L'analyse n'a pu être réalisée que pour 12 des 16 sujets participants, du fait de problèmes techniques et logistiques. Les résultats font apparaître une augmentation du débit sanguin cérébral régional pour le signal "téléphone" dans les régions les plus exposées (cortex préfrontal dorso-latéral), ainsi qu'une augmentation relative également du côté exposé (gauche) par rapport au côté non exposé au niveau du gyrus frontal inférieur gauche. Ces modifications circulatoires ne sont pas retrouvées pour l'exposition "station de base". Etant donné que les seules différences entre les deux types d'émissions concernent la différence de puissance crête, les auteurs concluent que le type de modulation impulsionnelle est à la base des variations observées. Bien que cette étude semble rigoureuse, le faible échantillon testé (12 sujets) est l'un de ses points faibles. De plus, les variations observées restent dans des seuils physiologiques.

Aalto *et al.* (2006) ont employé la même technique de PET-scan chez 12 sujets pour rechercher des variations régionales du débit sanguin cérébral en les exposant de manière simultanée à un téléphone mobile. Les durées d'exposition allaient jusqu'à 51 minutes. Une IRM (Imagerie par résonnance magnétique) cérébrale était effectuée pour vérifier l'absence de lésion cérébrale chez les sujets testés et l'étude était réalisée en double aveugle. Pendant l'exposition, les sujets étaient soumis à un test de mémoire simple pour minimiser les variations dans les rCBF (*regional cerebral blood flow*). Une diminution du rCBF dans la partie postéro-inférieure du cortex temporal et une augmentation bilatérale du rCBF au niveau du cortex préfrontal pendant l'exposition a été constatée, sans variation dans la réponse au test de mémoire. D'après les auteurs, les champs électromagnétiques peuvent modifier les flux sanguins cérébraux régionaux, mais les mécanismes cellulaires à l'origine de ces variations ne sont pas connus. Une fois de plus, l'échantillon testé est faible.

En résumé, il est difficile d'interpréter ces résultats qui sont en partie contradictoires et dont la signification ne peut être établie en l'absence de tests permettant de préciser les mécanismes (biologiques ou cognitifs) sous-jacents.

- Etudes sur la microcirculation cérébrale

Masuda *et al.* (2007a) ont utilisé une technique de fenêtre crânienne chez des rats afin d'observer *in vivo* la microcirculation cérébrale. Cette technique consiste à pratiquer une fenêtre dans le crâne, enlever la dure-mère et l'arachnoïde (deux premières méninges) pour arriver à la pie-mère qui recouvre le tissu nerveux. Il est ensuite possible de visualiser sous microscope les vaisseaux de la pie-mère (PM).

Les auteurs ont réalisé une exposition aiguë de 10 minutes (TDMA à 1 439 MHz) à un DAS cérébral de 0,6, 2,4 et 4,8 W/kg chez des rats *Sprague-Dawley* mâles âgés de 10 à 11 semaines après avoir effectué un fenêtre crânienne (au niveau de la région pariétale) de 10 mm de diamètre. Ils ont évalué 4 paramètres de la microcirculation : i) la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique (BHE) par l'étude de l'extravasation de la fluorescéine sodée et accumulation extravasculaire de dextran-FITC, ii) l'adhérence leucocytaire par étude de l'interaction de leucocytes marqués à la rhodamine avec l'endothélium des vaisseaux de la PM, iii) la vélocité plasmatique par l'évaluation de la vélocité de microsphères dans les veinules de la PM et iv) le diamètre des vaisseaux de la PM. Concernant la BHE, aucune fuite de la fluorescéine sodée dans la pie-mère n'a été observée, et la diminution de l'intensité du FITC-dextran enregistrée était comparable à celle de rats non exposés. Pour l'adhérence leucocytaire, aucune différence entre les mesures réalisées avant et après exposition n'a été mise en évidence. Au point de vue hémodynamique, aucune différence significative dans la vélocité du plasma n'a été trouvée et le diamètre des vaisseaux restait inchangé. Les auteurs ont par ailleurs noté une augmentation de la température significative à un DAS cérébral de 4,8 W/kg. Ils concluent qu'aucune variation de la microcirculation cérébrale n'est visible après une exposition aiguë dans leurs conditions d'expérimentation. Cette étude intéressante souffre d'un manque de données expérimentales (témoins, nombre de rats par condition, *etc*.).

Les mêmes auteurs, Masuda *et al.* (2007b), ont suivi la même méthodologie pour réaliser une exposition sub-chronique (60 minutes / jour et 5 jours / semaine pendant 4 semaines, DAS cérébral de 2,4 W/kg). La période de 4 semaines a été choisie car elle correspond à une absence d'effet de la fenêtre crânienne. Les rats ont été divisés en 3 groupes de 10 rats : exposés, *shams* et contrôles cage. Trois paramètres de la microcirculation ont été étudiés par les mêmes techniques que précédemment : perméabilité de la BHE, adhérence leucocytaire et vélocité plasmatique. Aucune différence dans les 3 paramètres examinés n'a été observée en comparant les différents groupes entre eux. D'après les auteurs, une exposition sub-chronique n'a pas d'effet sur la microcirculation cérébrale. Cette étude, tout comme la précédente, nécessiterait une étude dosimétrique qui validerait les résultats présentés. Les données expérimentales sont plus complètes que dans l'étude précédente.

Etude sur l'induction de crises comitiales sur des rats :

Lopez-Martin et al (2006) ont injecté de la picrotoxine, inhibiteur des récepteurs GABA, à des rats. Ce traitement induit des crises comitiales ou rend les rats plus sensibles à des agents convulsivants. Ils ont constitué 4 groupes de 7 à 8 rats : groupe 1 : exposé RF + picrotoxine; groupe 2 : picrotoxine seule; groupe 3 : exposé RF; groupe 4 : témoin. L'exposition a été réalisée à 900 MHz pendant 2h, avec un DAS moyen estimé à 0,15 - 0,24 W/kg, et un DAS dans le cerveau à 0,27 - 0,42 W/kg. Un électroencéphalogramme (EEG) et un marquage de c-fos (marqueur d'activité nerveuse) sur coupes histologiques ont été effectués. Les rats traités à la picrotoxine et exposés aux radiofréquences convulsent plus que les rats traités seulement à la picrotoxine, et ont un marquage augmenté de c-fos dans certaines zones cérébrales. Les auteurs concluent que les radiofréquences peuvent induire des crises comitiales chez des rats prédisposés. Plusieurs lacunes méthodologiques doivent être notées dans cette étude : la méthode de calcul dosimétrique n'est pas décrite, l'étude n'a – *a priori* - pas été réalisée en aveugle et aucun contrôle de température n'a été effectué. Ceci remet en cause la validité des résultats présentés, d'autant plus qu'une hyperthermie peut induire les effets observés et qu'il peut se produire une interférence entre les ondes et les électrodes induisant un échauffement local.

Etudes sur les cellules cérébrales

Le système nerveux est constitué de deux types de cellules, les neurones et les cellules gliales qui sont largement majoritaires dans le cerveau. L'ensemble des cellules gliales constitue la glie. Les cellules gliales peuvent se diviser et se reproduire par mitose. Elles jouent un rôle primordial en assurant l'isolation des tissus nerveux, les fonctions métaboliques, le soutien squelettique et la protection vis-à-vis des corps étrangers en cas de lésions.

Parmi ces cellules gliales, les astrocytes sont très importants, car après une lésion cérébrale se produit une activation des astrocytes, réversible si la lésion est minime. Les astrocytes contiennent une protéine spécifique : la GFAP (*Glial Fibrillary Acidic Protein*) qui fait partie du cytosquelette et peut être marquée par des anticorps spécifiques.

Thorlin *et al.* (2006) ont effectué une étude *in vitro* très complète. Des cultures primaires de cellules astrogliales et microgliales provenant de rats *Sprague-Dawley* nouveaux-nés ont été exposées à des ondes de 900 MHz soit GSM (4, 8 et 24 h, DAS de 3 W/kg) et CW (24 h, DAS de 27 W/kg) pour les cellules astrogliales, soit uniquement GSM (8 h, DAS de 3 W/kg) pour les cellules microgliales. Le système d'exposition est bien décrit avec dosimétrie et contrôle de la température par sonde Luxtron. Les auteurs ont réalisé une étude en aveugle de la morphologie cellulaire (microscopie optique), une étude en immunocytochimie avec marquage à la GFAP (marqueur des astrocytes) et à l'ED1 (marqueur des macrophages), des mesures de la GFAP, du Tnfa (*tumor necrosis factor alpha*) et de l'I16 (cytokine cérébrale) par méthode ELISA, une analyse en *Western Blot* ainsi qu'une détermination de

la concentration des protéines. Des contrôles positifs à la chaleur (42°C et 38°C) et traités au LPS pour l'étude des cytokines ont également été réalisés. Aucune variation de la composition cellulaire et de la morphologie n'a été mise en évidence dans les cultures enrichies en cellules astrogliales après exposition, contrairement aux contrôles positifs, ni de variation de la morphologie des cellules microgliales après exposition. Le relargage des cytokines cérébrales s'est révélé comparable à celui des témoins, même à un DAS de 27 W/kg. Aucune variation dans les taux de GFAP intracellulaires et les taux de GFAP relarguée dans le milieu n'a été constatée pour les cellules astrogliales. Les taux de protéines totales quelles que soient les conditions d'exposition (allant jusqu'à 54 W/kg) sont restés comparables à ceux des contrôles pour les cellules astrogliales. Aucune augmentation du relargage de Tnfa et d'I16, ni variation d'expression de l'antigène ED1, ou des taux de protéines totales n'a été observée pour les cultures microgliales. Cette étude est intéressante, car des DAS très élevés allant jusqu'à 54 W/kg ont été utilisés sans entraîner d'effet au niveau cellulaire.

Brillaud *et al.* (2007) ont exposé 48 rats *Sprague-Dawley* à des ondes GSM 900 (15 minutes, DAS de 6 W/kg). six groupes de rats ont été constitués : 4 groupes d'exposés (sacrifiés respectivement 2, 3, 6 ou 10 jours après l'exposition) et 2 groupes de *shams* (sacrifiés respectivement 3 et 10 jours après l'exposition, appelés S3 et S10), ainsi que 2 groupes contrôles : contrôles négatifs cage (NC) et contrôles positifs après injection de LipoPolySaccharide (LPS). La température locale était enregistrée grâce à une sonde *Luxtron* en fibres optiques. Un immunomarquage de la GFAP et une analyse microscopique avec évaluation du seuil de densité optique ont ensuite été réalisés. Aucune différence de température dans le seuil de densité optique n'a été constatée. Les témoins positifs ont montré un marquage augmenté. Pour les rats exposés, le marquage s'est révélé augmenté dans le cortex frontal 2 jours après l'exposition, comparé aux NC ou aux S3 et S10. L'augmentation persistait, bien que moins importante à 3 jours, mais aucun effet n'était visible 6 et 10 jours après l'exposition. Concernant le noyau caudé, des résultats similaires ont été observés. Pour le globus pallidum, une tendance à l'augmentation a été notée, mais sans significativité. Dans le gyrus dentelé, une diminution du marquage, significative uniquement lorsqu'elle est comparée à S3 (et non à S10 et NC) a été constatée, alors qu'une augmentation était visible dans le cortex cérébelleux à J3 significative lorsqu'elle est comparée à S10 (mais non à S3). Des effets positifs avec une augmentation transitoire du marquage astrocytaire ont donc été mis en évidence, mais l'exposition a été effectuée à un DAS élevé (6 W/kg), bien au-delà des valeurs limites d'exposition actuelles.

La même équipe a ensuite réalisé une exposition chronique, toujours pour étudier la glie (Ammari *et al.*, 2007). Vingt-quatre rats *Sprague-Dawley* ont été séparés en 4 groupes de 6 rats : un groupe contrôle cage (CC), un groupe *sham* (S), un groupe exposé à 1,5 W/kg (E1,5), et un groupe exposé à 6 W/kg (E6). L'exposition chronique s'est déroulée pendant 24 semaines, à raison de 2 h par jour, 5 jours par semaine (GSM 900). Les rats ont été sacrifiés 10 jours après l'exposition. Une étude en immunohistochimie a permis la détection de la GFAP, suivie d'une analyse microscopique avec évaluation du seuil de densité optique. Aucune différence dans le seuil de densité optique pour lire les lames n'a été constatée. Concernant le marquage de la GFAP, une augmentation pour le groupe E6 comparé aux groupes S et CC (non différents entre eux) a été mise en évidence, significative dans le cortex préfrontal et dans le gyrus dentelé. Dans le putamen et le globus pallidum, une augmentation du marquage était visible dans le groupe E6 comparé à S, et devenait significative si elle était comparée à CC. Dans tous les cas, aucune différence n'était observée pour le groupe E1,5. De même, aucun d'effet n'a été observé au niveau du cortex cérébelleux, que ce soit pour le groupe E1,5 ou pour le groupe E6. D'après les auteurs, une exposition chronique à faible dose (DAS de 1,5 W/kg) ne provoque pas de lésions dans le cerveau. Au contraire une exposition à forte dose (DAS de 6 W/kg) induit une gliose réactionnelle dans le cerveau de rat, 10 jours après l'exposition. Cette étude est

intéressante, car elle reproduit une exposition chronique chez le rat en montrant que les effets observés dépendent de la dose reçue.

Kim *et al.* (2008) ont exposé 120 souris C57BL âgées de 6 semaines également réparties entre les deux sexes de manière chronique (1 h / jour, 5 j / semaine, pendant 6 ou 12 mois) à un signal CDMA de 849 MHz et 1 763 MHz (DAS de 7,8 W/kg au niveau du cerveau). Les souris étaient réparties en 6 groupes de 20 souris de chaque sexe pour exposition *sham*, expositions à 849 MHz et à 1 763 MHz. Dix souris de chaque groupe étaient sacrifiées à 6 mois d'exposition. Une analyse immunohistochimique (anticorps antiPCNA : marqueur de la prolifération, antiGFAP : marqueur des astrocytes, et antiNeuN : marqueur des neurones) était effectuée, ainsi que la technique du TUNEL pour déterminer l'apoptose. Aucune variation de poids n'a été objectivée entre les différents groupes. L'observation microscopique de l'hippocampe et du cervelet n'a pas mis en évidence de différence entre les groupes, quel que soit le marqueur considéré, à 6 mois et à 12 mois. Les auteurs concluent qu'une exposition chronique à des radiofréquences n'induit pas de prolifération cellulaire, d'apoptose et de gliose réactionnelle sur des cerveaux de souris jeunes en développement.

Etudes sur les canaux ioniques neuronaux

Les neurones sont des cellules excitables et produisent un potentiel d'action le plus souvent à la suite d'un *stimulus* chimique. Ce potentiel d'action (PA) se propage le long de l'axone et entraîne le relargage d'un neuromédiateur au niveau des terminaisons nerveuses. Le PA résulte de l'ouverture de canaux ioniques. Il est donc important de savoir si la physiologie des canaux ioniques est altérée ou non en réponse à une exposition.

Marchionni *et al.* (2006) ont comparé les effets de 2 types de signaux (extrêmement basses fréquences et radiofréquences) sur des cultures de neurones ganglionnaires provenant de ganglions dorsaux de rats adultes. L'exposition aux radiofréquences a été réalisée en GSM 900 (CW, DAS de 1 W/kg) pendant 30 minutes. Une étude électrophysiologique a ensuite été effectuée, par des techniques d'enregistrement de courants ioniques et de canal simple (calcique ou potassique) par *patch-clamp*. Les radiofréquences n'ont entraîné aucune modification dans les résultats électrophysiologiques, contrairement aux extrêmement basses fréquences. Les auteurs concluent que les radiofréquences n'interfèrent pas, directement ou indirectement, avec la perméabilité membranaire ionique.

Platano *et al.* (2007) ont exposé des cultures primaires de neurones provenant d'embryons de rats *Sprague-Dawley* à des ondes CW et GSM (900 MHz) à un DAS de 2 W/kg de manière intermittente (3 périodes de 90 s.). Une technique de *patch-clamp* pour étudier les canaux ioniques dépendants de la tension (VGCC pour *voltage-gated calcium channels*) a été réalisée, et des ions Ba^{2+} ont été utilisés comme ions porteurs pour éviter l'inactivation des courants ioniques dépendante des ions Ca^{2+}. Aucune variation significative de l'amplitude et de la dépendance à la tension des I_{Ba}^{2+} (courants ioniques du Ba^{2+}) après exposition aux ondes CW et aux ondes GSM n'a été constatée. D'après les auteurs, les VGCC ne sont pas affectés par les ondes CW et GSM dans leurs conditions expérimentales.

Etude sur les activités enzymatiques

- activité de la protéine kinase C

La protéine kinase C, connue sous le nom de PKC, est une famille d'enzymes impliquées dans le contrôle des fonctions d'autres protéines. Elles agissent par la phosphorylation de groupes hydroxyles de ces protéines. Les PKC sont activées par des signaux tels que l'augmentation du taux de diacylglycérol. Elles jouent un rôle important dans plusieurs cascades de transduction du signal.

Paulraj et Behari (2006b) ont mesuré l'activité de la PKC grâce à l'ATP marqué au P(32) sur des cerveaux de 6 rats âgés de 35 jours exposés 2 h / jour pendant 35 jours à des ondes de fréquence 2,45 GHz (de type non précisé). 6 autres rats ont été exposés en *sham*. L'activité de la PKC a été mesurée de 3 façons : i) dans tout le cerveau, ii) uniquement dans hippocampe, iii) dans le cerveau moins l'hippocampe. Les auteurs ont mis en évidence une diminution significative de l'activité de la PKC dans l'hippocampe si cette activité est comparée à celle du reste du cerveau et à celle du groupe contrôle, ainsi qu'une diminution dans le cerveau total (rats exposés *versus* rats-exposés *sham*). En revanche, aucune diminution significative de l'activité de la PKC n'a été observée dans le cerveau sans l'hippocampe. A l'analyse morphologique, une augmentation de la population gliale au niveau du cortex cérébral dans le groupe exposé a été constatée. Les résultats sont peu explicables concernant l'activité de la PKC, étant donné que l'hippocampe occupe une faible portion du volume cérébral et qu'à lui seul il ne peut expliquer une baisse significative de l'activité cérébrale, alors que le reste du cerveau aurait une activité non diminuée. De plus, l'article manque de données importantes (comme le type d'ondes émises) et ne fournit pas de dosimétrie.

- activité acétylcholinestérasique

L'acétylcholinestérase est une enzyme qui dégrade l'acétylcholine, neurotransmetteur important du SN.

Barteri *et al.* (2005) ont préparé une solution aqueuse d'acétylcholinestérase (EeAChE) purifiée qu'ils ont exposée de 1 minute à 50 minutes à un téléphone mobile. En s'appuyant sur différentes techniques élaborées (HPLC pour chromatographie liquide haute performance, mesure de l'activité cinétique de l'enzyme, spectroscopie par dichroisme circulaire, microscopie électronique, *etc*.), ils trouvent qu'une exposition de 1 à 10 min n'entraîne pas de variation dans le profil chromatographique, alors qu'à partir de 20 minutes d'exposition, des variations sont obtenues avec apparition d'un pic correspondant à la forme monomérique de l'enzyme. Cette monomérisation serait irréversible, puisqu'elle est toujours présente après 1 jour de stockage à température ambiante. De plus, jusqu'à 10 minutes d'exposition, des valeurs similaires de l'activité cinétique de l'enzyme sont retrouvées, avec une augmentation des paramètres cinétiques au-delà. Une orientation des molécules est observée en microscopie électronique. Malgré une technicité employée importante, cet article ne peut être retenu, dans la mesure où l'exposition est effectuée à l'aide d'un téléphone mobile pour « reproduire les effets sur l'humain », alors même que l'acétylcholinestérase se trouve en solution dans un tube à essai, ce qui ne reproduit pas la physiologie humaine.

Etude sur la transmission synaptique

Les synapses sont situées à la jonction entre deux neurones, ou à la jonction entre des neurones et leurs organes cibles. Elles fonctionnent par la libération d'un neurotransmetteur (NT) qui va aller se fixer au niveau d'un récepteur spécifique de la membrane *post*-synaptique située au niveau du deuxième neurone ou au niveau de l'organe cible. La fixation du NT à son récepteur va entraîner la formation d'un potentiel *post*-synaptique. Plusieurs types de neurotransmetteurs sont connus : les NT inhibiteurs et les NT excitateurs. Parmi ces derniers, l'un est particulièrement abondant au niveau du cerveau et notamment dans l'hippocampe : il s'agit du glutamate. Ce glutamate va se fixer sur plusieurs types de récepteurs, dont les récepteurs AMPA (acide alpha-amino-3-hydroxy-5-methyl-4-soxazole propionique) et NMDA (*N*-methyl-*D*-aspartate).

Xu *et al.* (2006) ont réalisé des cultures primaires de neurones hippocampiques provenant de rats *Sprague-Dawley* âgés de 1 jour. Ils les ont exposées 15 min / jour de J 7 à J 14 *in vitro* à un signal GSM de 1 800 MHz à un DAS évalué à 2,4 W/kg. Ils ont étudié les AMPA mEPSCs (*miniature excitatory postsynaptic currents* ou *minis*) et les NMDA mEPSCs par

des techniques de *patch-clamp*. Ils ont également réalisé des marquages des récepteurs GluR1, Glu R2/3, NR1a, NR2B et NR2A (récepteurs AMPA et NMDA) par des anticorps (Ac) spécifiques, ainsi qu'un marquage avec l'Ac PSD95 (anti-densité post-synaptique). Ils ont constaté une diminution des AMPA *minis* dans les neurones exposés, mais sans variation des NMDA *minis* (*ratio* NMDA/AMPA *minis* augmenté) et sans changement dans la densité des récepteurs AMPA et NMDA. Ces résultats étaient associés à une diminution de la densité de marquage des PSD95 sur les dendrites des neurones exposés aux radiofréquences. Les auteurs concluent que les GSM 1800 peuvent diminuer la transmission synaptique excitatrice et le nombre de synapses excitatrices dans des neurones cultivés d'hippocampe. Cependant, aucune information sur la dosimétrie n'est fournie par les auteurs.

En résumé, sur les 15 articles étudiés portent sur les effets cérébraux autres que cognitifs :

- Concernant les études *in vitro*, aucune variation de la morphologie et de la physiologie de cellules astrogliales et microgliales en culture n'a été obtenue avec des durées d'expositions allant jusqu'à 24 h et des valeurs de DAS atteignant 54 W/kg (Thorlin et *al*., 2006). Les études portant sur les flux ioniques ne mettent pas en évidence de variation après exposition aiguë (Marchionni et *al*., 2006, Platano *et al*., 2007). En revanche, une diminution de la transmission synaptique excitatrice a été retrouvée sur des cultures de neurones hippocampiques (Xu et al, 2006), mais la dosimétrie n'était pas fournie par les auteurs. Une dernière étude ne peut être retenue (Barteri et *al*., 2005) : une solution aqueuse d'acétylcholinestérase dans un tube à essai a été exposée à un téléphone mobile pour « reproduire les effets sur l'humain ».

- Selon les études réalisées chez l'animal, aucune altération de la microcirculation cérébrale n'a été mise en évidence chez le rat après exposition aux radiofréquences (Masuda *et al.*, 2007a ; Masuda *et al.*, 2007b). Une gliose réactionnelle transitoire a été observée sur des cerveaux de rat après une exposition aiguë à des ondes à 6 W/kg bien au delà des limites d'expositions réglementaires (Brillaud *et al.*, 2007). Cette gliose a été retrouvée par la même équipe après une exposition chronique à 6 W/kg, mais pas à 1,5 W/kg (Ammari *et al.*, 2007). Chez la souris, une exposition chronique à un DAS de 7,8 W/kg (au niveau du cerveau) n'a pas entraîné de lésion histologique majeure, c'est-à-dire pas d'altération tissulaire (Kim *et al.*, 2008). Une diminution de la PKC (Protéine Kinase C) associée à une augmentation de la population gliale a été observée dans l'hippocampe de rat après exposition chronique (Paulraj et Behari, 2006b). Le DAS indiqué dans cette étude était de 0,11 W/kg, mais aucune information sur la méthodologie de la dosimétrie ne permet de le valider. De la même façon, Lopez-Martin *et al.* (2006) ont conclu d'après leur étude que des rats prédisposés à des crises comitiales convulsaient plus lors d'une exposition aux radiofréquences. Là encore, aucun calcul de dosimétrie n'était fourni par les auteurs, ni de contrôle de température, avec possibilité d'interférences entre les ondes et les électrodes à l'origine d'un échauffement local. Ces lacunes méthodologiques sont majeures dans la mesure où une augmentation de température peut provoquer les effets décrits par les auteurs.

- Les études conduites sur l'humain ne montrent pas d'effet des radiofréquences sur le métabolisme cérébral après examen par une technique de spectrométrie par résonance magnétique du proton sur 36 sujets (Khiat *et al.*, 2006). Cependant, après exposition, le débit sanguin régional varie dans 2 études pour lesquelles les analyses sont réalisées par une autre technique non invasive (PET-scan), chacune sur 12 volontaires (Huber *et al.*, 2005 ; Aalto *et al.*, 2006). Ces variations ne sont pas importantes et sont de l'ordre de celles observées lors du fonctionnement « normal » du cerveau. Il est donc difficile de conclure. Néanmoins, ces techniques nécessitent un savoir-faire peu courant et sont trop coûteuses pour être utilisées à grande échelle. Les variations observées restent dans des limites physiologiques. Il serait éventuellement intéressant de les répliquer sur un nombre plus

élevé de sujets en associant des tests cognitifs pour éviter les biais.

En conclusion, il ne semble pas exister d'effet délétère sur le cerveau pour des DAS inférieurs à 2 W/kg, que ce soit à l'échelle des cellules du système nerveux, à l'échelle du tissu nerveux ou au niveau du métabolisme cérébral au vu des études présentant une méthodologie correcte. Cependant, des variations de flux sanguins cérébraux régionaux ont été mises en évidence par des techniques d'imagerie non invasives. Bien que ces variations ne soient pas importantes et soient observées dans le fonctionnement « normal » du cerveau, il serait intéressant de répliquer les études sur un plus grand nombre de sujets en associant des tests cognitifs pour éviter les biais.

4.4.1.8 Effets sur le développement

Il est important de savoir si l'exposition aux ondes électromagnétiques radiofréquences peut induire des altérations dans les organismes en développement, dans la mesure où ceux-ci sont généralement plus sensibles aux agents toxiques. La période développementale dure en pratique jusqu'à ce que le sujet ait atteint l'âge adulte. Les effets peuvent se produire *in utero* et avoir une répercussion sur le devenir de la grossesse et/ou de l'enfant à naître, ou bien se produire après la naissance et retentir sur le fonctionnement d'organes non matures et/ou sur le comportement psychomoteur des enfants et/ou adolescents. Les études peuvent donc être effectuées à différents moments du développement : embryons ou fœtus, nouveaux-nés, nourrissons, enfants et adolescents. Ces derniers sont particulièrement intéressants à explorer, dans la mesure où en France comme dans les autres pays, l'usage des téléphones mobiles est très répandu chez les adolescents. Ceux-ci représentent une population très exposée où les effets pourraient être sensiblement différents de ceux constatés chez les adultes.

Un total de 22 articles se rapporte à cette thématique dont 5 sont des revues publiées sur ce thème (Feychting *et al.*, 2005 ; Martens, 2005 ; Blackman, 2006 ; Otto *et al.*, 2007 ; Leitgeb *et al.*, 2008). Un article a été écrit en russe (Grigor'ev Iu G, 2005). Pour les 16 articles restants, l'exposition a été réalisée soit *in vivo* le plus souvent sur des rats (Kuribayashi *et al.*, 2005 ; Ferreira *et al.*, 2006a, Finnie *et al.*, 2006b ; Kumlin *et al.*, 2007, Ogawa *et al.*, 2009, Orendacova *et al.*, 2009), sur des souris (Finnie *et al.*, 2006, Saran *et al.*, 2007, Sommer *et al.*, 2009), sur des lapins (Budak *et al.*, 2009), sur des œufs de poule (Batellier *et al.*, 2008), ou chez l'humain : chez des adolescents (Haarala *et al.*, 2005 ; Preece *et al.*, 2005 ; Krause *et al.*, 2006), chez des enfants (Divan *et al.* 2008), ou chez des femmes enceintes (Rezk *et al.*, 2008).

Etudes réalisées sur les rats

Kuribayashi *et al.* (2005) ont exposé des rats âgés de 4 ou 10 semaines pendant une ou deux semaines à un signal de 1 439 MHz (TDMA) afin d'étudier les effets sur la barrière hémato-encéphalique (BHE). Les données dosimétriques fournies sont satisfaisantes. Les différentes techniques utilisées (administration de FITC-dextran avant le sacrifice et observation des coupes de cerveau au microscope à fluorescence, analyse immunohistochimique de plusieurs protéines, RT-PCR quantitative) n'ont pas montré d'effet sur la BHE, contrairement au contrôle positif (injection de 1,3-dinitrobenzène). Les auteurs concluent que l'exposition aux ondes électromagnétiques à 1 439 MHz n'a pas d'effet délétère sur la BHE chez des rats jeunes ou immatures.

Dans l'étude de Ferreira *et al.* (2006), des rates gestantes ont été exposées à des ondes émises par un téléphone mobile pendant 8 h 30 par jour pendant toute la durée de leur

gestation. Le test des micronoyaux a été effectué sur les érythrocytes des rats nouveaux-nés et des paramètres oxydatifs ont été évalués dans le foie et le plasma. Une augmentation de la fréquence des micronoyaux dans les érythrocytes de nouveaux-nés provenant de rates gestantes exposées a été observée, sans différence dans les paramètres oxydatifs. Les auteurs concluent qu'un effet génotoxique sur le tissu hématopoiétique pendant l'embryogenèse est possible. Cependant, il faut noter l'absence de données dosimétriques.

Dans l'étude de Kumlin *et al.* (2007), des rats *Wistar* âgés de 21 jours ont été exposés pendant 5 semaines consécutives (2 h / jour et 5 jours / semaine) à des GSM 900 (DAS de 0,3 et 3 W/kg). Une étude immunohistochimique cérébrale a ensuite été réalisée, parallèlement à des tests de comportement connus pour être révélateurs de changements de comportement neurologique après exposition à des toxiques *post*-natals. Aucune différence de poids entre rats exposés ou non n'est retrouvée. L'étude histologique ne met pas en évidence d'effet sur la morphologie cérébrale générale, sur le nombre de neurones morts ou nouvellement formés (gyrus denté de l'hippocampe), ni d'altération de la BHE. En revanche, une amélioration de l'apprentissage et de la mémoire est mise en évidence par les tests de comportement chez les rats exposés aux radiofréquences.

Une étude récente a porté sur la neurogenèse *post*-natale (Orendacova *et al.*, 2009). La neurogenèse (ou production de nouveaux neurones) débute dans la zone sous-ventriculaire et les neurones migrent vers le bulbe olfactif grâce à une voie de migration appelée voie rostrale de migration. Les auteurs ont exposé 2 groupes de rats *Wistar* (nouveaux-nés âgés de 7 jours, ou adultes âgés de 24 mois) à des ondes émises par un four à micro-ondes avec 2 types d'exposition : "aiguë" (4 h/jour pendant 4 jours) et "chronique" (8 h / jour pendant 3 jours). Ils ont ensuite réalisé un marquage des cellules au BrdU qui est un agent qui s'incorpore dans les cellules en division et ont étudié la voie rostrale de migration. Les témoins étaient des animaux de même âge non exposés. Une augmentation du nombre de cellules BrdU positives dans la voie rostrale de migration après irradiation aiguë et une diminution après irradiation chronique chez les rats nouveaux-nés ont été mises en évidence, sans variation chez les rats adultes. Les auteurs concluent qu'une exposition aux champs électromagnétiques peut altérer la neurogenèse post-natale précoce. On peut souligner ici l'utilisation d'un four à micro-ondes comme système d'exposition, l'absence de contrôle de température et des témoins inadaptés.

Ogawa *et al.* (2009) ont exposé des rates gestantes âgées de 10 semaines pendant 90 minutes par jour (J 7 à J 17 de gestation) à un signal W-CDMA (1,95 GHz, DAS de 0,67 W/kg et de 2 W/kg) dans une chambre d'exposition comportant une antenne centrale. 4 groupes de 5 rates ont été constitués : contrôles, *sham*s, exposition basse (DAS de 0,67 W/kg), exposition haute (DAS de 2 W/kg). Un total de 4 expérimentations a été effectué par condition (donc 20 rates par groupe). Les rates ont été sacrifiées à 20 jours de gestation. Concernant les résultats chez les mères : il n'a pas été retrouvé de différence dans la croissance entre les 4 groupes, ni d'augmentation du nombre d'anomalies macroscopiques, ni de différence dans le nombre de corps jaunes, ou le nombre d'implantations et de morts fœtales. Chez les fœtus, aucune différence dans le nombre de foetus vivants, le sexe *ratio*, les poids foetaux, le poids placentaire, le taux d'anomalies externes et le taux d'anomalies viscérales et squelettiques n'a été mise en évidence.

<u>Etudes réalisées sur des souris</u>

Finnie *et al.* (2006a) ont exposé des souris gestantes pendant toute la période de gestation (de J 1 à J 19) à un signal GSM (900 MHz, DAS de 4 W/kg). Des contrôles *shams*, des contrôles positifs (cadmium) et des « contrôles cages » ont été effectués. Les fœtus étaient sacrifiés à J 19. Une étude immunohistochimique de l'albumine endogène a été réalisée afin de vérifier l'intégrité de la barrière hémato-encéphalique. Aucune extravasation d'albumine

dans le cortex cérébral, le thalamus, les ganglions de la base, le cervelet, l'hippocampe, le diencéphale et la moelle épinière n'a été constatée.

Finnie *et al.* (2006b) n'ont pas observé non plus d'extravasation de l'albumine chez des souriceaux nouveaux-nés exposés à 4 W/kg à un signal GSM 900, 60 min / jour pendant les 7 premiers jours après la naissance. Les animaux sont répartis en 4 groupes de 10 : exposés, *sham*s, contrôles cage et contrôles positif (injection de cadmuim chloride). Les conditions expérimentales sont présentées succinctement car il s'agit d'une lettre, le système d'exposition et la dosimétrie ne sont pas décrits. Ces mêmes auteurs n'avaient pas trouvé d'effet dans les mêmes conditions d'exposition sur des cerveaux de fœtus de souris exposés durant toute la gestation. Cette étude est également traitée dans le chapitre 4.4.1.7.

Les souris utilisées dans l'étude de Saran *et al.* (2007) sont des souriceaux nouveaux-nés *Patched1 (Ptcl$^{+/-}$)*. Ce type de souris prédisposées aux tumeurs a la particularité de montrer une hypersensibilité aux radiations ionisantes et de développer des tumeurs dans plusieurs organes (notamment cervelet et peau) après exposition à ces radiations. Au total 200 souriceaux *Ptcl$^{+/-}$* et 200 souriceaux non mutés (*wild type Ptcl$^{+/+}$)* ont été inclus dans cette étude et ont été exposés en double aveugle à un signal GSM de 900 MHz (DAS de 0,4 W/kg) après 2 et 6 jours de vie pendant 1 h. Une analyse histologique et une quantification des tumeurs ont été effectuées après la mort des souris. Quel que soit le type de souris, aucun effet de l'exposition n'a été constaté sur la survie, ou sur l'incidence et l'histopathologie des médulloblastomes cérébelleux, des cancers basocellulaires cutanés ou des rhabdomyosarcomes (ou tumeurs musculaires). Cette étude montre qu'une exposition en période néonatale à un signal GSM sur des animaux prédisposés à développer des cancers n'a pas eu de conséquences sur l'apparition de tumeurs ni sur la survie des nouveaux-nés.

Une autre étude récente réalisée en double aveugle (Sommer *et al.*, 2009) a porté sur l'exposition chronique (toute leur vie durant et 24 h / 24) de souris C57BL à un signal UMTS (1 966 MHz, DAS de 0, 0,08, 0,4 et 1,3 W/kg) sur 4 générations grâce à 8 guides d'ondes localisés dans une même pièce. Un rat mâle (128 au total à la 1ère génération) et 2 femelles (256 au total) étaient placés dans une même cage. Une femelle gestante sur 2 était sacrifiée pour examiner les foetus. Les résultats mettent en évidence une tendance à une moindre consommation de nourriture chez les exposés, mais sans différence dans la consommation d'eau. Aucun effet sur les paramètres de la fertilité chez les mâles (examen des testicules) et les femelles n'a été rapporté, notamment sur le nombre de fœtus 18 jours après l'accouplement. Le nombre de malformations foetales était comparable chez les exposés et les non-exposés. Concernant le développement et le comportement des souriceaux, aucune différence dans le poids, ni dans la date d'ouverture des yeux, ni dans le test de réflexe effectué, ni dans le taux de survie pendant la période de sevrage n'a été notée entre les 2 groupes de souris. Les auteurs concluent à une absence d'effet des ondes UMTS sur la reproduction et le développement des souris.

<u>Etude réalisée sur des lapins</u>

Budak *et al.* (2009) ont exposé 36 lapins blancs mâles New Zealand à un signal GSM de 1 800 MHz. Ils ont réalisé une exposition intra-utérine (15 min / jour de 15 à 22 jours de gestation) ou extra-utérine (15 min/jour pendant 14 jours à 1 mois de vie) et ont constitué 4 groupes de 9 lapins : 1): contrôles non exposés ; 2) : exposés à 1 mois de vie ; 3) : exposés en intra-utérin ; 4) : expositions intra et extra-utérines. Ils ont testé les produits de distorsion des otoémissions qui permettent le dépistage des surdités endocochléaires *(cf 4.4.1.10)*. Les auteurs ont mis en évidence une diminution d'amplitude des produits de distorsions après exposition extra-utérine, non retrouvée après exposition intra-utérine et concluent à un

éventuel rôle protecteur du liquide amniotique sur la fonction auditive *in utero*. On peut noter l'absence de dosimétrie, ainsi que l'absence de contrôles *shams*.

Etude réalisée sur des embryons de poulet

Dans l'étude de Batellier *et al.* (2008), des œufs de poule ont été exposés pendant toute la durée de leur incubation à un téléphone mobile en mode appel pendant une à 2 minutes, suivi d'une position inactivation également pendant une à 2 minutes, constituant ainsi des cycles de 3 minutes. Quatre groupes de 60 œufs chacun ont été constitués : 2 groupes témoins, 1 groupe exposé (position « *on* » du téléphone) et un groupe *sham* (position « *off* » du téléphone). Les expérimentations ont été répliquées 4 fois. Une augmentation de la mortalité a été observée chez les embryons exposés par rapport aux contrôles, mais non corrélée à l'intensité du champ électrique. On peut cependant noter que l'exposition aux ondes est générée par un téléphone mobile, qu'aucune donnée dosimétrique correcte n'est fournie et que l'augmentation de mortalité est également présente chez les *sham*s.

Etudes réalisées sur l'humain

Haarala *et al.* (2005) ont pratiqué des tests de cognition chez 32 adolescents âgés de 10 à 14 ans alors qu'ils étaient ou non exposés à des radiofréquences provenant d'un téléphone mobile. L'étude a été réalisée en double aveugle. Un contrôle de la température de la peau a été effectué chez 4 sujets. Huit tests expérimentaux ont été utilisés : 4 provenant du *CogniSpeed* et 4 tests de mémoire à court terme. Les résultats n'ont pas mis en évidence de différence dans le temps de réaction et l'exactitude des réponses. Les auteurs concluent qu'un téléphone mobile actif n'affecte pas à court terme les performances cognitives chez les adolescents âgés de 10 à 14 ans.

Dans l'étude de Preece *et al.* (2005), 18 adolescents âgés de 10 à 12 ans ont subi le test de cognition habituellement utilisé pour évaluer les effets des drogues (*Cognitive Drug Research*). Les sujets ont été exposés à un téléphone mobile (3 conditions: *off*, puissance maximale à 0,2 W ou à 2 W). Trois paramètres ont été évalués : le temps de réaction, l'exactitude des réponses et l'index de sensibilité. Les résultats ont montré une tendance en présence de GSM à une diminution du temps de réaction, une plus grande exactitude et une plus grande sensibilité, mais la différence n'est pas statistiquement significative.

Krause *et al.* (2006) ont réalisé des enregistrements électro-encéphalographiques sur 15 adolescents (6 garçons/9 filles) âgés de 10 à 14 ans soumis à des tests de mémoire auditive de 30 minutes. Un téléphone mobile était placé en regard de la région temporale postérieure gauche de ces adolescents et 2 séries de test étaient réalisées en double aveugle : position « *on* » ou « *off* » du téléphone. Des variations dans le tracé EEG sont notées dans les fréquences ~ 4-8 Hz et ~15 Hz chez les sujets exposés. Les auteurs concluent que les champs électromagnétiques émis par les téléphones mobiles ont des effets sur les réponses EEG pendant le processus cognitif. Aucune prise en considération de possibles interférences entre les électrodes et les radiofréquences n'est mentionnée.

Divan *et al.* (2008) ont étudié le lien entre la survenue de troubles du comportement chez des enfants de 7 ans et leurs expositions prénatale et post-natale aux radiofréquences des téléphones mobiles. Cette étude transversale a été conduite sur un sous-échantillon de plus de 13 000 mères issues de la *Danish National Birth Cohort* ayant été incluses entre 1997 et 1999. Les mères ont été contactées 7 ans après leur grossesse. Elles ont complété elles-mêmes, via internet, ou à défaut par courrier, un questionnaire comportant différentes informations dont le questionnaire *Strengths and Difficulties*. Il leur était aussi demandé de préciser l'utilisation d'un téléphone mobile pendant leur grossesse : durée d'utilisation par

jour, durée pendant laquelle le téléphone était laissé en veille, durée d'utilisation éventuelle d'un système mains-libres et lieu de stockage du téléphone mobile lorsque non utilisé. Elles devaient préciser l'utilisation éventuelle d'un téléphone mobile ou d'un téléphone sans fil par leur enfant. L'échantillon (N = 13 159) a été réparti en 4 groupes :

- enfants exposés à la fois en période pré et post-natale (N = 1421),
- enfants exposés uniquement en période prénatale (N = 1895),
- enfants exposés uniquement en période post-natale (N = 2281),
- enfants non-exposés (N = 6471),

et pour 1 091 enfants, les données d'exposition étaient manquantes ou incomplètes. La comparaison des caractéristiques des groupes a montré que les mères des enfants exposés à la fois en période pré et post-natale étaient d'un niveau socio-professionnel plus bas, plus souvent consommatrices de tabac pendant la grossesse et avaient rapporté plus d'antécédents de problèmes psychiatriques.

L'*odds ratio* pour les troubles du comportement généraux des enfants ayant été exposés à la fois en périodes pré et postnatale a été estimé à 1,80 par rapport aux enfants non-exposés, après ajustement sur les facteurs de confusion (sexe de l'enfant, âge de la mère, tabagisme pendant la grossesse, éventuels problèmes psychiatriques de la mère et niveau socio-professionnel).

Commentaires :

- 1) Concernant le mode de recueil de l'information, le fait que les troubles du comportement aient été appréciés par les mères, que l'exposition prénatale ait été estimée 7 ans après la grossesse, et que les questions évaluant les problèmes comportementaux et celles portant sur l'utilisation de téléphones mobiles aient été placées au sein d'un même questionnaire pourrait avoir entraîné des biais, même si les auteurs écartent cette possibilité.
- 2) Concernant l'analyse, malgré l'ajustement sur les facteurs de confusion recueillis, l'existence possible d'autres facteurs de confusion inconnus au moment de l'étude qui pourraient avoir un impact sur le comportement des enfants ne peut pas être éliminée. De ce fait, l'association trouvée pourrait être non causale mais le reflet d'un tiers-facteur non étudié. Toutefois, un certain nombre de garanties pourrait permettre d'aboutir à une quasi-certitude concernant la causalité :
    - 1) la force de l'association : plus le lien entre le facteur et la maladie est forte, plus il est difficile d'imaginer qu'un facteur de confusion inconnu puisse l'expliquer, ce qui n'est pas le cas dans cette étude.
    - 2) l'existence d'une relation dose-effet. Les auteurs se sont effectivement attachés à rechercher une éventuelle relation dose-effet concernant l'exposition prénatale en ajustant sur les mêmes facteurs que précédemment, avec et sans ajustement sur l'exposition post-natale, mais les tests de tendance étaient tous non significatifs.
- 3) la reproductibilité de l'association : si la relation est retrouvée dans différentes populations et différentes conditions. Il est, en effet, important de souligner qu'une étude observationnelle comme celle rapportée ici ne peut qu'exceptionnellement, à elle seule, affirmer l'existence d'une relation causale entre un facteur (ici, les expositions prénatale et post-natale aux radiofréquences des téléphones mobiles) et un état de santé (ici, les troubles du comportement des enfants).

Il est donc indispensable, comme le proposent d'ailleurs les auteurs dans leur conclusion, de conduire de nouvelles études sur le même thème, si possible de façon longitudinale, et sur différentes populations.

Rezk *et al.* (2008) ont mesuré le rythme et le débit cardiaques fœtaux et néonataux après exposition de la mère pendant 10 minutes à un téléphone mobile. Trois groupes de 30 femmes enceintes (groupes I à III) et 1 groupe de 30 nouveaux-nés (groupe IV) ont été étudiés. Pour le groupe I, l'âge gestationnel était de 25-30 semaines, pour le groupe II de 31-35 semaines, et pour le III de 36-40 semaines. Une augmentation du rythme cardiaque fœtal et néonatal, associée à une diminution du débit a été mise en évidence, avec des variations atténuées avec l'augmentation de l'âge gestationnel. Il faut noter l'absence de dosimétrie, l'absence de réalisation en aveugle et surtout l'absence de contrôles « *shams* » (c'est-à-dire des femmes enceintes exposées à un téléphone mobile en mode « *off* »). Ceci rend les résultats obtenus totalement ininterprétables, car de nombreux autres facteurs peuvent faire varier le rythme et le débit cardiaques : mouvement de la mère pour se saisir du téléphone, position modifiée, *etc*.

En résumé, 7 études montrent des effets au cours du développement, soit :

- sur le tissu hématopoiétique *in utero* chez des rats (Ferreira *et al.*, 2006), mais le système d'exposition était inadapté pour ce type d'étude (téléphone mobile) ;
- sur la neurogenèse post-natale précoce chez le rat (Orendacova *et al.*, 2009), mais le système d'exposition était un four à micro-ondes sans contrôle de température ;
- sur la mortalité d'embryons de poulet (Batellier *et al.*, 2008), mais l'étude manque de données dosimétriques et a utilisé un téléphone mobile comme système d'exposition. On peut noter que le taux de mortalité augmente dans les œufs exposés, mais également dans les « *shams* », ce qui est difficilement interprétable ;
- sur la fonction cochléaire de lapins âgés de 1 mois (Budak *et al.*, 2009), mais il faut noter l'absence de dosimétrie et de contrôles « *shams* » ;
- sur le tracé EEG chez des adolescents pour Krause *et al.* (2006), mais une possible interférence entre les radiofréquences et les électrodes n'a pas été prise en compte ;.
- sur le comportement d'enfants exposés durant les périodes pré- et post-natales avec une hyperactivité (Divan *et al.*, 2008), mais l'étude comporte des biais méthodologiques dans le recueil des données et des biais dans l'interprétation des résultats ;
- sur le rythme cardiaque fœtal et néonatal, associée à une diminution du débit cardiaque chez des fœtus humains dont la mère était exposée à un téléphone mobile (Rezk *et al.*, 2008). Les résultats ne peuvent être pris en compte du fait d'une méthodologie inadaptée (absence de témoins).

En revanche, aucun effet délétère n'a été constaté dans les 9 autres études. Ainsi aucune anomalie de la barrière hémato-encéphalique n'a été mise en évidence chez de jeunes rats exposés (Kuribayashi *et al.*, 2005 ; Kumlin *et al.*, 2007) ni chez les fœtus de souris issues de mères exposées (Finnie *et al.*, 2006a) ou chez des souriceaux nouveaux-nés exposés (Finnie *et al.*, 2006b). Aucun effet sur l'apparition de tumeurs chez des souris prédisposées n'a été observé (Saran *et al.*, 2007). Aucune anomalie du développement n'a été constatée chez des fœtus issus soit de rates gestantes exposées pendant 10 jours à des RF (Ogawa *et al.* ; 2009), soit issus de souris exposées durant toute leur vie (Sommer *et al.*, 2009). De plus, le suivi post-natal dans cette dernière étude n'a pas montré de particularité, que ce soit en terme de comportement ou en terme de développement, chez les souriceaux. Une amélioration de l'apprentissage et de la mémoire a été retrouvée chez des jeunes rats exposés pendant 5 semaines (Kumlin *et al.*, 2007). Les articles réalisés sur les adolescents montrent une tendance à de meilleures performances dans l'étude de Preece *et al.* (2006), et aucun effet pour Haarala *et al.* (2006).

Au total, la plupart des études montrant des effets délétères des radiofréquences sur le

développement ne peuvent être prises en compte du fait de lacunes dans la méthodologie employée. D'autres études mettent en évidence une amélioration des performances chez l'animal ou chez l'humain, mais nécessiteraient d'être répliquées. Il ne semble pas exister d'effet sur la barrière hémato-encéphalique après exposition *in utero* ou pendant les premières semaines de vie. Par ailleurs, une étude a été réalisée sur des souriceaux nouveaux-nés prédisposés aux tumeurs et exposés à des ondes GSM en période néo-natale. Cette étude ne retrouve pas d'effet que ce soit en termes de survie des souris ou d'apparition de tumeurs, notamment cérébelleuses.

En conclusion, les études réalisées dans des conditions d'expérimentation fiables ne mettent pas en évidence d'effet des radiofréquences sur le développement. Cependant, les études sont peu nombreuses dans ce domaine de recherche.

4.4.1.9 Effets sur la reproduction

Les effets sur la reproduction sont importants à étudier dans la mesure où les gonades (testicules chez l'homme et ovaires chez la femme) peuvent être sensibles aux agents extérieurs. Ceci est connu pour les radiations ionisantes et certaines chimiothérapies anticancéreuses qui peuvent entraîner une stérilité. De plus, ces dernières peuvent également être à l'origine d'anomalies du développement chez les embryons.

Un total de 17 articles a été trouvé portant sur le thème de la reproduction. Parmi eux, 3 sont rédigés dans une langue autre que l'anglais et n'ont donc pas pu être évalués (Forgacs *et al.*, 2005 ; Liu *et al.*, 2007 ; Ye *et al.*, 2007). Deux revues (Deepinder *et al.*, 2007 ; Pourlis *et al.*, 2009) et deux études épidémiologiques (Wdowiak *et al.*, 2007 ; Agarwal *et al.*, 2008a) ont été publiées dans ce domaine. Parmi les 12 articles originaux restants, 3 études ont été effectuées *in vitro* (Erogul *et al.*, 2006 ; Agarwal *et al.*, 2008b ; Falzone *et al.*, 2008) et 6 *in vivo*, soit sur des rats (Aitken *et al.*, 2005 ; Oral *et al.*, 2006 ; Dasdag *et al.*, 2008 ; Ogawa *et al.*, 2009), soit sur des souris (Forgacs *et al.*, 2006 ; Sommer *et al.*, 2009). Les expositions *in vivo* ont été réalisées soit sur des animaux mâles (Aitken *et al.*, 2005 ; Forgacs *et al.*, 2006 ; Dasdag *et al.*, 2008), soit sur des animaux femelles (Oral *et al.*, 2006 ; Ogawa *et al.*, 2009), voire les deux (Sommer *et al.*, 2009). Trois études ont été effectuées chez l'homme après exposition à un téléphone portable (Wdowiak *et al.*, 2007 ; Agarwal *et al.*, 2008a ; Djeridane *et al.*, 2008).

Les études *in vitro* :

Elles ont été réalisées à partir de sperme provenant de donneurs humains. Ainsi, Erogul *et al.* (2006) ont étudié les effets d'un signal GSM émis à partir d'un téléphone mobile pendant 5 minutes sur des échantillons de sperme provenant de 27 donneurs sains. L'échantillon de sperme de chaque donneur était divisé en 2 parties : l'une exposée aux ondes, l'autre partie servant de témoin. Les auteurs ont analysé deux paramètres : la concentration et la mobilité des spermatozoïdes. Pour ce dernier critère, 4 groupes ont été identifiés : groupe A à progression rapide, groupe B à progression lente, groupe C avec absence de progression, groupe D avec absence de mobilité. Les auteurs n'ont observé aucune différence dans la concentration en spermatozoïdes, ni aucune différence pour le groupe C (pas de progression). En revanche, un pourcentage plus élevé de spermatozoïdes avec progression rapide ou lente dans le groupe contrôle a été constaté, alors que le groupe exposé montrait un pourcentage augmenté avec une absence de mobilité. Les auteurs concluent que les différences observées concernant la mobilité des spermatozoïdes sont imputables à l'exposition aux radiofréquences, étant donné que les autres facteurs environnementaux étaient similaires. Il faut noter que le système d'exposition utilisé ne convient pas à ce type

d'étude, qu'aucune dosimétrie n'est fournie par les auteurs et qu'il existe des discordances dans le texte, notamment dans les résultats (confusion entre les groupes C et D).

Agarwal *et al.* (2008) ont étudié les effets d'un signal GSM émis pendant 1 h par un téléphone mobile émettant à 850 MHz à un DAS de 1,46 W/kg sur du sperme provenant soit de donneurs sains (23) soit de patients suivis pour infertilité (9). Ils ont réalisé deux aliquots : l'un pour l'exposition, l'autre servant de témoin. Les paramètres étudiés ont été : la concentration en spermatozoïdes, leur mobilité et leur viabilité, le taux de ROS (radicaux libres oxygénés) par chemoluminescence, la TAC (Capacité Antioxydante Totale) par la technique d'inhibition de l'oxydation de l'ABTS (2,2'-azino-di-[3-ethylbenzthiazoline sulphonate]), le Score ROS-TAC et les lésions de l'ADN par le TUNEL. Ils ont obtenu les résultats suivants : pas de différence dans la concentration en spermatozoïdes, mais diminution de leur mobilité et de leur viabilité dans les spermes exposés, taux de ROS augmenté dans les exposés, pas de différence pour la TAC, mais diminution du score ROS-TAC dans les spermes exposés sans différence témoins/patients, pas de différence concernant les lésions ADN. Les auteurs concluent à une possible production de radicaux libres dans le sperme humain en réponse aux radiofréquences. Il faut souligner que le système d'exposition utilisé est inadéquat pour ce genre d'étude.

Falzone *et al.* (2008) ont exposé les spermes provenant de 12 donneurs à un signal GSM (900 MHz, DAS de 2,0 ou de 5,7 W/kg) pendant 1 h dans un système d'exposition décrit par Leszczynski *et al.* (2002). Ils ont étudié le potentiel membranaire mitochondrial par cytométrie de flux et la mobilité des spermatozoïdes en utilisant différents critères. Concernant la vélocité, 3 paramètres ont été mesurés : la VSL (*straight line velocity* ou vélocité linéaire), la VCL (*curvilinear velocity* ou vélocité curvilinéaire), la VAP (*spacially average path* ou vitesse de transit moyenne). Concernant les résultats, les auteurs n'ont constaté aucun effet sur le potentiel membranaire mitochondrial, ni de variation de la mobilité au DAS de 2,0 W/kg. En revanche, une diminution de la vélocité dans les spermatozoïdes exposés au DAS de 5,7 W/kg a été observée, mais seulement significative pour un des 3 paramètres (la VSL) utilisés pour tester la vélocité. Au même DAS a été mise en évidence une diminution de la BCF (*beat-cross frequency* ou fréquence de traversée) par rapport aux contrôles.

Les études *in vivo* :

Aitken *et al.* (2005) ont étudié les effets des radiofréquences sur le sperme provenant de l'épididyme de souris mâles CD1 *Swiss* exposées corps entier à un signal de 900 MHz (12 h / jour pendant 7 jours) à un DAS de 0,09 W/Kg. Ils n'ont pas observé d'effet sur les paramètres classiquement mesurés du sperme (comptage des spermatozoïdes, mobilité, morphologie et viabilité), ni d'augmentation importante du taux de cassures simples et doubles brins d'ADN (électrophorèse alcaline et en champ découpé). En revanche, une augmentation significative des lésions du génome mitochondrial et du gène de la ß-globine a été mise en évidence en PCR quantitative. Les auteurs concluent à un possible effet biologique. Cependant, aucun contrôle positif n'a été effectué. De plus, les gènes étudiés ont été choisis car l'étude de ces gènes était déjà formatée en PCR quantitative par l'équipe. Ce travail ne repose donc sur aucune donnée antérieure provenant d'une autre étude, ni sur aucune hypothèse biologique, mais seulement sur l'application d'une technique connue.

Forgacs *et al.* (2006) ont exposé des souris mâles NMRI à un signal GSM à 1 800 MHz (2 h / j, 5 j / semaine, 2 semaines, exposition corps entier) à un DAS de 0,018 à 0,023 W/Kg. Ils ont isolé les cellules interstitielles de Leydig et les ont cultivées. De plus, ils ont quantifié la testostérone, étudié l'histologie des testicules, fait des études hématologiques (notamment dosage des globules rouges) et dosé des enzymes dans le sang (TGO, TGP, phosphatases

alcalines ou PA). Les auteurs ont mis en évidence une augmentation du taux de testostérone chez les souris exposées (5 expérimentations) associée à une augmentation du taux de globules rouges et de globules rouges en paquet. En revanche, aucune variation de production de testostérone par les cellules de Leydig (basale ou après stimulation par hCG), aucune modification histologique ni d'effet sur les valeurs de TGO, TGP et de PA n'a été observée. Aucun détail concernant le système d'exposition, ni aucune dosimétrie ne sont fournis par les auteurs.

Oral *et al.* (2006) (publication également traitée dans le chapitre 4.4.1.4) ont soumis 24 rates *Wistar* à des champs électromagnétiques à 900 MHz (30 min / jour pendant 30 jours) dans un système comportant une antenne dipôle. Les valeurs de DAS sont estimées entre 0,016 à 4 W/kg. Trois groupes de 8 rates ont été déterminés : groupe I témoin, groupe II exposé et groupe III exposé ayant reçu des vitamines E et C. Toutes les rates ont été sacrifiées au début de la phase oestrogénique du cycle menstruel. Le MDA (malondialdéhyde), marqueur de la production de radicaux libres, a été dosé dans l'endomètre. Des coupes en paraffine de l'endomètre ont été effectuées et ont été marquées par des anticorps (anti-caspase 3, anti-caspase 8, anti bcl-2 et anti-bax) par des techniques d'immunohistochimie. Les résultats ont montré que le taux de MDA est supérieur dans le groupe II (exposé) et dans le groupe III (exposé + vitamines) par rapport au groupe I (contrôle). Le marquage de la caspase 3 est faible au niveau de la surface de l'épithélium, et au niveau des cellules endothéliales des capillaires du stroma (groupe I). Il augmente pour le groupe II et il n'existe pas de marquage pour le groupe III. Le même résultat est obtenu pour la caspase 8. Pour bax, un marquage intense est observé sur les cellules épithéliales, glandulaires et stromales dans le groupe exposé (II). L'inverse est constaté pour bcl-2: marquage faible dans le groupe II. Le ratio bcl-2/bax est donc en faveur de l'apoptose pour le groupe exposé. D'après les auteurs, les ondes à 900 MHz sont susceptibles de provoquer une apoptose endométriale et un stress oxydatif qui peuvent être diminués par les vitamines E et C. Concernant cette publication, il faut noter l'absence de dosimétrie, avec un DAS donné variant du simple à 250 fois sa valeur (de 0,016 à 4 W/kg), ainsi que la discordance entre résultats et discussion pour les marquages de bcl-2 et de bax .

Dasdag *et al.* (2008) ont réalisé une exposition chronique de rats mâles albinos *Wistar* dans un carousel en plexiglas à un signal GSM de 900 MHz (2 h / jour, 7 jours / semaine pendant 10 mois ; DAS de 0,07 à 0,57 W/kg). Trois groupes ont été définis : exposés, *shams* et témoins. Une étude en immunohistochimie avec marquage de la caspase 3 active sur coupes en paraffine des testicules (5 µm) a été effectuée. L'intensité et l'extension du marquage ont toutes deux été prises en compte. Aucun d'effet sur l'expression de la caspase 3 active n'a été mis en évidence sur les rats exposés de manière chronique.

Les deux publications suivantes ont déjà été traitées dans le chapitre 4.4.1.8, car elles ont porté sur deux thématiques, à savoir reproduction et développement (Ogawa *et al.*, 2009 ; Sommer *et al.*, 2009).

Ainsi, Ogawa *et al.* (2009) ont exposé des rates gestantes âgées de 10 semaines pendant 90 minutes par jour (J 7 à J 17 de gestation) à un signal W-CDMA (1,95 GHz, DAS de 0,67 W/kg et de 2 W/kg) dans une chambre d'exposition comportant une antenne centrale. 4 groupes de 5 rates ont été constitués : contrôles, *sham*s, exposition basse (DAS de 0,67 W/kg), exposition haute (DAS de 2 W/kg). Un total de 4 expérimentations a été effectué par condition (donc 20 rates par groupe). Les rates ont été sacrifiées à 20 jours de gestation. Concernant les résultats chez les mères : il n'a pas été retrouvé de différence dans la croissance entre les 4 groupes, ni d'augmentation du nombre d'anomalies macroscopiques, ni de différence dans le nombre de corps jaunes, ou le nombre d'implantations et de morts fœtales.

Une autre étude récente réalisée en double aveugle (Sommer *et al.*, 2009) a porté sur l'exposition chronique (toute leur vie durant et 24 h / 24) de souris C57BL à un signal UMTS (1 966 MHz, DAS de 0, 0,08, 0,4 et 1,3 W/kg) sur 4 générations grâce à 8 guides d'ondes localisés dans une même pièce. Un rat mâle (128 au total à la 1ère génération) et 2 femelles (256 au total) étaient placés dans une même cage. Une femelle gestante sur 2 était sacrifiée pour examiner les fœtus. Les résultats mettent en évidence une tendance à une moindre consommation de nourriture chez les exposés, mais sans différence dans la consommation d'eau. Aucun effet sur les paramètres de fertilité chez les mâles (examen des testicules) et les femelles n'a été rapporté, notamment sur le nombre de fœtus 18 jours après l'accouplement.

Etudes chez l'homme :

Wdowiak *et al.* (2007) ont réalisé une étude épidémiologique rétrospective sur le sperme de 304 hommes suivis pour infertilité. Ils ont comparé 3 groupes de sujets en fonction de l'utilisation de leur téléphone mobile sur 2 ans : groupe A : pas d'utilisation de téléphone mobile (99 hommes), groupe B : utilisation occasionnelle (157 hommes), groupe C : utilisation régulière (48 hommes). Les critères du spermogramme pris en compte ont été la concentration en spermatozoïdes, leur mobilité et leur morphologie. Aucune différence entre les 3 groupes concernant la concentration en spermatozoïdes n'a été mise en évidence. En revanche, une diminution de la viabilité des spermatozoïdes, associée à une diminution de leur mobilité a été notée dans les groupes utilisant le téléphone mobile. De plus, une augmentation du nombre de spermatozoïdes ayant une morphologie anormale serait corrélée, selon les auteurs, au temps d'exposition des sujets au téléphone mobile. Cette étude épidémiologique est fondée rétrospectivement sur un seul paramètre (l'utilisation d'un téléphone mobile) et présente donc un biais certain, car de nombreux facteurs non pris en compte peuvent intervenir sur la qualité du sperme (alcool, tabac, chaleur, toxiques, *etc*.).

Agarwal *et al.* (2008a) ont effectué le même type d'étude rétrospective que Wdowiak *et al.* (2007) sur 361 hommes suivis pour infertilité. Quatre groupes ont été comparés suivant les habitudes téléphoniques des sujets : groupe A : pas d'utilisation de téléphone mobile (40 hommes), groupe B : utilisation inférieure à 2 h / jour (107 hommes), groupe C : utilisation de 2 à 4 h / jour (100 hommes) et groupe D : utilisation supérieure à 4 h / jour (114 hommes). Huit paramètres concernant le sperme ont été considérés : volume, temps de liquéfaction, pH, viscosité, concentration en spermatozoïdes, mobilité, viabilité et morphologie. Chez les utilisateurs de téléphone mobile, une diminution du nombre de spermatozoïdes, de leur mobilité, de leur viabilité et de leur morphologie normale a été observée, diminution corrélée à l'augmentation de l'utilisation journalière du téléphone. Ne prenant en compte qu'un seul paramètre, cette étude présente le même biais que celle de Wdowiak *et al.* (2007).

Djeridane *et al.* (2008) ont exposé 20 sujets volontaires à un signal GSM 900 par l'intermédiaire d'un téléphone mobile 2 heures par jour, 5 jours par semaine pendant 4 semaines. Ils ont mesuré chez 19 sujets les taux d'hormones stéroïdes (cortisol et testostérone), les taux d'hormones hypophysaires (TSH ou thyroid-Stimulating Hormone, GH ou *growth* hormone, prolactine et l'hormone adrénocorticotrope). Les dosages étaient effectués toutes les heures la nuit et toutes les 3 heures pendant la journée, avec 4 séries de dosage : avant exposition, au milieu de l'exposition, à la fin et 15 jours après la fin de l'exposition. Les profils circadiens de la prolactine, de la TSH, de l'adrénocorticotrophine et de la testostérone sont restés inchangés. En revanche une diminution des pics maximum de GH et de cortisol à 2 semaines (GH et cortisol) et à 4 semaines d'exposition (GH) a été constatée par rapport aux taux avant exposition, avec un retour à la normale 15 jours après. Selon les auteurs, aucun d'effet sur les fonctions endocrines n'a été visible en terme de

concentration et de rythme circadien, sauf pour le cortisol et la GH. Ils envisagent l'hypothèse que l'ordre d'exposition pourrait être en cause dans les différences observées pour ces deux hormones.

En résumé, les 3 études portant sur les effets sur la reproduction réalisées *in vitro* concluent à un effet potentiel des radiofréquences sur le sperme soit concernant la mobilité des spermatozoïdes (Erogul *et al.*, 2006), soit dans la production de radicaux libres oxygénés dans le sperme (Agarwal *et al.*, 2008), soit dans la vélocité des spermatozoïdes (Falzone *et al.*, 2008). Pour les deux premiers articles, le système d'exposition utilisé est inadéquat pour le type d'étude effectuée (téléphone mobile) avec une absence totale de dosimétrie. La dernière étude a montré une diminution significative d'un seul critère de vélocité sur les 3 testés, associée à une diminution de la fréquence de traversée des spermatozoïdes (BCF) à un DAS élevé.

Les études réalisées *in vivo* montrent des effets des radiofréquences soit de type génotoxiques (Aitken *et al.*, 2005), soit de type cytotoxique ou inducteur d'apoptose (Oral *et al.*, 2006), soit sur les hématies et le taux de testostérone dans le sang (Forgacs *et al.*, 2006). Pour l'étude de Oral *et al.* (2006), il est important de noter une estimation très approximative du DAS (entre « 0,016 et 4 W/kg ») Concernant l'étude de Aitken *et al.* (2005), il faut souligner qu'aucun contrôle positif n'a été effectué et que les gènes étudiés ont été choisis car l'étude de ces gènes était déjà formatée en PCR quantitative par l'équipe. Pour l'étude de Forgacs *et al.* (2006) aucun détail concernant le système d'exposition, ni aucune dosimétrie ne sont fournis par les auteurs.

Les 3 autres articles concernent des études plus récentes et mieux documentées au point de vue expérimental (la dosimétrie notamment est fournie). Elles ne mettent pas en évidence d'effet sur l'expression de la caspase 3 active sur les testicules de rat (Dasdag *et al.*, 2008), ni d'effet sur la reproduction ou sur le développement de rats ou de souris (Ogawa *et al.*, 2009; Sommer *et al.*, 2009).

Sur les 3 études réalisées chez l'humain, deux présentent un biais de méthodologie certain en corrélant un seul paramètre (l'utilisation d'un téléphone mobile) à la qualité du sperme, alors que de nombreux autres facteurs peuvent intervenir (Wdowiak *et al.*, 2007 ; Agarwal *et al.*, 2008a). Une publication avec une méthodologie validée (Djeridane *et al.*, 2008) a montré que les concentrations hormonales et les rythmes circadiens étaient conservés pour la testostérone après exposition subchronique à des GSM 900.

En conclusion, les études les plus récentes et les mieux paramétrées n'ont pas mis en évidence d'effet délétère des radiofréquences sur la reproduction et le développement, notamment une étude effectuée récemment sur 4 générations de souris.

4.4.1.10 Effets sur l'audition

Etant donné la proximité des téléphones mobiles avec l'oreille, il est légitime de s'interroger sur la possibilité d'effets des radiofréquences sur l'audition.

Introduction concernant l'oreille et les méthodes d'investigation de l'audition

L'oreille comprend trois parties :

- *l'oreille externe* : pavillon et conduit auditif externe,
- *l'oreille moyenne* : caisse du tympan, séparée du conduit auditif externe par le tympan et de l'oreille interne par une paroi. La caisse est traversée par la chaîne des osselets et communique avec l'arrière-fond des fosses nasales par la trompe d'eustache.

- *l'oreille interne*, cochléaire, répond aux deux tours et demi de spire du limaçon. C'est une sorte de harpe, car à l'intérieur du limaçon se trouve le canal cochléaire, support des cellules sensorielles auditives en contact avec le nerf auditif.

Un son est caractérisé par sa fréquence qui s'exprime en Hz et par son intensité que l'on mesure en décibels. L'oreille humaine peut percevoir de 50 à 16 000 Hz. Les sons pénètrent dans le conduit auditif (transmission aérienne de l'onde sonore). Ces ondes mettent en vibration le tympan (énergie mécanique) qui jouxte l'oreille moyenne. Des osselets (marteau, enclume, étrier) se transmettent cette énergie et l'amplifient. L'étrier rentre en contact avec la fenêtre ovale, point d'entrée dans l'oreille interne. Il s'y produit une énergie liquide qui met en vibration une membrane se trouvant dans le limaçon (ou cochlée). La vague va se différencier selon l'intensité du son et sa fréquence. Il se trouve dans le limaçon des cellules nerveuses (cellules ciliées de l'organe de Corti) réparties sur la membrane basilaire. Celles-ci vont capter l'onde et produiront l'influx nerveux (électrique) qui parvient au cerveau (l'aire auditive) grâce au nerf auditif, en passant par le tronc cérébral.

Les tests audiométriques « classiques » visent à déterminer le profil audiométrique d'une personne, c'est-à-dire à fournir un état précis sur son audition. On différencie l'audiométrie tonale et l'audiométrie vocale. L'audiométrie tonale sert à mesurer par voie aérienne et par voie osseuse le seuil d'audition pour l'ensemble des fréquences conversationnelles, de 125 à 8 000 Hz en aérienne et de 250 à 4 000 Hz en osseuse. On utilise en conduction aérienne un casque ou encore un haut-parleur (placé à 1 m en position frontale). En conduction osseuse on utilise un vibrateur (ex : un diapason). L'audiométrie vocale sert à mesurer à l'aide de listes de mots, dites phonétiquement équilibrées, la compréhension de la personne à différents niveaux d'intensité. On obtient généralement une courbe en « s ». Ces tests ont la particularité de présenter un certain degré de subjectivité puisqu'ils font appel à la participation active du sujet.

L'audition peut également être étudiée objectivement de différentes façons : les potentiels évoqués auditifs tout d'abord. De manière générale, l'enregistrement des potentiels évoqués est utilisé lorsque l'on veut savoir si une fonction sensorielle est atteinte ou quand les autres techniques d'examen ne sont pas assez performantes, ou chez les animaux. Dans le cas de recherche sur l'audition, l'enregistrement des potentiels évoqués auditifs sera réalisé. Il consiste à soumettre le patient à un stimulus sonore appelé *click*. Les électrodes sont placées sur les oreilles et le cuir chevelu. Une variante, l'électrocochléographie, consiste à introduire une fine électrode en forme d'aiguille dans l'oreille à travers le tympan. On enregistre ainsi l'activité de la cochlée, du nerf auditif et du tronc cérébral.

Après une stimulation acoustique du système auditif, on peut mettre en évidence différents potentiels dénommés successivement :

- les potentiels évoqués du tronc cérébral (ou *Auditory Brainstem Responses* - ABRs) qui apparaissent dans les dix premières millisecondes après la stimulation ;
- les potentiels évoqués semi-précoces (ou *middle latency responses* - MLRs) qui apparaissent entre les dixième et soixantième millisecondes après la stimulation ;
- les potentiels évoqués corticaux (ou *auditory evoked responses* - AERs) qui apparaissent entre les centième et deux cent cinquantième millisecondes après la stimulation.

La technique des oto-émissions provoquées est plus récente ; elle peut être appliquée dès la période néonatale. Les oto-émissions provoquées sont des oto-émissions apparaissant après la stimulation de l'oreille par un son bref. Par un mécanisme complexe, les cellules ciliées externes vont générer une énergie importante, émise vers l'extérieur sous forme d'un son complexe : l'oto-émission provoquée. Celle-ci sera enregistrée dans le conduit auditif externe 7 à 8 millisecondes après la stimulation, temps nécessaire à l'onde sonore pour aller jusqu'aux cellules de l'organe de Corti et au signal émis pour revenir au conduit auditif externe. Cette technique possède de nombreux avantages : elle est simple, rapide et

atraumatique, objective. C'est un excellent test de dépistage large de la surdité permettant de faire un tri.

Il existe 4 types d'oto-émissions: i) les SOAEs (*Spontaneous Otoacoustic Emissions*) émises sans stimulation acoustique (c'est-à-dire spontanément), ii) les TOAEs (*Transient Otoacoustic Emissions*) émises en réponse à un stimulus acoustique de très courte durée, généralement un clic, iii) les DPOAEs (*Distortion Product Otoacoustic Emissions*) émis en réponse à 2 sons simultanés de fréquence différente, iv) les SFOAEs (*Sustained-Frequency Otoacoustic Emissions*) émis en réponse à une tonalité continue. Les DPOAE sont plus faciles à enregistrer chez les rongeurs et fournissent des informations sur la nature fréquentielle de la réponse enregistrée.

Analyse bibliographique

Concernant les effets des radiofréquences sur l'audition, un total de 30 articles a été retrouvé. Un article a été écrit en allemand et n'a pas été analysé (Sievert *et al.*, 2007). Trois revues ont été écrites (Khalil et Nunez, 2006 ; Lin et Wang, 2007 ; Balbani *et al.*, 2008). L'équipe de Lopresto *et al.* (2007) a publié un article concernant un dispositif permettant d'étudier de manière adaptée les effets des ondes électromagnétiques sur le système auditif des rats. Ce système a été utilisé par l'équipe de Galloni, Parazzini *et al.* Par ailleurs, à partir d'un modèle d'images par résonance magnétique (IRM), l'équipe de Ravazzani a réalisé une modélisation de la distribution électrique, magnétique et de la distribution du DAS dans le système auditif (Parazzini *et al.*, 2007). Les auteurs insistent sur la nécessité d'avoir des données dosimétriques fiables pour conduire les études.

Sur les 24 articles restants, une étude a été réalisée *in vitro* sur une lignée de cellules ciliées auditives de souris (Huang *et al.*, 2008). Quatre études ont été réalisées *in vivo* sur des rats par la même équipe (Galloni *et al.*, 2005a, Galloni *et al.*, 2005b ; Parazzini *et al.*, 2007a ; Galloni *et al.*, 2009), alors que toutes les autres ont été effectuées chez l'humain. De plus, deux études multicentriques réalisées dans le cadre de projets Européens ont été publiées (Parazzini *et al.*, 2007b ; Parazzini *et al.*, 2009).

Puisque les tests s'effectuent chez l'humain, c'est un téléphone mobile qui constitue le plus souvent le système d'exposition. Ceci explique l'absence de dosimétrie dans les différentes publications. Cette absence ne remet pas en cause la qualité des études effectuées dans la mesure où le DAS est obligatoirement situé dans la fourchette des valeurs autorisées (DAS constructeur au *maximum*).

Etude *in vitro* :

Des cellules ciliées auditives HEI-OC1 provenant d'une lignée murine ont été exposées à un signal CDMA (1 763 MHz, DAS à 20 W/kg) jusqu'à 24 à 48 h (Huang *et al.*, 2008). Aucune altération du cycle cellulaire, ni de lésion d'ADN, ni de réponse de stress n'a été mise en évidence. Une variation minime de l'expression de certains gènes (29 sur 15 040) a été retrouvée, mais a été attribuée par les auteurs à un artéfact.

- Etudes sur les animaux :

Les travaux réalisés ont tous été menés par la même équipe italienne, en testant essentiellement les DPOAEs. Tout d'abord, Galloni *et al.* (2005a) ont étudié l'effet de champs électromagnétiques de 900 MHz sur la fonction cochléaire de rats. Trois protocoles expérimentaux ont été utilisés afin de tester différentes conditions d'exposition : variation de DAS, de modulation, du temps d'exposition (de 1 semaine à 4 semaines) et même de système d'exposition. Aucune variation significative des DPOAEs n'a été constatée quel que soit le protocole suivi.

La même équipe a réalisé deux expositions subchroniques (2 h par jour, 5 jours par semaine pendant 4 semaines) soit à un signal GSM (900 et 1 800 MHz) en 2005 (Galloni *et al.*, 2005b), soit à un signal UMTS (1 946 MHz, DAS de 10 W/kg) en 2009 (Galloni *et al.*, 2009). Aucune variation des DPOAEs n'a été retrouvée chez les rats exposés aux ondes, contrairement aux rats traités à la kanamycine utilisés comme les contrôles positifs en 2009. Il faut noter que le système d'exposition utilisé est celui décrit par Lopresto *et al.* (2007).

Une autre étude, toujours menée par la même équipe, a combiné un traitement à la gentamycine à une exposition subchronique à des ondes continues (CW) à 900 MHz (Parazzini *et al.*, 2007). La gentamycine est un agent antibiotique utilisé en pathologie humaine qui fait partie de la classe des aminosides connus pour leur ototoxicité. Les rats ont été divisés en 4 groupes : un traité par gentamycine, un traité par gentamycine et exposé aux ondes, un uniquement exposé aux ondes et un *sham*. Aucune différence entre le groupe de rats exposés aux radiofréquences par rapport aux *sham*s, ni entre le groupe exposé aux radiofréquences et à la gentamycine par rapport au groupe exposé uniquement à la gentamycine n'a été retrouvée concernant les DPOAEs excluant dans les conditions expérimentales utilisées un effet potentialisateur des ondes sur l'ototoxicité induite par un aminoside.

- Etudes humaines :

Certains auteurs ont pratiqué des tests audiométriques qui posent le problème de leur possible subjectivité. Ainsi, Garcia Callejo *et al.* (2005) ont mis en évidence une atteinte de l'audition en se basant sur des courbes audiométriques (augmentation du seuil de conduction aérienne) chez 323 sujets volontaires après 3 ans d'utilisation d'un téléphone mobile. Aucun test objectif n'a été réalisé pour valider les résultats obtenus.

Oktay et Dasdag (2006) ont ainsi mis en évidence par des tests audiométriques classiques une perte d'audition chez 20 sujets utilisant un téléphone mobile environ 2 h par jour depuis 4 ans par rapport à 20 contrôles non utilisateurs. Aucune perte n'était retrouvée chez 20 sujets utilisant le téléphone en moyenne 10 à 20 minutes par jour. Les potentiels évoqués du tronc cérébral ne montraient pas de différence entre les 3 groupes.

Plusieurs autres études ont quant à elles utilisé des tests objectifs :

- soit les oto-émissions provoquées :

Uloziene *et al.* (2005) n'ont pas mis en évidence de différence significative concernant le seuil d'audition en conduction aérienne et les TEOAEs avant et après exposition réelle ou *sham* (900 ou 1 800 MHz) à un téléphone mobile pendant 10 minutes chez 30 sujets. Mora *et al.* (2006) ont exposé 20 hommes à un signal GSM 900 et GSM 1800 produits par un téléphone mobile de 15 à 30 minutes. Ils n'ont pas mis en évidence de variations des TEOAEs ni des potentiels évoqués du tronc cérébral (ABR). Dans l'étude de Paglialonga *et al.* (2007), aucune variation des TEOAEs n'a été trouvée avant et après exposition réelle ou *sham* (900 ou 1 800 MHz) à un téléphone mobile pendant 10 minutes chez 27 sujets, après analyse globale mais également après analyse fine de leur structure.

- soit les produits de distorsion (DPOAEs) :

Janssen *et al.* (2005) n'ont pas trouvé de variation significative dans le niveau des DPOAE en comparant 14 sujets exposés à un signal GSM 900 et 14 sujets en exposition « *sham* ». Parazzini *et al.* (2005) ont analysé en double aveugle 2 composantes des DPOAE permettant de mettre en évidence des petites variations de la fonction auditive chez 12 sujets exposés ou non à un signal GSM 900 et GSM 1800 pendant 10 minutes. Aucune variation significative n'a été obtenue.

- soit les potentiels évoqués du tronc cérébral (ABRs) :

Oysu *et al.* (2005) ont exposé 18 sujets pendant 15 minutes à un signal GSM 900 et ont réalisé une étude des potentiels évoqués du tronc cérébral avant et après exposition. Ils n'ont pas trouvé de différence entre les latences des ABR avant et après exposition. Cette absence de variation des ABR a été retrouvée par Stefanics *et al.* (2007) après 10 minutes d'exposition à un téléphone mobile.

Sievert *et al.* (2005) n'ont pas mis non plus en évidence d'effet sur les potentiels évoqués du tronc cérébral chez 12 sujets exposés de manière concomitante à un téléphone mobile, de la même façon que Mora *et al.* (2006) chez 20 hommes sains.

- soit les potentiels évoqués auditifs (PEAs):

Maby *et al.* (2005) ont étudié les PEA chez 9 sujets sains et 6 patients épileptiques atteints d'épilepsie du lobe temporal droit avec ou sans exposition à un signal GSM 900. Des différences dans les enregistrements ont été mises en évidence (variations significatives sur les coefficients de corrélation temporale et dans la fréquence), mais n'ont pas pu être corrélées à un effet particulier par les auteurs, car non reproductibles d'un sujet à l'autre.

Les mêmes auteurs ont retrouvé avec les mêmes patients (Maby *et al.*, 2006) des variations des potentiels évoqués auditifs selon la topographie du scalp considérée et différentes selon le type de sujets (épileptiques ou non). Ils concluent que les radiofréquences peuvent modifier les PEAs, mais qu'aucune preuve de perturbations dans le fonctionnement cérébral n'est apportée.

D'autres auteurs ont utilisé plusieurs paramètres : ainsi Kerekhanjanarong *et al.* (2005) ne trouvent pas de différence significative dans les paramètres audiométriques testés (audiométrie, tympanométrie, DPOAEs, et PEAs) chez 98 sujets utilisateurs de téléphones mobiles en comparant le côté exposé (côté du téléphone appelé côté « dominant ») *versus* l'autre côté. Cependant, le seuil d'audition serait diminué côté dominant chez 8 sujets dont le temps d'utilisation du téléphone excèderait 60 minutes. Ce résultat n'est statistiquement pas significatif.

Dans le cadre du programme MTHR (*Mobile Telecommunications and Health Research Programm*) mis en place au Royaume Uni, Bamiou *et al.* (2008) ont réalisé une étude cas-témoins en double aveugle. Neuf sujets présentant des signes d'hypersensibilité électromagnétique (EHS) et 21 sujets contrôles ont été soumis à 3 conditions d'exposition choisies de manière aléatoire (GSM, CW, absence de rayonnement) pour un signal à 882 MHz, pendant 30 min, avec un DAS maximal de 1,3 W/kg, et ont subi deux expérimentations espacées de 2 à 4 semaines : une expérimentation auditive avec mesure des TEOAEs et une expérimentation vestibulaire avec étude du réflexe oculo-vestibulaire (VOR) par vidéo-oculographie (VOG). Aucune différence pour le test auditif dans les paramètres étudiés n'a été mise en évidence, avant et après exposition quels que soient les sujets, ni entre les sujets "cas" et les témoins. La VOG n'a pas fait apparaître d'effet de l'exposition sur le système vestibulaire (pas de nystagmus) chez les cas comme chez les témoins. De plus, les auteurs notent que les sujets « cas » ne sont pas capables de reconnaître si l'exposition est présente ou non.

Un autre groupe a utilisé les seuils de tâches de commande auditive pour répliquer l'étude de Maier *et al.* (2004). Ces derniers avaient trouvé une augmentation du seuil chez 8 participants sur 11. En menant l'étude sur 168 sujets, Cinel *et al.* (2007) n'ont pas trouvé de différence dans les seuils après exposition à des rayonnements de type GSM (88 sujets) ou continu (88 sujets), quel que soit le côté de l'exposition.

Davidson et Lutman (2007) ont quant à eux réalisé un questionnaire composé de 3 parties : évaluation de l'utilisation du téléphone mobile, effets potentiels (audition, bourdonnements d'oreille, équilibre), âge et passé médical qu'ils ont distribué aux étudiants de l'Université de Southampton. Cent-soixante questionnaires ont été remplis et 117 retenus selon des critères préétablis. Aucun effet délétère de l'utilisation d'un téléphone mobile n'a été mis en évidence par l'étude des réponses. L'inconvénient majeur de cette étude est la subjectivité basée sur l'autoévaluation.

Etudes multicentriques :

La première étude multicentrique a été réalisée dans le cadre du projet européen GUARD (*Potential Adverse Effects of GSM Cellular Phone on Hearing*). Elle a été menée chez 169 sujets sur 9 sites différents en double aveugle (Parazzini *et al.*, 2007). Cette étude n'a pas mis en évidence de variation dans les niveaux de seuil d'audition, dans les TEOAEs, les DPOAEs et les ABRs du côté de l'oreille exposée aux champs électromagnétiques (10 min à un signal GSM 900 MHz ou 1 800 MHz).

Un deuxième article a été publié récemment (Parazzini *et al.*, 2009). Il concerne les résultats du projet Européen "EMFnEAR". 134 sujets jeunes ont été exposés pendant 20 min à des ondes UMTS (1 947 MHz) et plusieurs paramètres auditifs ont été testés immédiatement avant et après exposition : niveaux de seuil d'audition, DPOAEs, suppression controlatérale des TEOAEs et potentiels évoqués auditifs (PEAs). Un effet non significatif sur le seuil d'audition à des hautes fréquences après exposition a été retrouvé, alors que tous les autres paramètres sont comparables avant et après exposition. Les auteurs concluent à un probable artéfact, mais que des études de réplication sont nécessaires.

Etude sur le système vestibulaire:

En plus de l'étude de Bamiou *et al.* (2008) citée plus haut, une autre étude a porté sur les effets des ondes sur le système vestibulaire. Pau *et al.* (2005) ont exploré la fonction vestibulaire sur 13 sujets volontaires en utilisant la technique de vidéo-nystagmographie. Ils ont soumis les sujets à des ondes GSM (889,6 MHz, DAS de 1,9 W/kg) et ont réalisé un enregistrement des mouvements oculaires pendant 2 minutes. Aucun nystagmus n'est apparu, montrant que le système vestibulaire n'est pas stimulé dans les conditions d'expérimentation utilisées.

En résumé, parmi les 18 études réalisées sur l'homme concernant les effets auditifs, 5 équipes retrouvent un effet après utilisation d'un téléphone mobile à partir d'un certain temps d'exposition. Les mesures effectuées par ces équipes portent essentiellement sur le seuil d'audition évalué par des tests audiométriques standards moins objectifs que les enregistrements de potentiels évoqués. Lorsqu'elles sont couplées à l'analyse des potentiels évoqués, ceux-ci ne montrent pas de différence entre les populations étudiées. De plus, certaines études se sont fondées sur le temps d'utilisation d'un téléphone mobile, évalué par le sujet, ce qui constitue une donnée subjective. Les 13 autres études, utilisant des données électrophysiologiques plus fiables, n'ont pas mis en évidence de variation dans le fonctionnement du système auditif après exposition à des radiofréquences dans la gamme de la téléphonie mobile. La plupart de ces études présentent cependant un inconvénient majeur : elles comparent des données avant et après exposition à des radiofréquences (durant environ 10 min), et ne peuvent mettre en évidence que des effets relatifs à une exposition unique à court terme. Elles n'excluent donc pas la possibilité d'effets délétères sur le système auditif suite à une exposition plus longue ou chronique.

Une seule équipe a effectué des recherches sur des rats, ce qui a permis de réaliser une exposition subchronique à des niveaux de DAS très élevés allant jusqu'à 10 W/kg. Les 4 articles publiés ne montrent aucune altération des fonctions auditives chez les rats après 4

semaines d'exposition. De plus, aucune potentialisation de l'ototoxicité de la gentamycine n'a été retrouvée par la même équipe.

Il est par ailleurs important de souligner que les 2 études multicentriques européennes concernant les effets des téléphones mobiles sur l'audition, publiées respectivement en 2007 (concernant 169 sujets) et en 2009 (134 sujets), ne mettent en évidence aucune variation dans les mesures auditives réalisées par des tests objectifs.

Deux équipes ont étudié les effets des radiofréquences sur le système vestibulaire (Pau *et al.*, 2005 ; Bamiou *et al.*, 2008) par des techniques de vidéo-nystagmographie. Aucune n'a trouvé d'effet.

En conclusion, il n'existe pas d'argument permettant de conclure à un effet délétère des radiofréquences sur le système auditif chez l'homme. Cependant, des études après exposition chronique devraient être envisagées afin de préciser un éventuel risque à long terme.

4.4.1.11 Effets sur le système oculaire

Bien que le système oculaire ne soit pas une cible évidente des ondes émises par un téléphone mobile, certains auteurs se sont intéressés aux effets potentiels des radiofréquences sur les yeux.

Huit articles ont été écrits sur ce thème. Parmi eux, 3 sont rédigés en chinois (Sun *et al.*, 2006a et 2006b ; Wu *et al.*, 2008). Deux études ont été réalisées *in vitro* (Dovrat *et al.*, 2005 ; Zhou *et al.*, 2008)). 3 articles rapportent des études humaines ((Balik *et al.*, 2005 ; Schmid *et al.*, 2005 ; Terao *et al.*, 2006 ; Irlenbusch *et al.*, 2007).

Etudes *in vitro* :

Dovrat *et al.* (2005) ont exposé des cristallins provenant de veaux âgés d'un an à un signal continu (1 100 MHz, 50 min *on* ; 10 min *off* pendant 8 jours, avec un DAS de 1,4 W/kg). Ils ont ensuite réalisé une étude microscopique tout au long de l'exposition sur 20 cristallins exposés en comparant leur structure à celle de 20 cristallins témoins. Les auteurs ont mis en évidence des variations focales d'épaisseur des cristallins exposés commençant 48 h après exposition, maximales à 9 jours, suivies d'une récupération. Cette étude ne fait mention d'aucune dosimétrie.

Zhou *et al.* (2008) ont réalisé des cultures de cellules ganglionnaires rétiniennes provenant de souriceaux nouveaux-nés. Les cellules ont été exposées à un signal CW (2 450 MHz, DAS de 10, 30, 60 mW/cm^2) pendant 1 h. La morphologie cellulaire par observation microscopique (microscope inversé), le taux de survie par test au bleu trypan et l'apoptose par cytométrie de flux après marquage par l'annexine V ont été évalués. En comparant les cellules exposées aux *shams*, des variations de la morphologie cellulaire (agrégation, taux de fragmentation augmenté), une diminution de la survie cellulaire ainsi qu'une augmentation du taux d'apoptose ont été constatées dans les cellules exposées à 30 et 60 mW/cm^2 et non à 10 mW/cm^2. D'après les auteurs, les ondes continues sont susceptibles d'entraîner des lésions des cellules ganglionnaires rétiniennes. Cependant la dosimétrie n'est pas décrite alors que des effets thermiques peuvent provoquer les mêmes types d'effets.

Etudes sur l'humain :

Une étude (Balik *et al.*, 2005) a été effectuée à partir d'un questionnaire portant sur des effets oculaires potentiels (déformation de la vision, rougissement, larmoiement, inflammation) chez des sujets utilisateurs d'un téléphone mobile. 695 sujets ont répondu et une corrélation a été retrouvée entre l'exposition à un téléphone mobile et le larmoiement et l'inflammation des yeux, mais pas sur la déformation de la vision et le rougissement. Cette étude présente un biais car elle est fondée sur un questionnaire et non sur des données objectives.

Schmid *et al.* (2005) ont réalisé 4 tests sur 58 sujets volontaires pour étudier les effets des radiofréquences sur le cortex visuel : i) un test de capacité de discrimination visuelle (*Critical Flicker* et *Fusion Frequency test*), ii) un enregistrement de la perception concentrée et ciblée et de l'attention sélective dans une zone visuelle (*Visual pursuit Test*), iii) un test de performances de perception optique et de vitesse de perception (*Tachistoscopic Traffic Test Mannheim*), iv) un test de seuil de sensibilité contrastée (*ComputVist system*). Les sujets ont été exposés à des signaux UMTS (WCDMA) de 1 970 MHz avec plusieurs DAS : soit de 0,63 W/kg ou 0,37 W/kg selon la quantité de tissu cérébral considérée, soit un DAS plus faible (1/10 de l'autre valeur) et *sham* de 15 h 30 à 19 h 00 pendant 1 semaine. Aucune différence dans les résultats aux tests n'a été retrouvée après comparaison des différentes conditions. Le système utilisé a été bien décrit, de même que la dosimétrie.

Irlenbusch *et al.* (2007) ont exposé 33 sujets à un signal GSM de 902,4 MHz pendant 30 minutes (DAS rétinien de 0,007 W/kg et de 0,003 W/kg). Ils ont étudié le seuil de discrimination visuelle (*visual discrimination threshold*) ou VDThr. Aucune différence significative dans les résultats obtenus n'a été notée entre les expositions *shams* et les expositions réelles. Les auteurs concluent à une absence d'effet des GSM sur la rétine et le cortex visuel.

En résumé sur les 5 articles étudiés, les 2 articles réalisés in vitro montrent des effets des radiofréquences soit sur des cristallins de veaux (Dovrat et al., 2005), soit sur des cellules ganglionnaires rétiniennes provenant de souriceaux nouveaux-nés (Zhou et al., 2008). Cependant, ces deux études ne peuvent être prises en compte du fait de l'absence de dosimétrie.

Concernant les études humaines, l'une conclut à de possibles effets oculaires de l'utilisation d'un téléphone mobile sur le larmoiement et l'inflammation des yeux (Balik et al., 2005). Cette conclusion est seulement établie à partir d'un questionnaire rempli par les sujets interrogés, sans appréciation de critère objectif. En revanche, les deux autres ne montrent pas d'effet sur la rétine et le cortex visuel en utilisant des paramètres objectifs (Schmid et al., 2005 ; Irlenbusch et al., 2007).

En conclusion, en condition non thermique, aucun effet oculaire objectif n'apparaît après exposition aux radiofréquences.

4.4.1.12 Effets sur le système cardio-vasculaire

Le système cardio-vasculaire est indispensable au bon fonctionnement des autres systèmes de l'organisme. Il est constitué de 3 éléments : une pompe (le cœur), d'un système de canaux (vaisseaux sanguins) et d'un liquide circulant (le sang). Les principales fonctions du système cardio-vasculaire sont :

- L'apport de l'oxygène et des nutriments aux cellules

- L'élimination du CO2 et des déchets métaboliques
- Le transport des hormones
- La régulation de la température et du pH du corps
- La prévention (partie immunitaire)

Les 5 articles étudiés suivants concernent tous des études réalisées chez l'humain

Kantz *et al.* (2005) ont étudié les effets des radiofréquences sur les fonctions cardio-vasculaires chez 50 volontaires issus de l'Université de Stuttgart. Ils les ont exposés à des ondes allant de 5,8 à 110 GHz pendant 15 minutes. En fait, deux expositions de 15 minutes séparées de 15 minutes étaient réalisées en double aveugle : une exposition véritable et une exposition *sham*. Ont été mesurés : le rythme cardiaque grâce à un ECG, la température de la peau par un thermocouple, la conductance de la peau par des électrodes, les pressions systolique et diastolique par un appareil automatique. Les résultats étaient comparables entre ceux obtenus avec une exposition véritable et ceux obtenus avec une exposition *sham*. Les auteurs concluent à une absence d'effet des microondes allant de 5,8 à 110 GHz sur les fonctions cardio-vasculaires. Cependant, l'étude est incomplète : il n'y a pas de dosimétrie, le système d'exposition et n'est pas décrit.

Atlasz *et al.* (2006) ont comparé deux méthodes pour étudier le rythme cardiaque (HR ou heart rate) et sa variabilité (HRV pour HR variability) chez 35 jeunes adultes exposés ou non à des radiofréquences : la pléthysmographie et l'ECG (électrocardiogramme). La pléthysmographie est une méthode servant à mesurer le flux sanguin qui peut être utilisée si l'ECG n'est pas réalisable (par exemple en cas d'interférence avec certaines conditions expérimentales). Les sujets ont été exposés pendant 10 minutes à un signal GSM 900 émis par un téléphone mobile. Les témoins sont exposés avec un téléphone muni d'une charge pour simuler les mêmes conditions. Quatre mesures ont été effectuées à 0, 30, 50 et 70 min après l'exposition et 150 pulsations individuelles analysées pour chaque section expérimentale. Les résultats n'ont montré aucune différence entre les résultats obtenus par pléthysmographie et par l'ECG. Aucune différence non plus n'a été obtenue dans les valeurs de HR ou de HRV entre le groupe exposé et le groupe contrôle. Les auteurs concluent que la pléthysmographie est une technique alternative à l'ECG et que les radiofréquences n'ont pas d'effet sur la régulation du rythme cardiaque chez des adultes jeunes.

Nam et al (2006) ont exposé 42 sujets (dont 21 adolescents et 21 adutes) à des ondes CDMA à 845 MHz pendant 15 et 30 minutes (DAS de 1,6 W/kg). Ils ont étudié les pressions systolique et diastolique (prise automatique), les rythmes cardiaque et respiratoire par pléthysmographie, ainsi que la résistance de la peau avec des électrodes. La résistance de la peau est mesurée électriquement entre deux points et diminue en cas d'activation des nerfs sympathiques par augmentation de la sudation. Aucune différence entre les différents paramètres étudiés dans le groupe adulte n'a été constatée entre les expositions réelles et les *shams*, ni de variation avec la durée de l'exposition. En revanche, une diminution de la résistance de la peau a été observée chez les adolescents après exposition réelle, associée à une corrélation avec la durée de l'exposition. Le retour à la normale s'effectuait 10 minutes après la fin de l'exposition. Le même résultat a été retrouvé chez les hommes adultes (11 au total), mais pas chez les femmes. Les auteurs concluent que la résistance de la peau est sensible aux radiofréquences émises par les téléphones mobiles, avec une sensibilité accrue chez les enfants et les hommes, mais que cette étude nécessite des réplications.

Une autre étude en double aveugle a concerné 150 volontaires (Barker *et al.*, 2007). Les sujets ont été exposés pendant 40 minutes à des signaux GSM ou TETRA en double aveugle. En fait, 6 sessions d'expositions étaient effectuées : GSM Mod (modulation), GSM CW, GSM *sham* et la même chose pour le signal de type TETRA. Trois paramètres ont été

considérés : les taux de catécholamines sanguines (adrénaline et nor-adrénaline) avant et après exposition, le rythme cardiaque pendant l'exposition, la pression artérielle pendant et 24 h post-exposition. Aucune différence significative entre les groupes concernant la concentration en catécholamines, ni de variation dans le rythme cardiaque, ni de variation dans la pression artérielle moyenne au cours de l'exposition ou pendant 24 h après l'exposition n'a été observée. Les auteurs concluent qu'au vu de leurs résultats négatifs et au vu de résultats négatifs également de 2 autres études similaires, il n'est pas nécessaire de continuer à étudier les modifications de la pression artérielle dues aux GSM ou aux TETRA.

Parazzini *et al.* (2007) ont réalisé une étude sur 26 volontaires âgés entre 21 et 28 ans afin d'étudier les effets des radiofréquences sur la variabilité du rythme cardiaque ou HRV (*Heart Rate Variability*). Ils les ont exposés à des ondes de type GSM 900 émises par un téléphone mobile pendant 26 minutes. L'étude, effectuée en double aveugle, comportait deux expositions espacées de 24 h (une réelle et une *sham*) et chaque exposition comprenait deux conditions pour tester le système nerveux autonome : position allongée pendant 13 minutes (tonus vagal) *versus* position debout pendant 13 minutes (activation sympathique) : protocole "*rest-to-stand* ». Un enregistrement ECG par *Holter* accompagnait l'exposition et l'analyse des résultats était effectuée par deux méthodes : analyse en « *time domain* » basée sur l'intervalle RR et analyse en « *frequency domain* » basée sur l'analyse spectrale. La HRV est restée normale pendant les expositions *sham* et véritable. Au passage debout, une bonne réactivité du système nerveux autonome était notée, avec une accélération du rythme cardiaque. De petites différences dans des paramètres très précis qui correspondraient à une légère accentuation de l'activation sympathique ont été trouvées. D'après les auteurs, ces résultats ne remettent pas en cause l'absence d'effet des radiofréquences sur la variabilité du rythme cardiaque.

En résumé, 5 études concernent le système cardio-vasculaire, toutes réalisées chez l'humain. Aucune ne met en évidence d'effets des radiofréquences, que ce soit sur le rythme cardiaque (Kantz *et al.*, 2005 ; Atlasz *et al.*, 2006 ; Nam *et al*., 2006), sur la pression artérielle (Barker *et al.*, 2007 ; Nam *et al*., 2006) ou sur la variabilité du rythme cardiaque (Atlasz *et al.*, 2006 ; Parazzini *et al.*, 2007).

L'étude de Nam et al. (2006) a trouvé des variations de la résistance cutanée induite par les radiofréquences chez les adolescents et les hommes, mais pas chez les femmes. Une étude avec un plus grand nombre de sujets pourrait être répliquée.

En conclusion, les études réalisées sur l'humain montrent une absence d'effet des radiofréquences sur le système cardio-vasculaire, en particulier sur la régulation de la pression artérielle et du rythme cardiaque.

4.4.1.13 Effets sur la mélatonine

La mélatonine, souvent dénommée hormone du sommeil, est surtout connue comme étant l'hormone centrale de régulation des rythmes chronobiologiques, et de pratiquement l'ensemble des sécrétions hormonales, que ce soit chez l'homme et chez tous les mammifères, mais également semble-t-il chez la plupart des espèces animales complexes. Cette neurohormone est synthétisée à partir d'un neurotransmetteur, la sérotonine, qui dérive elle-même du tryptophane, un acide aminé essentiel. Elle est sécrétée par la glande pinéale (dans le cerveau) en réponse à l'absence de lumière.

La mélatonine semble avoir de multiples fonctions, autres qu'hormonales chez l'homme et les mammifères, en particulier comme antioxydant (capture des radicaux libres), participant à

la détoxification de l'organisme. Elle semble aussi jouer un rôle important dans le système immunitaire.

Quatre études portant sur les effets des radiofréquences sur la mélatonine ont été trouvées. Les articles comprennent une revue (Touitou *et al.*, 2006), 2 études effectuées sur des animaux : rats (Hata *et al.*, 2005) ou hamsters (Lerchl *et al.*, 2008), et une chez l'humain (Wood *et al.*, 2006). Les 3 dernières publications sont détaillées ci-dessous selon un ordre chronologique et alphabétique.

Hata *et al.* (2005) ont réalisé une étude *in vivo* sur 208 rats *Sprague-Dawley* (104 mâles, 104 femelles) avec un protocole très strict. Les rats ont d'abord été habitués pendant 2 semaines au cycle "*light-dark*" ou LD (12:12). La période lumière (« *light* ») durait de 20 h 00 à 8 h 00 (luminosité à 400 lux), et la période sombre de 8 h 00 à 20 h 00 (luminosité inférieure à 1 lux). Les rats ont ensuite été répartis en 4 groupes de rats : exposés (64), *shams* (64), contrôles cage (64), contrôles lumière (16). Les contrôles lumière, soumis à 400 lux le dernier jour, servent de contrôles positifs. L'exposition est effectuée au début de la période « *dark* » pendant 4 h (de 8 h 00 à 12 h 00) à des ondes TDMA à 1 439 MHz (DAS de 1,9 W/Kg chez les mâles, de 2 W/kg chez les femelles et de 7,5 W/kg dans le cerveau). Après récupération à 13 h 30 ou 18 h 00 du sang et de la glande pinéale par décapitation (procédures réalisées en lumière rouge inférieure à 1 lux), une mesure des taux de mélatonine et de sérotonine est réalisée par méthode radioimmunologique. Les niveaux de mélatonine dans le sérum et la glande pinéale restent inchangés après exposition aux radiofréquences aux 2 temps explorés, alors que les contrôles positifs montrent une diminution significative du taux de mélatonine dans le sérum et la glande pinéale comparé aux 3 autres groupes. Le taux de sérotonine ne change pas après exposition dans les 3 groupes, alors que dans le groupe contrôle positif une augmentation de son taux dans le sérum et la glande pinéale est constatée. Les auteurs concluent qu'une exposition courte bien au-delà des valeurs limites n'a pas d'effet sur la synthèse de mélatonine et de sérotonine chez le rat dans les conditions expérimentales testées.

Wood *et al.* (2006) ont exposé 55 sujets volontaires (30 hommes et 25 femmes) à un téléphone mobile (30 minutes à 895 MHz) environ 1 h avant l'heure normale de leur coucher. Les sujets ont participé 2 *week-ends* d'affilée (avec 1 nuit pour l'habituation) pour réaliser une exposition réelle et une *sham* effectuées en double aveugle. La production de mélatonine a été estimée selon la concentration de son principal métabolite : le 6-sulphatoxymelatonine (aMT6s) par méthode radioimmunologique dans les urines, selon le volume urinaire et la concentration de la créatinine. Le protocole incluait un recueil des urines immédiatement après exposition (échantillon de 10 ml conservé), un enregistrement du sommeil avec surveillance, un recueil des urines pendant la nuit et un réveil à 6 h avec recueil des urines (échantillon de 10 ml conservé des urines collectées pendant la nuit et au matin). Aucune différence dans le volume des urines n'a été mise en évidence entre l'exposition *sham* et l'exposition réelle. La production totale de aMT6s est restée inchangée de même que les productions avant le coucher et après le lever (si considérées séparément). En revanche, la production de aMT6s s'est révélée diminuée avant le coucher, avec un ratio aMT6s sur créatinine diminué de manière significative en cas d'exposition réelle. Cette différente concerne 4 sujets (3 femmes et 1 homme) sur les 55 testés. Les valeurs redeviennent non significatives si on enlève les 4 sujets « répondeurs ». D'après les auteurs, un délai dans la production de mélatonine chez les 4 individus est possible, mais un artéfact ne peut être exclu.

Dans l'étude de Lerchl *et al.* (2008), 720 hamsters *Djungarian* mâles adultes ont été utilisés pour tester 3 types d'ondes : 383 (TETRA), 900 et 1 800 MHz (GSM). L'exposition a duré 24 h / jour pendant 60 jours à un DAS corps entier de 0,08 W/kg. Les hamsters avaient été habitués à une photopériode 16 h "*light*" / 8 h "*dark*" (ou LD 16:8). Les animaux ont subi une exposition réelle ou une exposition *sham* (120 animaux pour chaque condition). Une pesée par semaine a été réalisée et tous les 10 jours, 20 hamsters ont été castrés unilatéralement.

En fin d'expérimentation, les animaux ont été sacrifiés la nuit (avec des lunettes de vision de nuit). Le sang du tronc et la glande pinéale ont été récupérés et le cerveau, le foie, les reins, et les testicules ont été pesés. La mélatonine a été dosée dans le sang et la glande pinéale par méthode radioimmunologique. Aucune variation de la concentration de la mélatonine entre les animaux exposés et les *shams* n'a été constatée, que ce soit dans le sérum ou dans la glande pinéale. En revanche, une augmentation du poids des hamsters, passagère à 383 MHz, et durable à 900 MHz a été observée, mais pas à 1 800 MHz. Le poids des organes pesés ne montrait pas de différence. Les auteurs concluent que les radiofréquences n'ont pas d'effet sur le taux de mélatonine, mais que des effets sur le métabolisme sont possibles et nécessitent des explorations supplémentaires.

En résumé, trois études seulement sont disponibles et ont été analysées. Aucune ne montre un effet évident des radiofréquences sur le taux de mélatonine *in vivo*. Une étude (Wood *et al.*, 2006) a mis en évidence une diminution du taux de mélatonine avant le coucher juste après une exposition de 30 minutes, sans que la production totale de mélatonine pendant la nuit ne soit affectée. Cependant, cet effet n'a été retrouvé que chez 4 sujets sur un total de 55 et nécessite un plus grand nombre de sujets étudiés pour conclure ou non à un artéfact.

En conclusion, le taux de mélatonine produit par des animaux ou par des sujets humains ne semble pas varier après exposition aux radiofréquences.

4.4.1.14 Autres effets

Ce chapitre comprend des paragraphes qui n'ont pas pu être classés dans les autres chapitres, notamment concernant les effets sur la moelle osseuse, et les effets sur diverses activités et/ou mécanismes cellulaires.

4.4.1.14.1 Effets sur la prolifération cellulaire

La prolifération cellulaire peut être estimée par comptage des cellules et l'évaluation de la viabilité cellulaire en comptant les cellules mortes par rapport aux cellules vivantes à l'aide d'une coloration spécifique. C'est un paramètre couramment estimé en parallèle à d'autres expériences dans de nombreuses études *in vitro* sans représenter un sujet en soi et aucun effet des radiofréquences n'a à ce jour été démontré à ce niveau.

Trois études *in vitro* n'ont porté que sur la prolifération de cellules : une pour des bactéries (Askoy *et al.*, 2005), une sur des cellules d'ovaires de drosophiles (Panagopoulos *et al.*, 2007) et une sur la lignée cellulaire V79 (Pavicic *et al.*, 2008). Toutes ces études font état d'effets des radiofréquences, mais aucune ne présente de dosimétrie correcte.

En particulier, les deux premières utilisent un système d'exposition incorrect (téléphone mobile) comme système d'exposition et ne seront pas détaillées ici.

Pavicic et Trosic (2008) ont exposé des cellules en culture pendant 1, 2 et 3 h à deux fréquences (864 et 935 MHz) en onde continue avec des DAS de 0,08 W/kg et 0,12 W/kg. La dosimétrie est faite par un calcul, sans mesure physique ni simulation numérique. Pour les deux fréquences, la viabilité est inchangée, que les cellules aient été exposées 1, 2 ou 3 h ou pas exposées. La croissance cellulaire est estimée chaque jour, par comptage des colonies, pendant 7 jours après l'exposition. Une différence minime, statistiquement significative dans le sens d'une diminution de la croissance est observée après 72 h de culture pour le temps d'exposition 3 h à 935 MHz et pour les temps d'exposition 2 h et 3 h à 864 MHz. Il n'y a aucun changement sur tous les autres points de mesures par rapport au contrôle *sham*. Les auteurs en concluent qu'il y a un effet dépendant du temps d'exposition et de la fréquence et qu'il pourrait s'agir d'un effet ponctuel (effet fenêtre). Néanmoins, au vu du caractère possiblement aléatoire de cet effet et compte-tenu du fait que l'expérience n'a

été réalisée qu'une seule fois, il est possible de mettre en doute la validité de cette conclusion qui apparaît très prématurée.

En résumé, 3 études *in vitro* concernent la prolifération de cellules. Elles utilisent des bactéries (Askoy *et al.*,2005), des cellules d'ovaires de drosophiles (Panagopoulos *et al.*, 2007) et une lignée cellulaire (Pavicic *et al.*, 2008).

Toutes ces études font état d'effets des radiofréquences, mais aucune ne présente de dosimétrie correcte.

En particulier, les deux premières utilisent un système d'exposition incorrect (téléphone mobile) tandis que la troisième montre un effet très minime pour quelques points de mesures mais pas d'effet sur la viabilité cellulaire. Cependant, ce résultat semble aléatoire compte-tenu du fait que l'expérience n'a été réalisée qu'une seule fois et du fait de l'absence de dosimétrie qui ne permet pas, de plus, d'exclure un effet d'origine thermique.

En conclusion, ces études n'apportent pas d'élements nouveaux et à ce jour, rien n'indique d'effet des radiofréquences sur la prolifération cellulaire à un niveau d'exposition non thermique.

4.4.1.14.2 Effets sur la moelle osseuse

La moelle osseuse est le site de fabrication des cellules sanguines : globules blancs, globules rouges et plaquettes. Elle est située à l'intérieur des os, dans la cavité médullaire.

- effets sur l'érythropoïèse chez le rat

L'érythropoïèse est l'ensemble des processus de production des érythrocytes (globules rouges) dans la moelle osseuse rouge à partir de cellules souches hématopoïétiques totipotentes, sous la dépendance de l'érythropoïétine. L'érythropoïèse dure environ 5 jours, mais en cas de stimulation par l'érythropoïétine, sa durée peut atteindre 2 jours. Les érythrocytes au fur et à mesure de leur maturation vont perdre leur noyau. La présence de noyau dans un érythrocyte signe un état immature.

Trosic et Busljeta (2006) ont étudié les effets d'une exposition subchronique à 2,45 GHz (à un DAS estimé à 1,25 W/kg) sur des rats *Wistar* à raison de 2 h / jour tous les jours jusqu'à 30 jours. Quatre groupes de 6 rats exposés ayant subi 2, 8, 15 ou 30 expositions de 2 h et 4 groupes contrôles correspondants ont été définis. Les rats exposés et les contrôles correspondants ont été sacrifiés 2, 8, 15 ou 30 jours après l'exposition. Des suspensions cellulaires de cellules provenant de la moelle osseuse (BM pour *bone marrow*) et du sang (PB pour *peripheral blood*) ont été étalées sur des lames marquées à l'acridine orange, puis observées au microscope à fluorescence. Deux types de cellules ont été identifiés : erythrocytes polychromatiques ou PCEs (soit BMPCEs ou PBPCEs), et érythrocytes micronucléés (MN)PCEs. Les résultats montrent un taux de BMPCEs augmenté à 8 et 15 jours et PBPCE à 2 et 8 jours. La fréquence des BMMNs était augmentée à 15 jours et celle des PBMNs à 8 jours. Les valeurs affichent une diminution proche des valeurs contrôles à la fin de l'expérimentation. D'après les auteurs, ces résultats sont le reflet d'un effet transitoire des radiofréquences sur l'érythropoïèse. Cependant, cette étude ne présente pas de dosimétrie et de gros écarts-types sont observés dans les résultats. L'étude d'un plus grand nombre de rats par groupe aurait été souhaitable.

- Effets sur les cellules souches précurseurs chez la souris

La greffe de moelle osseuse consiste à remplacer la moelle - et donc la production des cellules sanguines - après sa destruction par radiothérapie ou chimiothérapie. La nouvelle moelle est prélevée sur le donneur par aspiration à l'aiguille et réinjectée par voie

intraveineuse chez le receveur. Les cellules "mères" (ou cellules souches) repeuplent la cavité médullaire désertée et assurent, en principe définitivement, la production de nouvelles cellules sanguines. Certaines vont coloniser les organes lymphoïdes (thymus et rate).

Prisco *et al.* (2008) ont réalisé une étude originale chez des souris afin de tester la capacité des cellules précurseurs de la molle osseuse de coloniser, de se différencier et de restaurer une fonction correcte après exposition sub-chronique à un signal GSM. Des souris C57BL/6 ont été séparées en 3 groupes de 8 : exposé aux radiofréquences, *sham* et contrôle cage. L'exposition a été effectuée en aveugle et s'est déroulée 2 h par jour, 5 jours par semaine pendant 4 semaines. Les souris sont ensuite sacrifiées 24 h après la dernière exposition et la moelle osseuse du fémur est recueillie. Les 3 groupes de souris receveuses ont été irradiés à 9 Gy de rayons X (dose létale), à raison de 2 receveuses pour 1 donneuse. La transplantation a eu lieu 1 h après l'irradiation. Après 3 et 6 semaines suivant la transplantation a lieu un recueil des cellules de la rate et des thymocytes. Plusieurs tests sont réalisés : analyse en cytométrie de flux, calcul de l'index de prolifération à la thymidine tritiée pour les thymocytes (après stimulation à la ConA) et pour les cellules de la rate (après stimulation par un anti-CD3mAB), dosage de l'IFN-γ par technique ELISA. Le comptage des cellules après recueil chez les souris donneuses ne montre pas de différence entre les 3 groupes. Il est noté une mort de toutes les souris receveuses non transplantées, alors que toutes les souris transplantées survivent. Chez celles-ci, une bonne reconstitution du thymus ainsi qu'une bonne récupération de la rate (autant au niveau de sa composante T que de sa composante B) sont observées. Aucune différence significative n'est relevée entre les 3 groupes. Les auteurs concluent qu'une exposition sub-chronique *in vivo* n'affecte pas la capacité des cellules précurseurs de la moelle de coloniser les organes lymphoïdes et de produire de lymphocytes B et T matures.

Sur les 2 articles portant spécifiquement sur les cellules de la moelle osseuse, l'un montre un effet transitoire sur l'érythropoïèse (Trosic et Busljeta, 2006), alors que dans l'autre la capacité des cellules de la moelle osseuse à coloniser les organes lymphoïdes et à les restaurer est conservée après exposition à des radiofréquences (Prisco *et al.*, 2008). Cependant les résultats de Trosic et Busljeta (2006) ne peuvent être retenus du fait de l'absence de dosimétrie et de la dispersion trop importante des résultats.

4.4.1.14.3 Effets sur certaines activités et/ou mécanismes cellulaires

- Effets sur l'activité de l'ornithine décarboxylase (ou ODC)

L'ODC est une enzyme de la famille des lyases libérant le groupement carboxyle de l'acide aminé ornithine. Il y a production de putrescine (1,4-diaminobutane), diamine primaire qui alcalinise le milieu. L'ODC est une des principales enzymes catalysant la conversion d'ornithine en putrescine, l'une des polyamines indispensable à la croissance cellulaire. La prolifération cellulaire s'accompagne d'une augmentation de l'activité et de la concentration intracellulaire des polyamines. Les facteurs de croissance et les promoteurs tumoraux génèrent aussi une induction de l'activité de l'ODC. Une augmentation de l'activité de l'ODC sur des cellules exposées serait donc un marqueur d'activité et de prolifération cellulaire accrues.

Höytö *et al.* (2006 et 2007) se sont focalisés sur l'étude de l'activité de l'ODC *in vitro* après exposition à des radiofréquences dans les cellules primaires ou des lignées cellulaires. En 2006, ils ont exposé une lignée L929 de fibroblastes murins à des ondes 900 MHz (CW et GSM) pendant 2, 8 ou 24 h à de faibles DAS (0,2 W/kg et 0,4 W/kg). Ils ont constaté une diminution de l'activité de l'ODC. Cette diminution a été attribuée par les auteurs à des variations de température dans la chambre d'exposition (+0,8°C) objectivée par une augmentation de température mesurée dans l'eau du circuit de refroidissement de la

chambre avec les radiofréquences. Après correction, la différence dans les résultats n'apparaissait plus. Les auteurs concluent que de faibles variations de température peuvent faire varier l'activité de l'ODC et qu'un contrôle strict de la température doit être effectué en cas de mesure de l'activité de l'ODC.

En 2007, la même équipe a réalisé une autre exposition sur plusieurs types cellulaires (Höytö *et al.* ; 2007) : astrocytes primaires de rats *Wistar* et cellules provenant de 3 lignées cellulaires (fibroblastes de souris L929, cellules de glioblastome de rat C6, cellules de neuroblastome SH-SY5Y). Les cellules sont exposées 2, 8 ou 24 h, à des DAS de 1,5 W/kg, 2,5 W/kg (sauf pour astrocytes) et 6 W/kg à 872 MHz en CW ou en GSM. Après exposition en GSM ou en CW, l'activité de l'ODC montre une diminution dans les cellules primaires et non dans les lignées, aux DAS de 1,5 et 6 W/kg après 2 ou 8 h d'exposition. Les résultats semblent un peu discordants pour l'exposition de 24 h dans la mesure où la diminution de l'activité de l'ODC n'est retrouvée qu'en GSM (et non pour les CW) pour un DAS à 6 W/kg (et non pour les autres DAS). Il faut noter que des variations de température sont signalées en cours d'expérimentation.

La même équipe a publié un troisième article sur le même thème (Höytö *et al.* ; 2008). Des cellules provenant d'une lignée cellulaire (cellules L929 provenant de fibroblastes murins) ont été exposées 1 h et 24 h à des ondes GSM ou CW (872 MHz, DAS de 5 W/kg), avec ou sans stress cellulaire (privation de sérum), avec ou sans stimulation (changement de milieu). Les auteurs ont mesuré l'activité de l'ODC, de la caspase 3 et la prolifération cellulaire. Aucune variation de ces 3 paramètres n'a été observée après exposition aux radiofréquences, avec ou sans stress, avec ou sans stimulation. Les auteurs concluent que les radiofréquences n'induisent pas de variation des paramètres mesurés en ondes continues ou pulsées, et qu'un état physiologique modifié (stress ou stimulation) ne change pas la réponse cellulaire aux ondes.

- Effets sur l'endocytose

L'endocytose est un phénomène membranaire faisant partie des mécanismes de transport avec mouvement. L'endocytose (ou internalisation) a lieu quand une partie de la membrane entoure complètement une particule mineure, sans gros volume, et la fait pénétrer de l'extérieur vers l'intérieur d'une cellule. Ce mécanisme membranaire (ou quasi-membranaire) est très important dans la vie d'une cellule, car il permet l'internalisation dans le cytosol de molécules spécifiques grâce à des récepteurs spécifiques dans la cellule. Plusieurs types d'endocytose existent : endocytose médiée par un récepteur entraînant la formation de vésicules de clathrine, endocytose médiée par la cavéoline, endocytose indépendante de la clathrine et de la cavéoline et macropinocytose.

Mahrour *et al.* (2005) ont étudié l'endocytose grâce à la technique de capture du *Lucifer Yellow* (LY) et de *FITC-Dextran fluorescent* (LD) sur 3 lignées cellulaires : cellules B16-F1 provenant de mélanome murin, cellules DC-3F provenant de fibroblastes pulmonaires de hamster chinois, cellules A253 provenant de carcinome humain de la tête et du cou. Ils ont exposé ces lignées à des ondes de 900 MHz (GSM ou CW) et à des champs électriques impulsionnels (PEF: *pulsed electric fields*). La durée d'exposition variait entre 5 et 90 minutes, le DAS entre 0,6 W/kg et 4,5 W/kg pour les GSM et l'intensité des PEF de 1,1 à 1,5 V/cm. Des techniques d'analyse en spectrofluorométrie et en microscopie à fluorescence étaient ensuite effectuées. Les résultats ont mis en évidence une augmentation de l'incorporation du marqueur (LY ou LD) dans les cellules B16-F1 et A253 exposées aux radiofréquences à des DAS compris entre 2,6 et 4,5 W/kg, mais pas à ceux compris entre 0,6 et 1,3 W/kg pour durée d'exposition supérieure à 10 minutes. L'exposition aux PEF entraînait également une augmentation de l'incorporation du marqueur dans les cellules B16-F1 et A253 exposées aux PEF dépendante de l'intensité des PEF. L'augmentation d'incorporation était retrouvée dans les DC-3F mais plus lente. Les auteurs concluent qu'une augmentation de l'endocytose physiologique est observée après exposition aux radiofréquences, mais au-delà d'un certain seuil de DAS et au-delà d'un certain temps

d'exposition. Ils évoquent l'hypothèse que cette augmentation est en relation avec la composante électrique des ondes.

La même équipe a complété ses résultats 4 années après (Moisescu *et al.*, 2009) toujours en étudiant ont étudié l'endocytose grâce à la technique de capture du *Lucifer Yellow*. Des cellules métastatiques de mélanome murin B16F10 ont été exposées à des ondes GSM (900 MHz, 3,2 W/kg pendant 20 minutes) ou à des PEF (champs électriques impulsionnels, avec des impulsions rectangulaires symétriques de durée 586 µs et 1 à 3 V/cm à la fréquence de 217 Hz[73]). Ceux-ci reproduisent l'augmentation d'endocytose induite après exposition aux GSM constatée dans une étude antérieure, confirmant que l'effet observé est dû à la composante électrique des ondes. Des inhibiteurs de l'endocytose sont utilisés (Chlorpromazine : inhibiteur de la voie médiée par la clathrine, Filipin : inhibiteur de la voie médiée par la cavéoline et éthanol : inhibiteur de l'endocytose médiée par les récepteurs), permettant de montrer que l'endocytose médiée par la clathrine est impliquée dans l'effet induit par les GSM. Cet article est caractérisé par une méthodologie rigoureuse, avec une dosimétrie complète. Puisque des impulsions électriques (courant continu pendant la durée de l'impulsion) reproduisent les effets des champs électromagnétiques, on peut écarter la responsabilité de champs magnétiques dans l'induction de ces effets. Il s'agit d'un effet tout ou rien : en dessous d'un certain seuil, il n'y a aucun effet sur l'endocytose. Ce seuil est trop élevé par rapport aux niveaux atteints *in vivo* à l'intérieur du corps avec les téléphones mobiles.

- Effets sur la mitose

La mitose désigne les évènements de la division cellulaire. Il s'agit d'une duplication « non sexuée » avec division d'une "cellule-mère" en deux "cellules-filles". Elle désigne également une étape bien particulière du cycle de vie des cellules eucaryotes, dit « cycle cellulaire », qui est l'étape de séparation de chaque chromosome de la cellule mère et de leur répartition égale dans chacune des deux cellules filles. Ainsi, chaque « noyau-enfant » reçoit une copie complète du génome de l'organisme « mère ». Elle comprend 5 phases : la prophase, la prométaphase (parfois incluse dans la prophase), la métaphase, l'anaphase et la télophase.

Moisescu *et al.* (2007) ont utilisé une nouvelle technique d'observation microscopique grâce à un système d'images en temps réel qui permet de suivre les évènements cellulaires en continu, en effectuant des contrôles avant et après exposition. Le système conçu permet en effet un couplage entre l'exposition aux ondes et l'observation des cellules au microscope. Les auteurs ont ainsi observé des cellules métastatiques de mélanome murin B16F10 qu'ils ont exposées à des GSM 900 (1 h à 30°C, DAS de 2,2 W/kg) en se focalisant sur les évènements mitotiques. Après exposition aux GSM 900, les auteurs n'ont pas mis en évidence d'altération dans la progression de la mitose ni dans sa durée.

- Effets sur la voie MAPK/Erk

La voie MAPK/Erk fait partie d'un réseau de signalisation intracellulaire qui permet de transmettre des signaux de la membrane jusqu'au noyau afin d'induire différentes réponses cellulaires de division cellulaire ou de différenciation.

Friedman *et al.* (2007) ont exposé deux lignées cellulaires (fibroblastes de rat Rat1 et cellules humaines de carcinome HeLA) à un signal de 872 MHz (DAS de 0,1, 0,2 et 0,31 mW/cm^2, type du signal non donné par les auteurs) pour étudier la voie MAPK/Erk. La durée de l'exposition variait de 0 à 30 minutes. La phosphorylation des protéines ERKs, JNKs et p38MAPKs par *western blot*, le relargage de HB-EGF (sur des membranes isolées)

[73] C'est-à-dire une forme de signal similaire aux modulations d'amplitude d'un signal GSM.

et l'oxydation du NADH (activité NADH-oxydase) ont été évalués. Les résultats montrent une phosphorylation de ERK dans les deux souches mais pas de JNK et MAPK. Les auteurs concluent que la cascade ERK peut être activée par l'exposition aux ondes électromagnétiques. Cependant, aucune dosimétrie n'a été effectuée et les effets observés peuvent correspondre à des effets thermiques.

- Effets sur des modèles *in vitro* de maladie neurodégénérative

Les maladies neurodégénératives sont caractérisées par une mort neuronale augmentée *in vivo*. Certains modèles permettent d'étudier *in vitro* cette mort. Ainsi, on peut provoquer la mort de neurones en culture provenant de cerveaux de rats embryonnaires, ou bien la mort de cellules neuronales provenant de lignée tumorale, généralement issue d'un neuroblastome (tumeur d'origine nerveuse). La mort peut être provoquée par différents toxiques, parfois spécifiques de certains types cellulaires.

Del Vecchio *et al.* (2009) ont utilisé deux types de cellules : une lignée cellulaire cholinergique SN56 et des neurones corticaux primaires de rats embryonnaires. Ils les ont exposés à des GSM 900 de manière continue, respectivement pendant 144 h et 120 h, à un DAS de 1 W/kg. Ils ont également réalisé des co-expositions avec des neurotoxiques : glutamate et peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) pour les neurones primaires, 25-35AA béta-amyloïde et H_2O_2 pour les cellules SN56. Les radiofréquences n'ont pas montré d'effet sur la prolifération et la viabilité des cellules SN56, ni sur la viabilité neuronale. En revanche, un effet en co-exposition a été observé sur les cellules SN56 avec le H_2O_2, à savoir que les radiofréquences ont augmenté la toxicité induite par le H_2O_2. Cet effet n'a pas été retrouvé sur les neurones. Les radiofréquences n'ont pas potentialisé non plus l'action des deux autres toxiques, à savoir 25-35AA béta-amyloïde pour les cellules SN56 et le glutamate pour les neurones primaires. Les auteurs concluent que les radiofréquences peuvent potentialiser un stress oxydatif de cellules neuronales dans certaines conditions. Cette étude comporte une méthodologie correcte.

En résumé, 8 articles ont étudié des activités et/ou mécanismes cellulaires particuliers. Toutes ces études ont été réalisées *in vitro*. En général une équipe s'est intéressée à un mécanisme donné.

Ainsi, l'équipe de Juutilainen et Naarala s'est intéressée aux effets des radiofréquences sur l'activité de l'ornithine décarboxylase (ODC). Dans un premier temps, une diminution de l'activité de l'ODC a été mise en évidence après exposition aux radiofréquences, mais a été attribuée par les auteurs à des variations de température (Höytö *et al.*, 2006). L'étude réalisée en 2007 par les mêmes auteurs montre des résultats discordants avec des variations de température en cours d'expérimentation (Höytö *et al.*, 2007). La troisième étude ne retrouve pas d'effet des radiofréquences sur les activités de l'ODC et de la caspase 3, ni sur la prolifération cellulaire, que ce soit avec ou sans stress, avec ou sans stimulation cellulaire (Höytö *et al.*, 2008).

Les études conduites par l'équipe de Mir ont porté essentiellement sur les effets des radiofréquences sur l'endocytose cellulaire. Mahrour *et al.* (2005) ont mis en évidence une augmentation de l'endocytose physiologique après exposition aux radiofréquences, mais au-delà d'un certain seuil de DAS (2,6 W/kg) et au-delà d'un certain temps d'exposition (10 minutes). Moisescu *et al.* (2009) ont complété les résultats déjà obtenus en montrant d'une part que l'endocytose médiée par la clathrine est impliquée dans l'effet induit par les GSM, et d'autre part que l'effet observé est dû à la composante électrique des ondes uniquement. Les effets observés se produisent avec un seuil de puissance élevé au-delà des normes en vigueur. Ce seuil est trop élevé par rapport aux niveaux atteints *in vivo* à l'intérieur du corps

avec les téléphones mobiles.

Un autre article réalisé par le même groupe a porté sur la durée et le déroulement de la mitose (Moisescu *et al.*, 2007) et n'a pas trouvé d'effets des radiofréquences.

Les deux articles restants et isolés ont trouvé des effets des radiofréquences : une activation de la cascade ERK (Friedman *et al.*, 2007) et une potentialisation du stress oxydatif (Del Vecchio *et al.*, 2009). Les conclusions de l'article de Friedman *et al.* ne peuvent être retenues, car les effets constatés peuvent être en relation avec un effet thermique (absence de dosimétrie). En revanche, l'étude de Del Vecchio *et al.* (2009) a été réalisée avec une bonne méthodologie. La toxicité induite par le H_2O_2 était augmentée sur une lignée cellulaire cholinergique après exposition aux radiofréquences. Cet effet en co-exposition n'a pas été retrouvé sur le deuxième type cellulaire testé, ni en co-exposition avec d'autres toxiques sur le même type cellulaire. L'étude mériterait donc d'être répliquée.

En conclusion, l'activité de l'ODC ne varie pas si la température est constante en cours d'exposition aux radiofréquences. Les effets sur l'endocytose apparaissent à des DAS élevés, non atteints à l'échelle du corps humain. Concernant les deux dernières études montrant des effets isolés, il serait utile de compléter l'étude de Friedman par une analyse dosimétrique complète et de répliquer l'étude de Del Vecchio.

4.4.1.15 Conclusions sur les effets biologiques et cliniques

Les études originales publiées dans des revues anglophones à comité de lecture du 1er janvier 2005 au 1er avril 2009 ont été systématiquement analysées.

De nombreuses études de qualité sont parues aux cours de ces dernières années. Cependant, une proportion importante des études analysées présentent des lacunes méthodologiques, le plus souvent dans la partie dosimétrie, mais aussi, parfois, dans la partie biologie. Cela concerne la majorité des études qui montrent des effets positifs des radiofréquences, mais aussi certaines études négatives.

Il est apparu que trois revues internationales spécialisées, connues pour leur double compétence biologie/physique, prennent en compte quasi systématiquement la qualité des travaux dans ces deux domaines : *Radiation Research*, *Bioelectromagnetics*, *International Journal of Radiation Biology*. Ceci n'exclut pas que des études rigoureuses soient également publiées dans d'autres revues.

D'après le bilan global des analyses, sur 288 articles rattachés aux différentes catégories présentées, 226 articles de recherche ont été analysés, hors revues et articles non anglophones. Il peut être tentant de faire un simple comptage des résultats « positifs » et des résultats « négatifs ». Cependant, comme cela a été précisé précédemment, il est nécessaire de prendre en compte la validité des parties biologique et physique des études.

D'après les analyses systématiques qui ont été faites dans le cadre de cette expertise (cf. paragraphe 4.4.1), il apparaît que :

182 études ont été réalisées *in vivo*, sur l'animal, et *in vitro*, 82 études trouvent des effets biologiques des radiofréquences et 100 n'en montrent pas.

- Parmi les 82 études trouvant des effets, 45 n'ont pas une dosimétrie validée, soit 55 %. Parmi les 37 articles restants, seuls 9 présentent également une

méthodologie très satisfaisante pour la partie biologique. Par conséquent, 11 % des études qui montrent des effets ont une méthodologie rigoureuse pour à la fois les parties physique et biologique.

- Parmi les 100 études ne trouvant pas d'effets, 13 n'ont pas une dosimétrie validée, soit 13 %. Parmi les 87 articles restants, 69 présentent une méthodologie très satisfaisante pour la partie biologique. Par conséquent 69 % des études qui ne montrent pas d'effet ont une méthodologie rigoureuse à la fois pour les parties physique et biologie.

44 études ont été réalisées sur l'humain, dont 20 montrent des effets et 24 n'en montrent pas. Le système d'exposition utilisé étant souvent un téléphone du commerce, le DAS maximal ne dépasse pas les limites réglementaires Il est néanmoins important que l'exposition soit caractérisée rigoureusement pour éliminer la possibilité d'autres effets liés à l'environnement des sujets.

- Parmi les 20 études montrant des effets, 4 équipes ont suivi des protocoles rigoureux pour la partie biologique, soit 20 % des études et seulement 2 équipes ont réalisé les expériences dans des conditions d'expositions parfaitement caractérisées.
- Parmi les 24 études ne trouvant pas d'effet, 17 présentent une méthodologie rigoureuse, soit 71 % des études, mais seulement 3 ou 4 équipes ont réalisé les expériences dans des conditions d'expositions parfaitement caractérisées.

Les résultats des études présentant des lacunes méthodologiques n'ont pas été pris en compte pour formuler des conclusions. Le nombre important de ces travaux s'explique par le fait que les expériences visant à rechercher les effets des radiofréquences sont justement construites de manière à mettre en évidence des effets très faibles et s'appuient donc sur les variations de systèmes biologiques très sensibles susceptibles d'être modifiées au moindre biais si toutes les précautions ne sont pas mises en œuvre.

Cependant, quelques études dotées d'une méthodologie apparemment correcte trouvent des effets mineurs et hétérogènes, elles pourraient être complétées et reproduites.

Les conclusions du groupe de travail sont donc fondées sur des travaux rigoureux et sur des résultats concordants obtenus par plusieurs études différentes.

Au vu de l'analyse détaillée et critique des travaux effectuée par le groupe de travail, et compte tenu par ailleurs de l'état antérieur des connaissances, aucune preuve convaincante d'un effet biologique particulier des radiofréquences n'est apportée pour des niveaux d'exposition non thermiques, dans les conditions expérimentales testées.

A ce jour, il ressort de cette analyse que, en conditions non thermiques, les radiofréquences supérieures à 400 MHz :

- ne modifient pas les grandes fonctions cellulaires telles que i) l'expression génique ; ii) la production de radicaux libres oxygénés (ROS) ; et iii) l'apoptose notamment des cellules d'origine cérébrale (provenant de gliome ou de neuroblastome humains) les plus exposées en cas d'utilisation d'un téléphone mobile ;

- ne sont pas un facteur de stress pour les cellules en comparaison des facteurs de stress avérés. Les seuls effets de stress observés sont des effets thermiques associés à des niveaux d'exposition élevés ;

- ne provoquent pas d'effet génotoxique ou co-génotoxique reproductibles à court ou à long terme et ne sont pas mutagènes dans les tests de mutagénicité classiques ;

- ne provoquent pas d'augmentation d'incidence ou l'aggravation de cancers dans les conditions expérimentales testées. Les résultats convergent donc vers une absence d'effet cancérogène ou co-cancérogène des radiofréquences pour des expositions pouvant excéder 4 W/kg ;

- n'ont pas d'effet délétère sur le système nerveux, que ce soit en termes de cognition et de bien-être, en termes d'intégrité de la barrière hémato-encéphalique ou en termes de fonctionnement cérébral général ;

- n'ont pas d'effet susceptible d'affecter le fonctionnement du système immunitaire ;

- n'ont pas d'impact sur la reproduction et le développement d'après les études les plus récentes et les mieux paramétrées. Cependant, les résultats ne sont pas homogènes, et plusieurs études devraient être répliquées dans des conditions d'expérimentation fiables, avec notamment des données dosimétriques ;

- n'ont pas d'effet délétère sur le système cochléo-vestibulaire après une exposition aiguë.

Et d'après les résultats d'un nombre limité d'études, les radiofréquences supérieures à 400 MHz :

- ne paraissent pas perturber le système cardio-vasculaire, en particulier la régulation de la pression artérielle et du rythme cardiaque ;

- n'auraient pas d'effet délétère sur le système oculaire ;

- ne modifieraient pas le taux de mélatonine chez l'homme.

Quelques études isolées ont porté sur des effets ponctuels, ce qui ne permet pas de donner une conclusion valide. Certaines mériteraient d'être reproduites.

4.4.2 Epidémiologie

Les études épidémiologiques se sont concentrées d'une part sur la recherche d'effets sur la santé et le bien-être des personnes, vivant à proximité des stations de base de téléphonie mobile, et d'autre part sur le risque de développer une tumeur (notamment de la tête et du cou, considérées comme les zones les plus exposées) chez les utilisateurs de téléphones mobiles. Ont été prises en compte des publications parues depuis le précédent rapport de l'Afsset (2005) jusqu'en Juillet 2009 inclus.

4.4.2.1 Stations de base / antennes-relais de téléphonie mobile

L'exposition chronique aux radiofréquences émises par les antennes de stations de base des réseaux de téléphonie mobile a parfois été suspectée d'être à l'origine d'agrégats (*clusters*) de cas de cancers survenant au cours d'une certaine période de temps et au voisinage de ces antennes.

Les clusters de cancers observés par des médecins généralistes en Allemagne autour de la ville de Naila (Eger et al., 2004) et en Israël (Wolf et Wolf, 2004) ont été pris en compte dans le rapport Afsse 2005.

Depuis le dernier rapport de l'Afsse 2005, une seule étude de cluster a été publiée par G. Oberfeld en Autriche, il s'agit d'une étude parue dans la littérature grise. Oberfeld, qui appartient aux services de santé publique du gouvernement provincial de Salzburg, [Oberfeld, 2008] a analysé les cas de cancers survenus dans deux localités autour d'une station de base d'un réseau de téléphonie mobile de voiture (système C-Net, norme NMT, 450 MHz) qui a fonctionné de 1984 à 1997. Pour reconstituer l'exposition suspectée, il a apporté sur le site un émetteur 450 MHz et a mesure les champs en fonction de la distance. Il a alors observé une augmentation des cas de cancers et en particulier de cancers du sein et du cerveau dans un rayon de 200 m autour de l'émetteur et une relation exposition-effet entre l'exposition aux radiofréquences et l'incidence des cancers du sein et du cerveau. Les résultats ont été publiés dans un rapport en janvier 2008, sous le sceau du gouvernement provincial. Mais, il s'est avère qu'il n'y avait jamais eu de station C-Net sur le site étudie. Apres jugement devant un tribunal en Novembre 2008 suite a une assignation des operateurs de téléphonie, et au vu des preuves apportées (photographies aériennes, confirmation par le Ministère des Transports, chronologie officielle du site et liste des sites C-Net), il a accepté de retirer son étude.

Il n'existe qu'un nombre limité d'études épidémiologiques explorant la relation entre antennes-relais et risque de cancers. Ceci tient vraisemblablement au fait que nombre d'instances officielles et de groupes d'experts ne favorisent pas ce type d'études en considérant d'une part que les niveaux d'exposition sont bien plus faibles pour les populations exposées aux stations de base que pour les utilisateurs de téléphones mobiles, et d'autre part que la mesure des expositions individuelles ne peut se déduire simplement de la distance à l'émetteur (Health Council, 2005, Valberg *et al.*, 2007). Le programme *Mobile Telecommunications and Health Research* (MTHR) du Royaume Uni, dans son rapport 2007, note que les mesures d'émission des stations de base indiquent avec certitude que les expositions du public sont faibles, mais n'indiquent pas par elles-mêmes que ces faibles expositions n'aient pas de conséquences sur la santé ; des études épidémiologiques d'individus à divers niveaux d'expositions sont nécessaires pour cela. Mais le MTHR souligne que ces études ne seraient faisables qu'à la condition de pouvoir mesurer avec précision les expositions individuelles aux différentes sources de radiofréquences dans les différentes circonstances de la vie quotidienne. Un moyen de parvenir à cette mesure est l'utilisation d'exposimètres individuels. Le MTHR a utilisé un tel exposimètre, mesurant les expositions dans neuf bandes de fréquences, et obtenu des résultats préliminaires satisfaisants, mais qui montraient toutefois des lacunes pour pouvoir être utilisés à grande

échelle (cf. chapitre 3.5.2) (Mann *et al.*, 2005). C'est avec des exposimètres de ce type qu'ont été conduites les études de Viel *et al.* (2009a et 2009b) à Besancon et à Lyon, soutenues par l'Afsset et récemment publiées (audition du Prof. JF Viel, Viel *et al.*, 2009a et 2009b), et les études de Thomas (2008a et 2008b) en Bavière, et de Berg-Beckoff (2009) dans huit régions urbaines d'Allemagne.

Six études parues depuis 2005 ont exploré l'impact de l'exposition aux stations de base de téléphonie mobile sur les problèmes de santé ressentis par les personnes vivant au voisinage de ces stations.

En Autriche, Hutter *et al.* (2006) ont conduit une étude transversale qui a porté sur 365 sujets vivant depuis plus d'un an à proximité d'une station de base, en milieu urbain et en milieu rural. Pour cette étude, 10 stations de base (5 à Vienne, et 5 en Carinthie) ont été sélectionnées de la manière suivante. Il a été demandé à deux opérateurs de proposer 5 stations situées en zone urbaine et 5 stations situées en zone rurale, en service depuis au moins deux ans, n'ayant pas provoqué d'opposition des riverains lors de leur construction, n'ayant pas d'autre station de base du même opérateur ou d'un autre à proximité (ceci n'a été possible qu'en zone rurale), et émettant de préférence uniquement dans la bande 900 MHz. Vingt et une stations de base ont été ainsi proposées. N'ont été retenues que les stations où la population vivant dans un rayon de 200 mètres était suffisante pour permettre le recrutement d'au moins 18 individus. six stations de base en zone rurale et 7 en zone urbaine ont ainsi été retenues. La sélection finale a été opérée de manière à ce que toutes les régions de Carinthie et 5 districts différents de Vienne soient représentés. Les données concernant les antennes sélectionnées, y compris le diagramme de l'antenne, ont été fournies par les opérateurs. Ces données ont été utilisées pour définir la zone d'étude autour de l'antenne, et y recruter 36 participants par site.

A Vienne, les logements ont été sélectionnés par tirage au sort sur l'annuaire téléphonique. Les sujets ont été approchés par téléphone, et l'étude leur a été présentée comme une étude des relations entre les facteurs de l'environnement et la santé. Pour être éligibles, les sujets devaient être âgés de plus de 18 ans, occuper leur logement depuis plus d'un an et y être présents au moins 8 heures par jour. Le taux de refus a été légèrement supérieur à 40%. En Carinthie, les maisons ont été tirées au sort sur un plan du site et les enquêteurs ont contacté directement les sujets, avec les mêmes critères d'éligibilité. Le taux de refus a été de 32%.

Les entretiens ont été conduits à domicile et les questionnaires et les tests ont été présentés à l'aide d'un ordinateur portable, selon une séquence standard. Les données suivantes ont été recueillies :

- données socio-démographiques, sources d'exposition aux champs électromagnétique au domicile, utilisation de téléphone mobile ;
- évaluation de la qualité de l'environnement : échelle subjective de l'impact possible de différents facteurs sur la santé des sujets (bruits de circulation, particules, stations de base) ;
- évaluation (échelle subjective de Zerssen) de différents symptômes, notamment maux de tête, symptômes d'épuisement et symptômes circulatoires ;
- évaluation des problèmes de sommeil (échelle de Pittsburg) ;
- tests de cognition :
    - test de mémoire à court et moyen terme ;
    - tâche de réaction à un choix simple (carrés de trois couleurs apparaissant au hasard sur l'écran) ;
    - vitesse de perception.

Après la réponse au questionnaire et la réalisation des tests, un rendez-vous a été pris pour effectuer des mesures d'exposition aux champs électromagnétiques de haute fréquence. Ces mesures ont été effectuées par un technicien spécialisé d'un centre certifié de Vienne, dans la chambre à coucher des sujets.

Au total, 365 sujets ont été étudiés (185 à Vienne et 180 en Carinthie), de 18 à 91 ans (âge moyen 44 ± 16 ans), dont 59 % de femmes. Des mesures d'exposition ont pu être effectuées chez 336 sujets. La distance à l'antenne-relais a été calculée par rapport à la localisation des mesures ; elle était de 24 à 600 mètres en zone rurale, et de 20 à 250 mètres en zone urbaine.

Les résultats de cette étude montrent que l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences est en général faible, variant de 0,0002 à 1,4 mW/m^2 pour toutes les fréquences entre 80 MHz et 2 GHz, la plus grande proportion (73 %) de cette exposition provenant des systèmes de télécommunication mobiles. La densité moyenne de puissance était légèrement plus élevée en zone rurale (0,05 mW/m^2) qu'en zone urbaine (0,02 mW/m^2). Pour l'analyse des différents symptômes déclarés, de la qualité du sommeil et des tests de cognition, les estimations de densité de puissance maximum ont été classées en 3 catégories : <0,1 m/Wm^2 (approximativement jusqu'à la médiane), 0,1 – 0,5 mW/m^2 (entre la médiane et le $3^{ème}$ quartile), et >0,5 mW/m^2.

Aucun effet significatif des niveaux d'exposition n'a été trouvé sur les résultats des tests de cognition. La plupart des sujets n'étaient pas inquiets des effets des stations de base sur la santé : dans les zones urbaines et rurales, respectivement 65 % et 61 % des sujets n'exprimaient aucune inquiétude. S'agissant des symptômes subjectifs, il existe une relation entre le niveau d'exposition et les maux de tête, les mains ou les pieds froids et les difficultés de concentration, la relation n'est pas significative pour les autres symptômes. S'agissant de la qualité du sommeil, il n'y a pas de relation significative avec les niveaux d'exposition. Pour le score global de qualité du sommeil, un effet très significatif des inquiétudes à propos des effets négatifs de la station de base sur la santé a été trouvé, avec une moindre qualité de sommeil chez les personnes inquiètes. L'âge aussi exerce une influence significative.

La conclusion des auteurs est que cette étude montre une relation significative entre certains symptômes subjectifs et l'exposition aux champs électromagnétiques de haute fréquence, et qu'en dépit d'une exposition très faible, les effets sur le bien-être et la performance ne peuvent être éliminés, cependant, les mécanismes d'action à ces faibles niveaux sont inconnus.

Ces résultats et leur interprétation ont été contestés par Wolf et Vana, dans une lettre électronique (2006). En premier lieu, Wolf et Vana considèrent qu'il peut y avoir eu un effet de *cluster* dans le choix des adresses des sujets autour des stations de base, et que d'autres influences de l'environnement peuvent ainsi affecter tout un chacun dans le *cluster*, avec pour conséquence la non indépendance des personnes dans le *cluster*. Un tel effet pourrait avoir joué un rôle décisif sur les quelques résultats significatifs. Ils considèrent ensuite que si une correction statistique (de type Bonferroni-Holm) pour tests multiples avait été appliquée, alors aucun des résultats n'aurait été significatif.

En Egypte, Abdel-Rassoul *et al.* (2006) ont conduit, de mars à décembre 2003, une étude transversale à Shebin El-Khom chez 85 personnes (48 hommes et 37 femmes, âge moyen 38 ans) : 37 habitants de l'immeuble sur lequel sont installées des antennes, et 48 employés et ingénieurs agricoles travaillant dans un immeuble de la direction de l'agriculture situé à 10 mètres des antennes. Quatre-vingt employés et ingénieurs travaillant dans un bâtiment de l'administration de l'agriculture situé à environ 2 km ont servi de témoins. Ils ont été appariés sur le sexe, l'âge, l'emploi (ingénieur ou employé), le niveau d'instruction et l'utilisation de téléphone mobile. Les participants n'ont été informés de l'objectif de l'étude qu'à la fin de celle-ci. Aucun des témoins ne vivait à proximité d'une antenne. En moyenne, la durée quotidienne d'exposition était de 8 heures pour les employés de l'immeuble situé sous l'antenne et de 15 heures pour les habitants de l'immeuble situé en face de l'antenne.

L'étude présente une ambiguité dans la localisation des antennes et des immeubles. La figure 1 présente l'immeuble pour les professions agricoles sur lequel est situé la station de base constituée de 3 antennes, alors que le texte indique 37 personnes «vivant actuellement » sous l'antenne, et 48 personnes « travaillant » dans un bâtiment de l'autre côté de la rue, et indique des durées d'exposition pour les employés du bâtiment situé sous l'antenne et pour les habitants de l'immeuble d'en face.

Les participants ont rempli un questionnaire comprenant des données sur leurs antécédents personnels, professionnels et médicaux, et sur leurs affections neuropsychiatriques (maux de tête, irritabilité, problèmes de mémoire, tremblements, vertiges, vision floue et symptômes de dépression (sensation de tristesse). Les participants ont subi un examen clinique général et neurologique, effectué une batterie de tests neurologiques de comportement (tests de vitesse visiomotrice, résolution de problèmes, attention et mémoire) et répondu au questionnaire de personnalité d'Eysenk.

La prévalence de troubles neuropsychiatriques tels que les maux de tête, les problèmes de mémoire, les vertiges, les tremblements, les symptômes de dépression et les troubles du sommeil était significativement plus élevée chez les personnes exposées que chez les non exposées. Les troubles du sommeil étaient plus fréquents chez les personnes situées en face de l'antenne que chez celles situées sous l'antenne (31,3 % contre 10,8 %). Les personnes exposées montraient une moindre performance que les non exposées dans un des tests d'attention et dans un test de mémoire auditive à court terme. Les personnes situées en face de l'antenne montraient une moindre capacité dans le test de résolution de problème que celles situées sous l'antenne. Toutes les personnes exposées ont montré de meilleures performances que les non exposées dans deux tests de vitesse visiomotrice et un test d'attention. Aucune différence entre les personnes exposées et les témoins n'a été observée pour le questionnaire de personnalité. Il est toutefois à noter que si certaines différences observées sont significatives, elles portent souvent sur des effectifs faibles. Il n'y a pas eu de mesures d'exposition, cependant, les mesures effectuées 3 ans avant l'étude par l'Institut National des Télécommunications dans l'appartement situé sous l'une des antennes montrent que la densité de puissance était d'environ 1 mW/m^2. La localisation précise des autres mesures effectuées à proximité des antennes n'est pas indiquée, ces mesures vont de 20 à 67 mW/m^2.

En Allemagne, Heinrich *et al.* (2007) ont conduit une étude expérimentale de terrain sur l'influence d'une station de base UMTS sur la sensibilité des personnes travaillant au voisinage immédiat de l'antenne. L'étude a porté sur 95 sujets (67 hommes et 28 femmes âgés de 26 à 62 ans, médiane : 40 ans) qui travaillaient dans le bâtiment principal de l'Office d'État bavarois pour la protection de l'environnement (LfU) à Augsbourg. L'expérimentation s'est déroulée de la mi-septembre à la mi-décembre de 2003 (pendant un total de 70 jours ouvrables).

La station de base UMTS (fréquence : 2 167,1 MHz, bande passante : 5 MHz, puissance : 20 W, hauteur : 22 m), qui se trouvait sur le toit de l'immeuble de bureaux, a été mise à disposition par les opérateurs (T-Mobile GmbH) à des fins de recherche pendant trois mois avant son raccordement au réseau. L'angle d'inclinaison du faisceau principal (*downtilt*) a été fixé pour l'expérience à 8° afin d'assurer une plus grande exposition des espaces de bureaux sous-jacents.

La station de base était à l'essai pendant les trois mois et est resté opérationnelle ou non pendant un, deux ou trois jours consécutifs. Cela a abouti à six conditions expérimentales différentes en fonction de l'état de fonctionnement (*on / off*) et de la durée (1 à 3 jours). Des mesures de l'exposition à l'UMTS dans les bureaux de tous les sujets ont été effectuées le week-end avec l'émetteur commuté. Les valeurs varient de 0,05 à 0,53 V/m, la moyenne étant de 0,10 V/m (± 0,09 V/m).

L'étude a été menée en double aveugle, ni les expérimentateurs, ni les participants ne pouvaient savoir si l'antenne était en fonctionnement ou non. L'état de fonctionnement ou de

non fonctionnement de l'antenne a été contrôlé par un ordinateur placé dans une pièce fermée, et une configuration du logiciel a veillé à ce qu'aucun téléphone mobile UMTS n'ait pu entrer en contact avec la station de base. En outre, la station de base était alimentée séparément des compteurs d'électricité de l'immeuble.

L'enquête a été réalisée sur 70 jours de travail, *via* un questionnaire en ligne. Le matin à leur arrivée au travail et le soir juste avant de partir, les participants devaient renseigner une liste de symptômes (21 *items*, échelle de 1 à 5). Le soir, les participants devaient en outre dire s'ils pensaient que l'antenne avait été en fonctionnement pendant la journée et, au cas où ils auraient ressenti des effets délétères, s'ils considéraient que ces effets étaient dus à la station de base. Dans la semaine précédant l'étude, une pré-enquête a été menée, comportant, entre autres, des questions d'auto-évaluation de sensibilité à l'électricité. La différence des scores entre les symptômes enregistrés le matin et l'enquête de la soirée a été mesurée. En outre, un total de plaintes du soir a été calculé. L'analyse statistique a été effectuée par des modèles linéaires avec des paramètres d'exposition différents (*on / off*, combiné, subjectif) et en prenant en compte les facteurs qui influencent le potentiel (météorologie, le jour de la semaine, le sexe, sensibilité à l'électricité).

Sur un total d'environ 300 employés, 104 personnes ont participé. N'ont été inclus dans l'analyse que les 95 sujets ayant complété le questionnaire en ligne le matin et le soir pendant au moins 25 % des journées de l'étude.

En général, les plaintes ont augmenté au cours d'une journée de travail (en moyenne 0,16 points de l'échelle pour les maux de tête). Aucun des 21 symptômes n'a montré de différence significative entre le deux états de fonctionnement de la station de base. Il existe une tendance ($p = 0,08$) à un effet de l'exposition réelle sur la différence entre les valeurs du matin et du soir. Parmi les facteurs de confusion potentiels, la sensibilité à l'électricité (c'est-à-dire l' auto-évaluation de l'apparition des symptômes associés aux champs électromagnétiques) a eu un impact significatif sur les scores du soir ($p = 0,036$), mais pas sur la différence des scores. La perception subjective a eu un effet significatif à la fois sur les scores du soir et sur la différence des scores. En outre, les deux scores de symptômes étaient tributaires du calendrier des journées d'étude. Il n'y a eu aucune corrélation entre l'état de fonctionnement réel de l'antenne, et l'évaluation par les participants de l'activation ou non de la station de base (taux de détection correct du fonctionnement de la station de base : 50 %). Les conditions météorologiques (haute et basse pression), ont influencé les différences entre les personnes, avec une augmentation des symptômes les jours de basse pression ($p < 0,05$).

En conclusion, selon les auteurs, la méthodologie en double aveugle s'est révélée appropriée pour cette étude pilote. Il n'a été observé aucune corrélation entre l'exposition à la station de base UMTS et les troubles de l'humeur des participants. Toutefois, les sujets ont rapporté des plaintes de manière plus significative lorsqu'ils ont supposé que la station de base était en fonctionnement. La méthodologie de double aveugle et la mesure des expositions dans les bureaux représentent une amélioration par rapport aux études de terrain précédentes, mais, comme le soulignent les auteurs, elles ne permettent pas de conclure du fait de la petite taille des échantillons. En outre, l'exposition à la station de base était faible, et les différences de scores entre le matin et le soir étaient très faibles et ne variaient que très peu pour la plupart des sujets.

Thomas *et al.* (2008) ont conduit une étude transversale utilisant des exposimètres individuels dans quatre villes de Bavière, d'importance différente : Munich (1,3 million d'habitants), Freising (43 000 h), Ebersberg (11 000 h) et Grafing (12 500 h). Les participants ont été recrutés de janvier 2005 à août 2006, par tirage au sort sur les listes de population de ces villes. L'étude a été « nichée » dans une étude en cours sur l'influence du bruit sur la santé qui avait un taux de réponse de 40 %. Au total, un échantillon de population de 435 adultes de 18 à 65 ans a été constitué : 95 participants à Munich, 111 à Ebersberg, 144 à Freising et 85 à Grafing. Les participants ont été invités à un centre local où ils ont répondu

lors d'un entretien assistée par ordinateur à des questions sur des symptômes aigus et chroniques et sur d'éventuels confondants. Après l'entretien, les participants ont recu un dosimètre de bruit pour une mesure de 24 heures, et il leur a été demandé de porter un exposimètre au bras du côté où ils utilisent le téléphone mobile ou DECT, l'exposimètre étant placé à côté du lit pendant la nuit. Pendant les 24 heures de mesures, il leur a été demandé de tenir un journal sur lequel ils reportaient les symptômes aigus à midi et le soir avant le coucher. Indépendamment de leur participation à l'étude de terrain, il a été demandé à tous les sujets de répondre à un court questionnaire destiné à évaluer un biais de sélection potentiel.

Le questionnaire et le journal exploraient les symptômes chroniques et aigus typiquement mentionnés dans les expositions au téléphone mobile : maux de tête, symptômes neurologiques (par ex. acouphènes) et cardiovasculaires (tachycardie), problèmes de concentration, troubles du sommeil et fatigue. Les symptômes chroniques au cours des 6 derniers mois ont été évalués d'après la « *Freiburger Besshwerdeliste* » sur une échelle de Likert en 5 points (presque chaque jour, environ trois fois par semaine, environ deux fois par mois, une fois tous les 6 mois, jamais). Les troubles du sommeil ont été évalués en additionnant trois questions sur le sommeil, et ont été considérés comme présents si au moins l'un de ces trois *items* était rapporté survenir au moins deux fois par mois. Tous les autres symptômes ont été considérés comme présents s'ils survenaient au moins deux fois par mois. Les *items* du journal ont été pris sur la liste de Zerssen et évalués selon une échelle en 4 points (important, modéré, faible, pas du tout). S'agissant des symptômes neurologiques, trois questions relatives aux acouphènes, à l'engourdissement des mains ou des pieds et au blépharospasme ont été additionnées. Ces symptômes ont été considérés comme présents si l'un de ces trois *item*s était rapporté avec une intensité au moins modérée. Les autres symptômes ont été considérés comme présents s'ils étaient rapportés avec au moins une intensité modérée.

L'exposition aux radiofréquences a été mesurée à l'aide de l'exposimètre ESM-140 (*Maschek Electronics*) enregistrant toutes les secondes les expositions dans les fréquences montantes et descendantes GSM 900 et 1800, UMTS, DECT, WLAN (2,45 GHz), dans les limites de 0,01 à 5 V/m. Les niveaux d'exposition obtenus au cours de la nuit n'ont pas pu être pris en compte car pour enregistrer valablement une exposition moyenne, l'exposimètre ne doit pas rester immobile. Les expositions de la journée ont été totalisées et exprimées en pourcentage des niveaux de référence de l'Icnirp.

Au total, 329 sujets (155 hommes et 173 femmes, plus un sujet de sexe non mentionné) ont porté un dosimètre (67 % à 82 % des sujets recrutés). 89% possédaient un téléphone mobile, et 81 % un téléphone sans fil DECT. 40 % des sujets rapportaient une inquiétude sur les effets sanitaires possibles de l'exposition aux radiofréquences des téléphones mobiles. Un biais de non participation sélective a été analysé : il existe des différences significatives entre les participants à cette étude et les non participants (ou ceux qui ne participaient qu'à l'étude sur le bruit) en ce qui concerne la ville d'origine et la possession d'un téléphone mobile. Les participants étaient plus nombreux à posséder un téléphone mobile (90,4 %) que ceux qui ne participaient qu'à l'étude sur le bruit (84,2 %) ou les non-participants (81,6 %), $p = 0,005$. Le pourcentage de non participants était plus élevé dans les grandes villes (Munich : 34,5 % ; Freising : 31,3 %) que dans les villes de moindre importance (Grafing : 12,7 % ; Ebersberg : 21,5 %), $p < 0,001$.

Les niveaux d'exposition enregistrés étaient très en dessous des niveaux de référence Icnirp et variaient de 0,13 % à 0,58 % par seconde au cours des heures d'éveil. Aucune différence n'a été observée entre les heures de la matinée (0,13 à 0,56 % du niveau de référence Icnirp) et de l'après-midi (0,13 à 0,71 % du niveau de référence Icnirp). Mais, la médiane du niveau d'exposition pendant les heures d'éveil était plus élevée à Munich que dans les villes plus petites comme Grafing et Ebersberg.

Aucune association significative n'a été observée entre l'exposition et les symptômes chroniques ou aigus. Les symptômes chroniques les plus fréquemment rapportés étaient les

troubles du sommeil (58 %) et la fatigue (21 %), alors que seulement 4,2 % des participants rapportaient des problèmes neurologiques chroniques. Mais aucune association significative n'a été observée entre l'exposition et les symptômes chroniques enregistrés au cours des six derniers mois. Le symptôme aigu le plus fréquemment rapporté était la fatigue le soir (43 %), et seulement 6 % des participants se plaignaient de maux de tête à midi. Aucune association significative dépendant de la dose n'a été trouvée entre l'exposition pendant les heures de la matinée et les symptômes aigus rapportés à midi, ni entre l'exposition dans l'après-midi et les symptômes aigus rapportés le soir. Une association inverse non significative a été observée entre l'exposition dans la matinée et la fatigue rapportée à midi (OR = 0,5 [IC 95 % : 0,2 – 1,1]), et entre l'exposition dans l'après-midi et la fatigue rapportée le soir (OR = 0,5 [IC 95 % : 0,3 – 1,0]), à la limite de la significativité. Il est à noter que cette association inverse avait déjà été observée par la même équipe lors d'une étude pilote (Spegel *et al.*, 2006). En outre, les problèmes de concentration à midi étaient moins fréquemment rapportés par les participants dont l'exposition se situait dans le quartile supérieur (OR = 0,3 [IC 95 % : 0,06 – 1,8], non significatif).

Au total, cette étude ne montre aucune association entre l'exposition aux radiofréquences des stations de base de téléphonie mobile et les symptômes chroniques ou aigus rapportés par les participants. Elle montre la faisabilité de cette approche mesurant objectivement l'exposition aux différentes fréquences de télécommunication dans les circonstances de la vie courante. Elle appelle des études plus larges et qui tiennent compte des problèmes liés aux conditions d'utilisation des exposimètres.

La même équipe a conduit une étude utilisant les mêmes approches chez les enfants et les adolescents (Thomas *et al.*, 2008b). Un échantillon de population de 1 498 enfants de 8 à 12 ans et 1 524 adolescents de 13 à 17 ans a été recruté en Bavière dans quatre villes (Munich, 1,3 million d'habitants, Augsburg, 260 000 h., Rosenheim, 60 000 h. et Landsberg, 28 000 h.). Le taux de participation a été de 52 %.

Pour les enfants, un des parents a assisté à l'entretien, les réponses au questionnaire des adolescents ont été recueillies directement. Les symptômes chroniques perçus au cours des six derniers mois ont été évalués : maux de tête, irritation, nervosité, vertiges, fatigue, crainte et problèmes de sommeil. Les symptômes aigus ont été évalués trois fois dans la journée : maux de tête, irritation, nervosité, vertiges, fatigue, et problèmes de concentration. Les expositions ont été évaluées comme dans l'étude précédente au moyen de l'exposimètre ESM-140 (Maschek Electronics) dans trois bandes de fréquences : GSM 900, GSM 1800 incluant l'UMTS et le DECT, et WLAN 2,4 GHz (canaux montants et descendants). Une mesure a été effectuée toutes les secondes, avec un seuil de sensibilité de 0,05 V/m, pendant 24 heures, et pour 54 participants sur 5 jours du lundi au samedi. Les niveaux d'exposition pendant les heures d'éveil ont été totalisés et exprimés en pourcentage du niveau de référence Icnirp.

Pour l'instant, n'ont été publiées que les données de participation et les niveaux d'exposition. Les parents et les adolescents de niveau d'éducation plus élevé, possesseurs de téléphone mobile et intéressés par les questions de santé soulevées par l'exposition aux radiofréquences ont été plus enclins à participer à l'étude que les non-participants. Les médianes des niveaux d'exposition des enfants et des adolescents étaient de 0,18 et 0,19 % des niveaux de référence Icnirp, plus élevées à Munich que dans les villes de moindre importance.

Cette étude, la première à s'adresser à des enfants et des adolescents confirme les faibles niveaux d'exposition mesurés dans l'étude précédente.

En Allemagne, une grande étude transversale a exploré les effets sur la santé de l'exposition aux stations de base de téléphonie mobile. Cette étude a été conduite en deux phases. Dans une première phase, une enquête a été conduite auprès de 51 444 personnes de 14 à 71

ans appartenant à un panel d'institut de sondage : 30 047 (58 %) ont renseigné un questionnaire comportant 38 *item*s sur les stations de base et la santé. Un modèle de régression linéaire multiple a été utilisé pour examiner l'association entre des indicateurs de perception des risques (dont la résidence à proximité d'une station de base de téléphonie mobile) et la santé perçue. 18,7 % des participants étaient inquiets des effets sanitaires des stations de base, et 10,3 % (additionnels) attribuaient leurs problèmes de santé personnels à l'exposition à ces stations de base. Les participants inquiets des effets sanitaires ou qui attribuaient des effets sanitaires aux stations de base de téléphonie mobile, et ceux vivant à moins de 500 m d'une station de base de téléphonie mobile (51 % de l'échantillon), rapportaient un peu plus de plaintes de santé que les autres participants. La prévalence de l'*inquiétude* et de l'*attribution* varie en fonction de l'âge (maximum entre 30 et 59 ans), du niveau d'éducation (prévalence plus élevée chez les personnes ayant reçu une éducation supérieure), du revenu (la prevalence de l'inquietude augmente avec le revenu), et de la région (prévalence plus élevée dans le Sud) (Blettner *et al.*, 2009).

La seconde phase de cette enquête a visé à rechercher s'il existait une association entre les problèmes de santé rapportés par les participants et l'exposition aux radiofréquences à leur domicile (Berg-Beckhoff *et al.*, 2009). A cet effet, 100 % des participants de huit régions urbaines (Berlin, partie Ouest de la Ruhr, Hambourg, Cologne/Bonn, Munich, Dresde, Hanovre, Stuttgart) à la première phase de l'enquête ont été recontactés. 85 % des participants (soit 3 526 sur un total de 4 150) ont répondu (par voie postale) à plusieurs questionnaires de santé standardisés et validés, explorant la qualité du sommeil, les maux de tête, les affections psychosomatiques, la santé physique et mentale et le stress chronique (le *Pittsburgh Sleep Quality Index* – 8 *items* (PSQI), le *Headache Impact Test* - 6 *items* (HIT-6), la liste des « *psychosomatic complaints* » - 24 *item*s (liste von Zerssen), le profil de santé physique et mentale – 36 *item*s (SF-36), et une version courte du *Trier Inventory of Chronic Stress* (TICS — 12 *item*s), et les scores correspondants ont été calculés. Il était en outre demandé aux participants de remplir un questionnaire explorant leurs inquiétudes à propos des stations de bases et leur demandant s'ils attribuaient leurs propres effets sanitaires à ces stations. 1 808 participants (51,3 %) ont accepté que des mesures de champs radiofréquences soient effectuées à leur domicile, ce qui a pu être effectué chez 1 500 personnes. Ces mesures ont été effectuées au moyen de l'exposimètre EME Spy 120 de SATIMO, dans la chambre, pendant la journée et selon une procédure standardisée soigneusement décrite dans la publication. S'agissant des bandes de fréquences utilisées pour la téléphonie mobile, seuls ont été pris en compte les signaux descendants (émis par les antennes de stations de base vers les téléphones mobiles) puisque l'étude était orientée vers la mesure de l'exposition résidentielle. Les mesures effectuées chez 83 personnes ont dû être exclues des analyses à cause d'un dysfonctionnement de l'exposimètre, et 27 personnes ont dû être exclues à cause d'une discordance dans l'évaluation de l'exposition entre les réponses au questionnaire et les mesures. Au total, des mesures ont donc pu être effectuées chez 1 326 personnes qui avaient répondu aux questionnaires. Dans 65,8 % des maisons, la valeur moyenne totale du champ mesuré pour les fréquences descendantes était inférieure à la limite de sensibilité de l'exposimètre (0,050 V/m). Le 90ème percentile était de 0,1 V/m, l'exposition étant plus faible dans les zones rurales (5,9 % des mesures au dessus du 90ème percentile et un maximum de 0,577 V/m), et la valeur maximum d'exposition étant retrouvée en ville : 1,141 V/m. Pour les 5 scores de santé explorés, il n'a pas été montré de différence entre les médianes des scores des individus exposés (mesures du champ de fréquences descendantes > 1 V/m) et non exposés. Mais une association entre la perception des risques et l'expression des problèmes de santé a été mise en évidence. Les participants attribuant des effets néfastes pour la santé aux stations de bases de téléphonie mobile avaient plus de problèmes de troubles du sommeil que les autres.

Cette étude transversale ne met pas en évidence d'association entre les stations de base de téléphonie mobile et les troubles de santé étudiés (qualité du sommeil, maux de tête, affections psychosomatiques, santé perçue et stress chronique). Cependant, elle montre que les troubles du sommeil et les problèmes de santé rapportés par les participants à cette

étude sont liés à l'attribution de ces effets aux stations de base de téléphonie mobile. Les auteurs concluent que les inquiétudes et les problèmes de santé des personnes vivant à proximité des stations de base doivent être pris au sérieux et qu'il faut améliorer la communication du risque avec les personnes concernées.

Etude en cours

Une étude cas-témoins de l'incidence des cancers chez les jeunes enfants en fonction de la proximité des stations de base de téléphonie mobile, financée par le programme MTHR anglais est actuellement en cours, sous la direction du Prof. Peter Elliot (Imperial College, Londres). Les résultats n'en sont pas encore connus.

Conclusion

Cinq études transversales publiées depuis 2005 ont exploré les problèmes de santé ressentis par les personnes exposées aux antennes-relais de téléphonie mobile. Deux de ces études (Hutter et coll, 2006, Heinrich et coll, 2007) ont associé des mesures d'exposition effectuées sur les lieux de vie (chambre ou bureau) des participants à la réponse à des questionnaires. Deux études ont utilisé des exposimètres individuels (Thomas *et al.*, 2008a et 2008b, Berg-Beckhoff *et al.*, 2009). Deux études indiquent une association entre certains troubles ressentis par les participants et leur exposition aux radiofréquences émises par les antennes-relais (Hutter *et al.*, 2006, Abdel-Rassoul *et al.*, 2006), mais leur interprétation est sujette à caution. Trois études (Heinrich *et al.*, 2007, Thomas *et al.* 2008a et Berg-Beckhoff *et al.*, 2009) ne montrent pas d'association entre les symptômes ressentis par les participants et leur exposition aux radiofréquences (N.B. Les résultats de l'étude de Thomas *et al.*, 2008b, sur les enfants et les adolescents ne sont pas encore publiés). Et deux études indiquent que certains symptômes ressentis sont significativement liés à la perception du risque (Heinrich *et al.*, 2007) ou à l'attribution des symptômes ressentis aux stations de base de téléphonie mobile (Berg-Beckhoff *et al.*, 2009).

La question des effets des antennes-relais de téléphonie mobile sur les symptômes rapportés reste donc ouverte et nécessite des études approfondies avec des effectifs suffisants et des protocoles de la qualité de ceux utilisés par Hutter *et al.* 2006 (étude d'observation) ou de Heinrich 2007 (étude expérimentale).

4.4.2.2 Exposition aux téléphones mobiles et sans-fil

4.4.2.2.1 Tendances temporelles d'incidence et de mortalité des tumeurs cérébrales

Avec les usages actuels de la téléphonie sans fil, les tumeurs cérébrales sont les tumeurs humaines les plus susceptibles d'être influencées par l'exposition à cette nouvelle technologie qu'est la téléphonie mobile (*cf*. chapitre 3).

Muscat *et al.* (2006) ont analysé les tendances temporelles de l'incidence ajustée sur l'âge d'une variété histologique rare (environ 1 %) des tumeurs cérébrales, les tumeurs neuroépithéliales, dans les registres du programme américain SEER (*Surveillance, Epidemiology and End Results*) entre 1973 et 2002. L'incidence ajustée sur l'âge des tumeurs neuronales n'a pas varié entre 1973 et 2002, elle était de 0,01/100 000 [IC 95 % : 0,00 – 0,02] pour 1973 - 1985 et de 0,01/100 000 [IC 95 % : 0,01 – 0,01] pour 1986 - 2002. Toutefois, étant donné la rareté de ces tumeurs, le groupe de travail doute de la capacité de cette étude à déceler un changement d'incidence.

En Suisse, où la téléphonie mobile (d'abord analogique) a été introduite dès 1987, une analyse des données du registre de mortalité national suisse pour la période 1969 - 2002

montre que les taux standardisés sur l'âge (population européenne) de mortalité par tumeur cérébrale ont augmenté de 3,7 à 6,7/100 000 chez les hommes et de 2,5 à 4,4/100 000 chez les femmes, l'augmentation des taux étant plus prononcée dans les années 1970 et 1980 que dans les années 1990. L'analyse par groupes d'âge de cette augmentation montre qu'elle concerne essentiellement les individus de plus de 60 ans, alors que chez les individus de moins de 60 ans les taux de mortalité par tumeur cérébrale sont restés relativement stables dans les deux sexes. Pour la période récente 1987 - 2002, la mortalité est restée relativement stable dans tous les groupes d'âge, et en particulier chez les moins de 60 ans qui ont été les premiers utilisateurs réguliers de téléphones mobiles (par exemple, pourcentages de changement annuels pour le groupe d'âge 45-59 ans : -0,3 % [IC 95 % : -1,7 – 1,1] chez les hommes, et -0,4 % [IC 95 % : -2,2 – 1,3] chez les femmes) (Röösli *et al.*, 2007). Néanmoins, de telles données ne peuvent être considérées sans tenir compte d'une part d'un éventuel temps de latence entre l'exposition et la survenue de la pathologie et d'autre part des progrès thérapeutiques qui augmentent la durée de survie des patients et « décalent » la mortalité aux tranches d'âge les plus élevées.

En France, une étude récente des données du réseau FRANCIM et du CepiDC montre que l'augmentation annuelle de l'incidence des tumeurs du système nerveux central n'est plus que de 0,1 % pour les hommes et 0,6 % pour les femmes pour les années 2000 à 2005, alors qu'il était de 0,2 % et de 1,1 % respectivement pour la période 1980 - 2005. La mortalité par tumeurs du système nerveux central augmentait annuellement de 0,8 % pour les hommes et 1 % pour les femmes entre les années 1980 et 2005. Elle a diminué annuellement de 0,6 et 0,9 % chez les hommes et les femmes pour la période 2000 - 2005 (Belot *et al.,* 2008). Si l'on considère un temps de latence de 5 ou 10 ans entre l'apparition potentielle des tumeurs et l'exposition aux combinés de téléphonie mobile, l'évolution observée pour la période 2000-2005 est à rapprocher du déploiement des abonnements de téléphonie mobile de la période 1995 - 2000 ou 1990 - 1995, encore embryonnaire à cette époque.

Conclusions

L'ensemble de ces données laisse penser que la croissance de l'utilisation du téléphone mobile n'est pas corrélée aux tendances temporelles d'incidence des tumeurs cérébrales. Une même constatation est faite concernant la mortalité. Cependant, il est vraisemblablement trop tôt pour tenter des rapprochements de ce type. De plus, ce type d'analyse a une capacité très limitée à montrer une association entre une exposition et l'occurrence d'une pathologie (Doll et Peto 1981).

4.4.2.2.2 « Bases » des téléphones DECT

Peu d'études se sont intéressées spécifiquement au risque de tumeurs cérébrales lié à la proximité d'une station de base DECT (*Digital Enhanced Cordless Telephone*). Hardell a étudié l'*utilisation* de téléphone sans fil, mais il s'agissait vraisemblablement d'appareils d'un type ancien qui ne sont plus en utilisation actuellement. Aujourd'hui, la quasi totalité des téléphones fixes « sans fil » commercialisés sont de type DECT.

Une étude en Allemagne, dans le cadre du projet Interphone (Schüz, 2006), a spécifiquement testé l'hypothèse que l'exposition continue à des champs électromagnétiques faibles puisse augmenter le risque de gliome ou de méningiome. En annexe à l'étude Interphone principale, les auteurs ont recherché si une base de téléphone sans fil DECT était localisée à proximité du lit (ceci représentant une exposition continue faible à des champs radiofréquences pendant la nuit). Les expositions ont été classées comme « avérée » ou « possible ». Les *odds ratios* pour les gliomes et les méningiomes, en combinant les deux catégories d'exposition, sont respectivement de 0,82 [IC 95 % : 0,29 – 2,33] et de 0,83 [IC 95 % : 0,29 – 2,36], et il n'y a pas d'indication que le risque augmente avec la durée

d'exposition. Cette étude n'indique pas d'excès de risque de tumeurs cérébrales lié à l'exposition continue à de faibles champs électromagnétiques radiofréquences de type DECT. Mais elle a toutefois une portée limitée en raison du petit nombre de cas et de témoins exposés (5 cas et 13 témoins pour les gliomes comme pour les méningiomes - Tableau 12).

4.4.2.2.3 Téléphones mobiles

De nombreuses publications sont parues depuis le rapport (Afsse, 2005). En fait, la très grande majorité des études portant sur l'utilisation du téléphone mobile sont parues après 2005 : 9 des 14 études sur les gliomes, par exemple. Ces publications émanent du *consortium* Interphone, et du groupe de Hardell. Une actualisation de la cohorte danoise a été publiée. En outre, la publication des premiers résultats d'Interphone a suscité nombre d'éditoriaux et de revues, ainsi que des commentaires et réactions. Seules ont été prises en compte dans la présente analyse les publications originales, présentant de nouveaux résultats ou une ré-analyse d'études antérieurement publiées, et les commentaires publiés apportant un éclairage sur ces résultats. Les méta-analyses publiées à ce jour sont analysées dans une autre section de ce rapport.

A noter que les premiers résultats de l'étude Interphone suédoise figuraient dans le précédent rapport de l'Afsse (2005) dans la mesure où le groupe de travail avait pu disposer de la thèse de S. Lönn, ils sont repris ici car ils ont été publiés en 2005, postérieurement à la publication du précédent rapport.

Nous décrivons dans un premier temps les études et leur protocole et synthétisons dans un second temps les résultats par pathologie.

L'étude Interphone

L'étude Interphone est une étude cas-témoins multinationale dont l'objectif est d'étudier si l'utilisation de téléphone mobile augmente le risque de cancer, et plus précisément si les champs radiofréquences émis par les téléphones mobiles sont cancérigènes. L'étude est centrée sur les tumeurs se développant dans les tissus les plus exposés aux champs radiofréquences émis par les téléphones mobiles : les gliomes, les méningiomes, les neurinomes du nerf acoustique et les tumeurs de la glande parotide. L'étude Interphone a été lancée après qu'une étude de faisabilité conduite entre 1998 et 1999 dans 14 pays a montré qu'il y avait une utilisation suffisante de téléphone mobile dans le passé dans les régions participantes pour qu'une étude internationale, basée sur une période de recrutement de 2 ans, ait une puissance de presque 100 % de détecter, avec un risque alpha de 5 %, une augmentation de risque de 1,5 des tumeurs d'intérêt associée à l'utilisation de téléphone mobile dans les 5 années précédentes. Pour une utilisation de 8 ans ou plus, la puissance de l'étude est légèrement moindre pour certains types de tumeurs (Cardis et Kilkenny, 1999). L'étude Interphone est basée sur l'hypothèse d'un effet promoteur de l'exposition aux radiofréquences des téléphones mobiles. En effet, selon l'avis de plusieurs groupes d'experts, s'il existe un effet cancérigène de l'exposition aux radiofréquences, le mécanisme le plus vraisemblable est un effet de promotion ou de progression. Le protocole de l'étude Interphone mentionne donc que l'on peut ainsi s'attendre à ce que la période de latence (c'est-à-dire le temps écoulé entre l'exposition et le cancer qui lui est associé) soit plus courte que si les radiofréquences agissaient comme un agent d'initiation. Et l'effet de l'exposition pourrait donc être éventuellement observé dans les 5 à 10 années suivant l'exposition (Cardis et Kilkenny, 2001).

Le protocole détaillé de l'étude Interphone (en anglais seulement) est accessible sur le site du CIRC[74], site sur lequel on peut également trouver une mise à jour régulière des résultats

[74] www.iarc.fr/en/research-groups/RAD/INTERPHONEStudyProtocol.pdf

publiés de l'étude Interphone. La plus récente de ces mises à jour date d'octobre 2008[75]. Un résumé assez détaillé des procédures de l'étude Interphone figure dans la section *Matériel et Méthodes* de la publication de l'étude française (Hours *et al.*, 2007).
L'étude Interphone a été conduite dans 13 pays : Allemagne, Australie, Canada, Danemark, Finlande, France, Israël, Italie, Japon, Nouvelle Zélande, Royaume Uni, Norvège et Suède. Entre septembre 2000 et octobre 2003, elle a recruté 2 765 cas de gliomes, 2 425 cas de méningiomes, 1 121 cas de neurinomes du nerf acoustique, 109 cas de tumeurs malignes de la parotide et 7 658 témoins, âgés de 20 à 69 ans. Elle a été conduite en utilisant un protocole de base commun (des études annexes ont pu être conduites localement, par exemple pour des expositions professionnelles en Allemagne, pour une étude des tumeurs de l'hypophyse au Royaume Uni, ou pour des études d'interactions gènes-environnement) (Cardis *et al.*, 2007).
Le financement de l'étude Interphone a été assuré par des sources multiples. La coordination de l'étude internationale et du recueil des données nationales en Europe et en Israël a été financée par l'Union européenne (Programme Qualité de Vie, contrat QLK4-1999-01563) et par l'Union internationale contre le Cancer (UICC). Des financements locaux et nationaux en Europe et dans le reste du monde, provenant de sources non commerciales et d'organisations de financement de la recherche ont également été mobilisés. Pour le financement de l'étude Interphone, l'UICC a reçu des fonds du *Mobile Manufacturers' Forum* et de l'Association GSM. Le financement des chercheurs de l'étude Interphone, à travers l'UICC, a été régi par des accords garantissant à l'étude Interphone une totale indépendance scientifique. Notamment, l'UICC conserve la pleine responsabilité de la surveillance scientifique et de l'utilisation de ces fonds, ainsi que de leur gestion financière, toutes les décisions concernant la conduite de l'étude, les analyses à mener, l'interprétation et la publication des résultats sont prises par le *consortium* Interphone, et finalement, les financeurs n'ont accès à aucun des résultats avant leur publication (ils peuvent cependant en être informés sept jours *maximum* avant la publication des résultats, sous respect de strictes clauses de confidentialité) (Source : CIRC).
Le protocole Interphone comporte une *interview* en face à face, assistée par ordinateur, et le questionnaire évalue les caractéristiques du téléphone utilisé (modèle exact), les conditions d'utilisation du téléphone (kit mains libres) le nombre d'années depuis la première utilisation régulière jusqu'à la date de diagnostic (latence), le nombre total d'années d'utilisation, la fréquence et la durée des communications.
La catégorie de référence pour les analyses a été définie comme les non-utilisateurs ou les utilisateurs occasionnels, et les utilisations dans l'année précédant la date de référence (date du diagnostic pour les cas et date de référence pour les témoins) n'a pas été prise en compte. Les utilisateurs « réguliers » ont été définis comme les personnes ayant utilisé un téléphone mobile au moins une fois par semaine pendant 6 mois ou plus. Cette définition a été critiquée, en particulier par le groupe de Hardell, comme étant trop minimale (Hardell et Carlberg 2009, Morgan 2006). Outre un recueil détaillé de l'utilisation de téléphone, des informations ont été collectées sur un certain nombre de facteurs de risque de ces tumeurs, facteurs connus ou potentiels.
Une attention particulière a été portée à l'estimation de l'importance et de la direction des biais potentiels de participation et de réminiscence, et à l'estimation de leur impact sur les résultats de l'étude. Des articles d'ordre méthodologique concernant la conception de l'étude, l'analyse des biais de participation et des biais de réminiscence, et l'évaluation des expositions ont été publiés.
Des études de validation ont été menées pour évaluer l'erreur potentielle liée à un biais de réminiscence dans le rappel d'utilisation du téléphone, montrant que ce rappel est sujet à des erreurs systématiques modérées et à des erreurs aléatoires substantielles (Vrijheid, Cardis *et al.*, 2006, Vrijheid, Armstrong *et al.* 2009). Les erreurs se sont révélées plus importantes pour la durée des appels que pour le nombre d'appels, et l'utilisation du

[75] www.iarc.fr/fr/research-groups/RAD/Interphone8oct08_fr.pdf

téléphone était sous-estimée par les utilisateurs modérés et surestimée par les utilisateurs intensifs. La comparaison d'un échantillon de cas et de témoins dans trois pays n'a montré que peu de différences d'erreurs de rappel globalement ou au cours du passé récent, mais a montré en revanche une apparente surestimation par les cas pour le passé plus lointain (Vrijheid, Armstrong *et al.* 2009). Les effets éventuels des erreurs de rappel ont été évalués à l'aide de simulations de Monte-Carlo. Les résultats laissent penser que les erreurs de rappel peuvent entraîner une sous-estimation du risque de cancer cérébral associé à l'utilisation des téléphones mobiles. Il a été observé que les grandes erreurs aléatoires vues dans l'étude de validation avaient un impact plus fort que les erreurs systématiques plausibles. Les erreurs systématiques liées à un rappel différent entre les cas et les témoins n'avaient que très peu d'impact supplémentaire en présence de grandes erreurs aléatoires (Vrijheid, Cardis *et al.*, 2006). L'apparente surestimation par les cas pour les périodes plus anciennes pourrait provoquer un biais positif dans les estimations du risque de maladie associé à l'utilisation de téléphones portables (Vrijheid, Armstrong *et al.*, 2009). Un éventuel biais de sélection a aussi été évalué en étudiant les non-participations : il apparaît ainsi que le refus de participation semble lié à une plus faible utilisation des téléphones mobiles, ce qui pourrait résulter en une diminution des *odds ratios* (Vrijheid, Richardson *et al.*, 2009).
Comme dans toutes les études épidémiologiques, la mesure de l'exposition aux facteurs de risque est cruciale. L'exposition aux radiofréquences étant très localisée, le risque, s'il existe, sera probablement le plus élevé pour les tumeurs situées dans les régions où l'absorption d'énergie est la plus grande. La répartition spatiale de l'énergie dans le cerveau a été caractérisée, à l'aide des mesures prises sur plus de 100 téléphones utilisés dans différents pays. La plupart de cette énergie (97 à 99 %, selon la fréquence) semble être absorbée dans l'hémisphère cérébral du côté où le téléphone est utilisé, principalement dans le lobe temporal. Le débit d'absorption spécifique (DAS) relatif moyen est le plus élevé dans le lobe temporal et le cervelet et diminue très rapidement avec la profondeur, notamment aux fréquences les plus élevées (Cardis *et al.*, 2008, Vrijheid, Mann *et al.*, 2009). Une approche originale a été développée dans une étude « cas seulement[76] » sur un sous-ensemble des cas finlandais de l'étude (Hartikka *et al.*, 2009). Une approche « cas-seulement » permet la comparaison de cas en fonction de la proximité de la source d'exposition. En outre, elle élimine les biais potentiels de sélection de témoins non représentatifs et le biais de réminiscence différentielle entre les cas et les témoins. Une analyse des gliomes utilisant la mesure radiologique de la distance entre la localisation de la tumeur et la source d'exposition a ainsi été conduite chez 99 malades pour évaluer une surincidence éventuelle de gliomes localisés au plus proche de la source d'expositions. Cette analyse n'a pas montré d'effet significatif de l'utilisation du téléphone mobile pour les gliomes les plus proches de la source d'exposition (Tableau 13).

Les résultats d'ensemble de l'étude Interphone ne sont pas encore publiés. Une publication portant sur les gliomes est actuellement soumise et devrait paraître prochainement[77]. Cependant, plusieurs publications sont parues qui analysent les résultats obtenus dans les études nationales dans certains des pays participants : Europe du Nord, Israël, Japon (Christensen *et al.*, 2004, 2005 ; Hepworth *et al.*, 2006 ; Hours *et al.*, 2007 ; Klaeboe *et al.*, 2007 ; Lönn *et al.*, 2004, 2005, 2006 ; Sadetzki *et al.*, 2007 ; Schlehofer *et al.*, 2007 ; Schoemaker *et al.*, 2006 ; Schüz *et al.*, 2006 ; Takebayashi *et al.*, 2006, 2008), auxquelles viennent s'ajouter les publications d'analyses conjointes des études de 5 pays d'Europe du Nord (Lahkola *et al.*, 2007, 2008). Ces publications portent sur plus des deux tiers des

[76] Ce type d'étude n'est conduit que sur les cas d'une étude cas-témoins. Parmi ces cas, les auteurs ont étudié la localisation de la tumeur par rapport à l'utilisation de téléphone mobile. Ce type d'étude est en théorie plus à l'abri d'un biais différentiel qui existe dans les études cas-témoins, mais la puissance de ce type d'étude est diminuée par rapport à l'approche cas-témoins. Les problèmes de biais liés à la latéralité restent, quant à eux, toujours présents.

[77] La Recherche numero 433, Septembre 2009

malades recrutés dans l'étude Interphone. Il est regrettable que la publication de résultats nationaux ait précédé la publication de l'ensemble des résultats de l'étude Interphone, car aucune de ces études ne possède la puissance qui avait été calculée pour l'ensemble de l'étude Interphone. Toutefois, il est assez vraisemblable que les résultats d'ensemble ne soient pas très différents des résultats de l'analyse conjointe des études des pays nordiques, qui portent sur 1 521 cas de gliomes et 1 209 cas de méningiomes, soit plus de la moitié des cas recrutés dans l'ensemble des études Interphone. Cependant, l'analyse complete de l'etude permettra de disposer d'une plus grande puissance statistique pour des analyses en sous-groupes.

Les résultats d'études nationales analysant l'impact d'autres facteurs de risque (tabac, allergies, facteurs environnementaux, hormones, exposition thérapeutique aux rayonnements ionisants, polymorphismes génétiques) ont également été publiés (Bethke *et al.*, 2008 a, 2008b ; Blettner *et al.*, 2006; Edwards *et al.*, 2006; Malmer *et al.*, 2007 ; Sadetzki *et al.*, 2008 ; Schlehofer *et al.*, 2007; Schoemaker *et al.*, 2006, 2007a, 2007b ; Schwartzbaum *et al.*, 2005, 2007 ; Wigertz *et al.*, 2006, 2007, 2008). Ces publications ne sont pas analysées dans ce rapport, n'étant pas directement reliées à son objet, mais ces facteurs de risques ont éventuellement été pris en compte dans l'analyse des études nationales des risques associés à l'utilisation de téléphones mobiles présentées dans ce rapport.

Les études du groupe de Hardell

Les études du groupe de Hardell ont fait l'objet de nombreuses publications (plus d'une dixaine). La récente publication de Hardell et Carlberg (2009) et l'audition de Lennart Hardell (*cf.* Audition de L. Hardel en annexe 3.4) permet en fait d'identifier seulement trois études originales. Une première étude cas-témoins, publiée en 1999, portant sur 209 cas et 425 témoins et n'a pas montré de risque de tumeur cérébrale associé à l'utilisation de téléphone mobile. Puis, deux nouvelles études cas-témoins ont porté sur des échantillons plus importants, menées dans la même région de Suède, et publiées en 2002 et 2006, suivies de multiples ré-analyses de ces études ainsi que d'analyses conjointes de ces deux études cas-témoins. Mais, d'une publication à l'autre, des différences dans la présentation des analyses et dans les types et nombres de cas analysés sont constatées. Par exemple, pour les gliomes, en ne considérant que les cas exposés au moins une fois au téléphone mobile par opposition à jamais (dit « *ever/never* » en anglais) on relève 79 cas exposés à un téléphone analogique et 112 cas exposés à un téléphone numérique dans l'étude de 2002, et 68 et 198 cas respectivement dans l'étude de 2006. Dans l'analyse conjointe (2006) on retrouve un total de 178 cas exposés à un téléphone analogique et 402 cas exposés à un téléphone numérique. L'audition du Professeur Hardell par le groupe de travail n'a pas permis de comprendre la raison de ces variations dans les diverses analyses successives de ces deux études, ni de comprendre la raison des différences notables avec l'étude Interphone menée en Suède à une période comparable, contemporaine de la troisième étude cas-témoins de Hardell.

Dans les études de Hardell, deux points notamment posent problème. Tout d'abord la sélection des cas et témoins aboutit à des taux de participation anormalement élevés (90 % pour les cas, et 84 à 91 % pour les témoins, alors que pour l'étude Interphone suédoise des gliomes – Lönn *et al.,* 2005 -, ces taux de participation sont respectivement de 74 et 71 % pour les cas et les témoins). Même pour un pays comme la Suède, connue pour une forte participation aux études épidémiologiques, ce taux parait particulièrement élevé. L'étude de 2006 apporte quelques précisions : tout d'abord un questionnaire est envoyé par courrier, puis deux courriers de rappels sont envoyés en cas de non réponse, puis un appel téléphonique supplémentaire est effectué pour compléter certaines réponses, enfin un dernier appel téléphonique est réalisé pour vérifier la déclaration des durées d'appel. Cette méthode est particulièrement pesante et peut à terme forcer l'acceptation de participer des

cas et des témoins. L'impact de ce recrutement sur un biais de réminiscence mériterait d'être étudié.

La définition de la catégorie d'exposition est également particulière à l'étude d'Hardell *et al.* Hardell *et al.* ont considéré comme catégorie de référence l'absence d'exposition au moindre téléphone mobile analogique ou numérique ou au moindre appareil sans fil (DECT domestique ou professionnel). Ce groupe de référence représente dans l'étude de 2000 - 2003 une proportion de 20 % des cas et 34 % des témoins. On peut supposer qu'une définition aussi stricte de la non-exposition peut capturer l'appartenance à un groupe socioprofessionnel ou pour le moins une population particulière. Cette définition risque d'introduire un biais non contrôlé lié à l'appartenance à cette population, cela mériterait d'être analysé.

La cohorte danoise

Schüz *et al.* ont publié en 2006 une actualisation des résultats de la cohorte danoise de 420 000 personnes ayant souscrit un abonnement téléphonique entre 1982 et 1995 (Johansen *et al.*, 2001). Les limites de cette étude sont les suivantes : d'une part, les participants ont été recrutés à partir d'une liste d'abonnés et non par sollicitation individuelle, il n'y a donc pas eu d'entretien permettant d'enregistrer un certain nombre de caractéristiques individuelles et d'autre part, les expositions sont basées sur les données d'utilisation du téléphone fournies par les opérateurs. Cette étude effectue également une comparaison externe à la cohorte, en considérant comme référence la population globale danoise, ce type de comparaison est plus sensible à un éventuel biais de sélection.
Enfin et surtout, comme l'ont fait remarquer Ahlbom *et al.* (2007), cette cohorte ne prend pas en compte les abonnements professionnels ni les abonnements postérieurs à 1995, or un grand nombre d'utilisateurs de téléphones mobiles au Danemark ont souscrit un abonnement postérieurement à 1995 et se trouvent donc ainsi inclus dans la population de référence, ce qui peut réduire les estimations.

Les principaux résultats des études publiées depuis 2005 sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau 12 : Récapitulatif des résultats publiés sur les analyses INTERPHONE nationales de l'utilisation des téléphones portables1

Pays	Tranche d'âge	Année du diagnostic	Nombre de cas et de témoins	*OR* et IC à 95 % Utilisation régulière Nb de cas	*OR* et IC à 95 % Début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé Nb de cas	*OR* et IC à 95 Utilisation ipsilate début d'utilisation ou + dans le pa Nb
Gliomes						
Danemark (Christensen et coll., 2005)	20-69	2000-2002	Bas grade 81 155 Haut grade 171 330	Bas grade 1,08 (0,58 ; 2,00) 47 Haut grade 0,58 (0,37, 0,90) 59	Bas grade 1,64 (0,44, 6,12) 6 Haut grade 0,48 (0,19 ; 1,26) 8	SO
France (Hours et coll., 2007)	30-59	2001-2003	96 96	1,15 (0,65 ; 2,05) 59	*46 mois+* *1,96 (0,74 ; 5,20) 21*	SO
Allemagne (Schuz et coll., 2006)	30-69	2000-2003	366 1,494	0,98 (0 ,74 ; 1,29) 138	2,20 (0,94 ; 5,11) 12	SO
Japon (Takebayashi et coll., 2008)	30-69	2000-2004	83 163	1,22 (0,63 ; 2,37) 56	*6,5 ans +* *0,60 (0,20 ; 1,78)*	SO
Norvège (Klaeboe et coll 2007)	19-69	2001-2002	289 358	0,6 (0,4 ; 0,9) 161	*6 années +* *0,8 (0,5 ; 1,2)* 70	*6 années +* *1,3 (0,8 ; 2,1)*
Suède (Lonn et coll., 2005)	20-69	2000-2002	371 674	0,8 (0,6 ; 1,0) 214	0,9 (0,5 ; 1,5) 25	1,6 (0,8 ; 3,4)
Royaume-Uni (Hepworth et coll., 2006)	18-69	2000-2004	966 1,716	0,94 (0,78 ; 1,13) 508	0,90 (0,63 ; 1,28) 66	SO
Pays scandinaves ensemble (Lahkola et coll., 2007)		2000-2004	1,522 3,301	0,78 (0,68 ; 0,91) 867	0,95 (0,74 ; 1,23) 143	1,39 (1,01 ; 1,92)
Méningiomes						
Danemark (Christensen et coll., 2005)	20-69	2000-2002	175 316	0,83 (0,54 ; 1,28) 67	1,02 (0,32 ; 3,24) 6	SO
France (Hours et coll., 2007)	30-59	2001-2003	145 145	0,74 (0,43 ; 1,28) 71	*46 mois+* *0,73 (0,28 ; 1,91) 15*	SO
Allemagne (Schuz et coll., 2006)	30-69	2000-2003	381 762	0,84 (0,62 ; 1,13) 104	1,09 (0,35 ; 3,37) 5	SO
Japon (Takebayashi et coll., 2008)	30-69	2000-2004	128 229	0,7O (0,42 ; 1,16) 55	*5,2 ans* *1,05 (0,52 ; 2,11) 30*	SO
Norvège (Klaeboe et coll 2007)	19-69	2001-2002	207 358	0,8 (0,5 ; 1,1) 98	*6 années +* *1,0 (0,6 ; 1,8) 36*	*6 années +* *1,1 (0,6 ; 2,3)*
Suède (Lonn et coll., 2005)	20-69	2000-2002	273 674	0,7 (0,5 ; 0,9) 118	0,9 (0,4 ; 1,9) 8	1,3 (0,5 ; 3,9)
Pays scandinaves ensemble (Lahkola et coll., 2008)		2000-2004	1 209 3 299	0,76 (0,65 ; 0,89) 573	0,91 (0,67 ; 1,25) 73	1,05 (0,67 ; 1,65)
Neurinomes de l'acoustique						
Danemark (Christensen et coll., 2004)	20-69	2000-2002	106 212	0,90 (0,51 ; 1,57) 45	0,22 (0,04 ; 1,11) 2	SO

Pays	Tranche d'âge	Année du diagnostic	Nombre de cas et de témoins	*OR* et IC à 95 % Utilisation régulière Nb de cas	*OR* et IC à 95 % Début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé Nb de cas	*OR* et IC à 95 Utilisation ipsilat début d'utilisation ou + dans le pa Nb
France (Hours et coll., 2007)	30-59	2001-2003	109 214	0,92 (0,53 ; 1,59) 58	*46 mois+ 0,66 (0,28 ; 1,57) 14*	SO
Allemagne (Schlehofer et coll., 2007)	30-69	2000-2003	97 194	0,67 (0,38 ; 1,19) 29	SO 0	SO
Japon (Takebayashi et coll., 2006)	30-69	2000-2004	101 339	0,73 (0,43 ; 1,23) 51	*8 années + 0,79 (0,24 ; 2,65) 4*	SO
Norvège (Klaeboe et coll 2007)	19-69	2001-2002	45 358	0,5 (0,2 ; 1,0) 22	*6 années + 0,5 (0,2 ; 1,4) 8*	*6 années + 0,9 (0,3 ; 2,8)*
Suède (Lonn et coll., 2004)	20-69	1999-2002	148 604	1,0 (0,6 ; 1,5) 89	1,9 (0,9 ; 4,1) 14	3,9 (1,6 ; 9,5)
Pays scandinaves ensemble (Schoemaker et coll., 2005)		1999-2004	678 3,553	0,9 (0,7 ; 1,1) 360	1,0 (0,7 ; 1,5) 47	1,3 (0,8 ; 2,0) *1,8 (1,1-3,1)**
Tumeurs de la glande parotide						
Israël (Sadetzki et coll., 2007)	18+	2001-2003	Total 460 1,266 Bénignes 402 1,072 Malignes 58 294	Total 0,87 (0,68 ; 1,13) 285 Bénignes 0,85 (0,64 ; 1,12) 252 Malignes 1,06 (0,54 ; 2,10) 33	Total 0,86 (0,42 ; 1,77) 13 *Total – utilisateurs réguliers seulement 1,45 (0,82 ; 2,57) 13*	Total 1,60 (0,68 ; 3,72) Bénignes 1,97 (0,81 ; 4,85)
Suède et Danemark (Lonn et coll., 2006)	20-69	2000-2002	Bénignes 112 321 Malignes 60 681	Bénignes 0,9 (0,5 ; 1,5) 77 Malignes 0,7 (0,4 ; 1,3) 25	Bénignes 1,4 (0,5 ; 3,9) 7 Malignes 0,4 (0,1 ; 2,6) 2	Bénignes 2,6 (0,9 ; 7,9) Malignes 0,7 (0,1 ; 5,7)

* Analyse selon la durée d'utilisation plutôt que selon le temps écoulé depuis le début de l'utilisation.

[1] : A la différence des tableaux ci-après, l'effet de la latéralité seule (ipsi/contro ever regulal/never), n'est pas présentée par le Circ.

Source : www.iarc.fr/fr/research-groups/RAD/Interphone8oct08_fr.pdf

Tableau 13 à Tableau 18, gliomes, méningiomes, neurinomes, parotides, hypophyse, autres). Ils sont brièvement commentés ci-dessous.

Gliomes (Tableau 13)
Les gliomes sont des tumeurs malignes et représentent environ 90 % de l'ensemble des tumeurs malignes cérébrales.
Neuf études originales ont été publiées depuis 2005, auxquelles s'ajoutent l'analyse conjointe des études Interphone nordiques et britannique, une analyse cas-seulement de l'étude Interphone finlandaise qui n'est actuellement pas autrement publiée, mais dont les données figurent dans l'analyse conjointe des 5 études Interphone, et trois ré-analyses des études de Hardell (14 publications analysées).
Parmi les 9 études originales, la comparaison entre les utilisateurs réguliers et les non utilisateurs (*ever regular use / never*) donnent les résultats suivants. Seule l'étude de Hardell (2006) montre un OR élevé, tant pour l'utilisation de téléphones analogiques (OR = 2,6 [IC 95 % : 1,5 – 4,3]) que pour celle de téléphones numériques (OR = 1,9 [IC 95 % : 1,3 – 2,7]). Dans cette étude, le risque apparaît plus élevé pour les tumeurs frontales que pour les tumeurs temporales. Dans toutes les autres études, le risque oscille autour de 1. Dans l'étude Interphone française, on observe une augmentation non significative du risque chez les gros consommateurs de téléphonie mobile (Hours et al., 2007).
L'analyse « cas seulement » conduite dans l'étude finlandaise ne montre pas d'effet significatif de l'utilisation du téléphone pour les tumeurs les plus proches de la source d'exposition (Hartikka *et al.*, 2009).
Le problème de la latéralité est complexe. C'est certainement un des paramètres les plus facilement biaisés, et c'est très vraisemblablement un biais de réminiscence qui, selon les auteurs eux-mêmes, a conduit l'étude Interphone anglaise à observer une augmentation significative du risque de tumeur ipsilatérale par rapport au côté d'utilisation du téléphone mobile (OR = 1,24 [IC 95 % : 1,02 – 1,52]) et une diminution tout aussi significative du risque de tumeur controlatérale (OR = 0,75 [IC 95 % : 0,61 – 0,93]).
Si l'on considère les utilisations à long terme, l'analyse conjointe des études nordiques et britannique, basée sur 143 cas, donne pour une utilisation débutée 10 ans et plus avant la date de diagnostic, un OR de l'ordre de 1. L'étude de Hardell montre en revanche des OR élevés.
Seule l'étude nordique conjointe, qui représente à peu près la moitié des malades inclus dans l'étude Interphone, examine à la fois les effets à long terme et la latéralité. Les résultats indiquent un OR de 1,39 [IC 95 % : 1,01 - 1,92] pour une utilisation ipsilatérale et de 0,98 [IC 95 % : 0,71 - 1,37] pour une utilisation controlatérale (voir tableau du CIRC - Tableau 12). Les résultats complets de l'étude Interphone devraient mettre à jour cette estimation.

Méningiomes (Tableau 14)

Neuf études originales ont été publiées, auxquelles s'ajoutent l'analyse conjointe des études Interphone nordiques et britannique, et une analyse conjointe de deux études cas-témoins de Hardell (11 publications analysées).

A l'exception de l'étude de Hardell (2005) qui a montré une augmentation du risque lié à l'utilisation de téléphone analogique depuis 10 ans, aucune étude n'a montré d'augmentation significative du risque de méningiome liée à l'utilisation régulière de téléphone mobile, et l'étude conjointe nordique a observé un risque significativement diminué avec un OR de 0,76 IC 95 % = [0,65 - 0,89] (Lahkola *et al.* 2008). Aucun effet de la latéralité n'a été observé dans les études analysées.

Neurinomes du nerf acoustique (Tableau 15)
Neuf études originales ont été publiées, auxquelles s'ajoutent l'analyse conjointe des études Interphone nordiques et britannique, et une analyse conjointe de deux études cas-témoins de Hardell, et 3 ré-analyses d'études antérieures de Hardell (14 publications analysées).
Ces tumeurs bénignes sont rares, et chacune des études, à l'exception des analyses

conjointes, rassemble un nombre limité de malades. Contrairement à ce qui est observé pour les gliomes, les taux de participation des malades sont élevés (de 60 à 90 %), et souvent supérieurs à ceux des témoins.
Dans la plupart des études, l'utilisation régulière de téléphone mobile n'apparaît pas être un facteur de risque de neurinome : l'analyse conjointe des études nordiques donne un OR de 0,9 [IC 95 % : 0,7 – 1,1] et de 1,0 [IC 95 % : 0,7 – 1,5] avec une latence de 10 ans (Shoemaker *et al.*, 2005). En opposition avec ces résultats, le groupe de Hardell a observé des excèse de risques élevés, voire très élevés (de l'ordre de 4 à 8) mais calculés sur des effectifs faibles ou même très faibles (1 à 7 cas), en particulier pour les téléphones analogiques utilisés depuis 10 ou 15 ans. En analyse multivariée, seul subsiste un risque pour les téléphones analogiques. Dans la plupart des études, à l'exception des études de Hardell, le risque n'augmente pas avec l'utilisation du téléphone.
La latéralité de l'utilisation du téléphone ne semble pas avoir d'effet, sauf dans la ré-analyse conjointe récente des études du groupe de Hardell (Hardell et Carlberg, 2009). On observe parfois que le risque lié à l'utilisation controlatérale du téléphone est légèrement supérieur à celui lié à une utilisation ipsilatérale (Shoemaker *et al.* 2005, Hours *et al*., 2007, Klaeboe *et al.*, 2007). Il n'est pas interdit de penser que les neurinomes, tumeurs à développement lent, aient pu entraîner une perte d'audition plus ou moins importante et unilatérale, ce qui aurait conduit les malades à utiliser l'autre oreille pour téléphoner.
Seule l'étude nordique conjointe examine à la fois les effets d'une longue durée d'utilisation et de la latéralité. Les résultats indiquent un OR de 1,1 [IC 95 % : 0,7 - 1,8] pour une utilisation ispilatérale et de 0,9 [IC 95 % : 0,5 - 1,8] pour une utilisation controlatérale.
L'étude Interphone allemande (Schlehofer *et al.*, 2007) qui a observé des OR très faibles (de 0,35 à 0,7) a pris en compte dans ses analyses d'autres facteurs de risque : exposition au bruit, allergies. Elle a ainsi observé que l'exposition au bruit persistant et la rhinite allergique saisonnière augmentaient significativement le risque de neurinome OR = 2,31 [IC 95 % : 1,15 – 4,66] et 2,20 [IC 95 % : 1,09 – 4,45] respectivement. L'etude Interphone francaise (Hours et al., 2009) a recemment publie une augmentation significative du risque de neurinome du nerf acoustique associe a une exposition importante au bruit (OR=2,55 IC95% 1,35-4,82).

Tumeurs des parotides (Tableau 16)
Trois études originales, 2 études cas-témoins et une étude de cohorte ont été publiées.
2 études, en Suède et au Danemark et en Israël, toutes deux du *consortium* Interphone (Lönn *et al.*, 2006 ; Sadetzki *et al.* 2007) et l'étude de cohorte danoise (Schüz *et al.*, 2006) n'ont pas montré d'association entre l'utilisation régulière du téléphone mobile et le risque de tumeurs malignes ou bénignes des parotides.

Toutefois, dans l'étude israëlienne, l'analyse restreinte aux conditions d'expositions les plus fortes (usage intensif en zones rurales) montre une élévation non significative du risque et une relation entre le niveau d'exposition et l'effet. Cette étude comporte par ailleurs une différence de statut tabagique entre les cas et les témoins, les cas étant plus plus fréquemment fumeurs que les témoins. Or une étude du même groupe montre une association significative entre la consommation de tabac et le risque de tumeurs de la parotide (OR = 1,66 [IC 95 % : 1,31 – 2,11]). Cette association est plus forte lorsque le début de l'exposition au tabac a été précoce. Elle est variable selon le type de tumeur : elle ne concerne pas les tumeurs malignes mais atteint un OR de l'ordre de 15 pour la tumeur de Whartin. Les analyses de l'étude de Sadetzki *et al*. 2007 ont été ajustées pour le risque lié au tabac, mais Il est possible qu'un biais de confusion résiduel subsiste après ajustement.

Tumeurs de l'hypophyse (Tableau 17)

Deux études, au Japon et dans le Sud de l'Angleterre, toutes deux du *consortium* Interphone (Takebayashi *et al.,* 2008 ; Shoemaker et Swerdlow, 2009) ont examiné les tumeurs de l'hypophyse. Elles n'ont pas montré d'association entre l'exposition et le risque de tumeurs

bénignes de l'hypophyse. Il est à noter que l'hypophyse est située dans une zone médiane du crâne, la selle turcique, et est vraisemblablement peu exposée.

Autres tumeurs (Tableau 18)
Quatre publications ont été analysées.
Une étude de Hardell *et al.* (2005) a porté sur le risque de lymphome non-hodgkinien et n'a pas montré de risque significatif lié à l'utilisation de téléphone analogique ou numérique, mais un risque significatif lié à l'utilisation du téléphone « sans fil », sans autre précision.
Une autre étude du même groupe (Hardell *et al.*, 2006) n'a pas montré d'effet significatif sur le risque de cancer du testicule.
Deux études concernent les tumeurs oculaires. L'incidence des tumeurs oculaires dans la cohorte d'abonnés danois n'est pas différente de celle de la population témoin (SIR[78] = 0,96) (Schüz *et al.*, 2006). Stang *et al.*, (2009) qui avaient antérieurement publié des résultats laissant penser que l'utilisation de téléphone mobile pouvait favoriser les cancers oculaires, n'ont pas retrouvé ce résultat dans une étude cas-témoins récente utilisant un nombre plus important de malades et 3 catégories de témoins : population générale, malades d'ophtalmologie et fratrie des malades.

Études en cours

La cohorte COSMOS (www.ukcosmos.org)

Coordonnée par J. Schuz, COSMOS est une étude de cohorte internationale sur les effets possibles sur la santé de l'utilisation à long terme du téléphone mobile. La cohorte COSMOS étudie les modifications au cours du temps de la fréquence de symptômes spécifiques : maux de tête et troubles du sommeil, les risques de cancers, de tumeurs bénignes, et de maladies neurologiques et cérébro-vasculaires.
COSMOS est une étude internationale conduite dans 5 pays européens : Royaume Uni, Danemark, Suède, Finlande, et Pays Bas. Au Royaume-Uni, la cohorte suivra 90 à 100 000 utilisateurs de téléphone mobile, âgés de 18 ans et plus pendant 20 à 30 ans. La cohorte internationale suivra environ 250 000 utilisateurs de téléphones mobiles en Europe.
Ce projet a été considéré comme une priorité pour résoudre les incertitudes actuelles sur les effets sanitaires à long terme de cette technologie nouvelle par le Ministère de la Santé, L'agence de Protection de l'environnement, et l'*Advisory Group on Non-Ionising Radiation* (AGNIR) du Royaume Uni, le Comité Scientifique des Risques Sanitaires Emergents et Nouvellement Identifiés (SCENHIR) de l'Union Européenne, et l'Organisation Mondiale de la Santé.
Au Royaume Uni, le projet COSMOS est animé par l'*Imperial College* (Londres) et financé par le *Mobile Telecomunications and Health Research Programme* (MTHR), un programme de recherche indépendant co-financé par le Ministère de la Santé et l'industrie. Le pré-test a été lancé fin Mai 2009, avec une sélection de clients des principaux opérateurs de réseaux de téléphonie mobile et le recrutement est en cours.

L'étude MOBI-KIDS (www.mbkds.com – site en cours de construction)

Coordonné par E. Cardis (Barcelone), le projet MOBI-KIDS est une étude cas-témoins multicentrique internationale, sur le modèle de l'étude Interphone. Elle étudie le risque de tumeur cérébrale chez des jeunes de 10 à 24 ans, en fonction de l'exposition aux radiofréquences des téléphones mobiles et d'autres sources de radiofréquences et aux très basses fréquences. Le choix de cet âge est basé sur l'augmentation récente de l'incidence de ces tumeurs chez les moins de 20 ans. En outre, même si les moins de 12 ans ont peu utilisé le téléphone mobile au cours des 5 à 10 dernières années, les adolescents par contre en ont fait une utilisation croissante. Le projet table sur le recrutement, sur une période de 5

78 SIR : *Standardized Incidence Rate* – taux d'incidence standardisé

ans, de 1 929 cas dont 1 455 en Europe (l'incidence de ces tumeurs est, par exemple, de 94 cas par an en France), et d'un nombre équivalent de témoins. Ce recrutement permettrait d'identifier un OR de 1,25 à 1,40, dans l'hypothèse d'une prévalence d'utilisation dans les 5 à 10 années antérieures estimée entre 5 et 20 %. Le projet porte une attention particulière aux sources possibles de bais et d'erreurs (biais de sélection, de réminiscence) et aux mesures d'exposition aux champs électromagnétiques (développement et validation d'indices améliorés d'exposition aux radiofréquences et très basses fréquences) et aux autres facteurs environnementaux. Le projet, dont le lancement a été annoncé en mai 2009, sera conduit en Europe (Allemagne, Autriche, Espagne, France, Grèce, Israël, Italie, Pays Bas) avec un financement de l'Union Européenne, et en Australie, au Canada, et en Nouvelle Zélande. La mesure des expositions bénéficiera du soutien de France Télécom et de l'Agence de Protection de l'Environnement au Royaume Uni.

4.4.2.2.4 Méta-analyses : risque de tumeurs intracrâniennes associé à l'utilisation de téléphonie mobile

Six méta-analyses[79] ont été publiées depuis 2005 sur l'association entre l'utilisation de téléphone mobile et le risque de cancer. La plus récente (Ahlbom *et al.* 2009), qui intègre le plus grand nombre de données, est la plus pertinente scientifiquement pour estimer un risque éventuel et étudier l'hétérogénéité associée à l'estimation de ce risque.

Dans cette partie, nous ne détaillerons pas les résultats des 5 premières méta-analyses. En effet, celles-ci peuvent être assimilées aux analyses intermédiaires d'un essai thérapeutique dans la mesure où elles portent sur les mêmes études enrichies progressivement. Avec un nombre important de répétition, certaines de ces analyses « intermédiaires » vont conduire inévitablement à conclure à tort à l'existence ou non d'un risque du simple fait de cet échantillonnage.

Il est important de garder à l'esprit qu'une méta-analyse ne génère pas de nouvelles informations, mais qu'elle synthétise celles déjà existantes. C'est une méthode que l'on doit donc employer une seule fois, lorsque suffisamment d'études ont été publiées, pour résumer l'ensemble des études et étudier l'hétérogénéité entre elles.

Les différentes caractéristiques des méta-analyses publiées jusqu'à présent sont détaillées dans un premier temps. Puis, les résultats principaux sont présentés en prenant les estimations basées sur la méta-analyse la plus récente et la plus complète publiée.

Description des méta-analyses sur l'utilisation de téléphone mobile et le risque de cancer

Lahkola et al. 2006

Cette méta-analyse est la première à avoir tenté de résumer l'ensemble des études observationnelles sur le risque de tumeurs intracrâniennes et l'utilisation de téléphone mobile. Les méthodes utilisées sont très détaillées et les analyses nécessaires à ce type d'étude (analyse d'hétérogénéité, analyse de sensibilité) sont présentées correctement dans cette publication.

Cette méta-analyse est basée sur 12 études publiées jusqu'au 1er décembre 2005. Une étude basée sur la mortalité est exclue sans justification.

Si les méthodes employées sont dans l'ensemble adaptées à ce type d'étude, il est nécessaire de mentionner les limites suivantes :

[79] Voir chapitre 4.1.3

- dans cette étude, de nombreux doublons sont présents : ainsi 4 études de Hardell sont analysées alors que seules deux études cas-témoins ont effectivement été conduites, et l'étude de Schoemaker *et al.* 2005 qui regroupe les données nordiques d'Interphone est prise en compte alors que les autres études sont les résultats de ces pays individuellement.
- l'objectif principal de cette méta-analyse est l'estimation du risque de tumeurs intracrâniennes associé à l'utilisation de la téléphonie mobile. Une analyse d'hétérogénéité étudie en objectif secondaire le risque associé à chaque type de tumeur.
- de nombreuses analyses en sous-groupe sont réalisées : par type de tumeur, type de téléphone (analogique *vs* numérique), localisation de la tumeur, ipsilatérale ou controlatérale. Une analyse de sensibilité de type retrait et ajout a également été conduite.
- les auteurs présentent les résultats d'une régression sur la durée d'utilisation de téléphone mobile mais le modèle statistique utilisé n'est pas décrit. *A priori* un calcul est effectué pour estimer un OR par étude associé à une unité de durée, mais rien ne permet de savoir si ce calcul est basé sur les résultats par catégorie et si les auteurs ont pris en compte les phénomènes d'autorégression liés a ce type d'analyse (Greenland et Longnecker 1992).

Si les méthodes employées sont dans l'ensemble adaptées à ce type d'étude, cette méta-analyse souffre d'un nombre important de défauts. Ainsi, par exemple, cette méta-analyse a été entreprise alors que de nombreuses études observationnelles étaient en cours, les auteurs étant d'ailleurs impliqués dans ces études en cours.

Hardell et al. 2007

Cette publication présente une méta-analyse restreinte à une sous-catégorie d'utilisation de téléphone mobile puisqu'elle se base sur les résultats de l'exposition pendant plus de 10 ans et sur l'utilisation ipsilatérale.

Au total, 2 cohortes et 16 études cas-témoins sont inclues, mais il y a en fait de nombreux doublons. Les 2 études de cohorte n'en sont qu'une, la « seconde » étant une actualisation de la « première ». Les données de l'étude Interphone sont comptées deux fois, avec l'étude de Lahkola *et al,.* qui est une analyse conjointe des études nordiques d'Interphone et avec les études originales. Des résultats provenant d'une même étude sont parfois considérés comme indépendants et regroupés dans la méta-analyse alors qu'ils ne le sont pas. Par exemple Christensen *et al.* 2005 rapportent des OR séparés pour les gliomes de bas-grade et les gliomes de haut grade : les OR sont pourtant basés sur les mêmes témoins, et un autre traitement statistique aurait été souhaitable. Un calcul préliminaire d'un OR global pour les gliomes de cette étude aurait été possible (comme cela est effectué dans la méta-analyse d'Ahlbom *et al.* 2009), ou encore mieux la conduite d'une méta-analyse basée sur un modèle à effets mixtes (van Houwelingen *et al.* 2002) qui aurait permis une estimation non-biaisée de l'OR global.

La description de la méthode statistique est limitée : il est seulement fait mention du logiciel *Stata* et de l'emploi d'un modèle aléatoire ; un recalcul conduit par le groupe de travail a permis de voir que c'est le modèle aléatoire de *DerSimonian and Laird* qui est utilisé. Aucune étude de l'hétérogénéité n'est entreprise et aucune analyse de sensibilité de type retrait et ajout n'a été réalisée.

Hardell et al. 2008

Cette méta-analyse est une réédition de celle publiée en 2007 par la même équipe avec des résultats plus détaillés. On y retrouve les mêmes problèmes méthodologiques : méthode très peu décrite, pas d'analyse d'hétérogénéité et de sensibilité, présence de doublons

(notamment Lahkola *et al.* 2007). On remarque également les mêmes erreurs dans le traitement statistique de la méta-analyse puisque les OR pour les gliomes de bas grade et les gliomes de haut grade de l'étude de Christensen *et al.* de 2005 sont encore considérés comme indépendants.

On peut noter que l'introduction fait l'hypothèse qu'un temps de latence de 10 ans est raisonnable. Cependant, que ce soit dans la justification de l'étude Interphone (protocole Interphone) ou dans d'autres rapport (Repacholi, 1998 ; McKinlay, 1997), l'hypothèse privilégiée est un effet de promotion qui nécessite donc un temps de latence plus faible.

Le choix d'une durée minimum de plus de dix ans n'a pas été testé en incluant par exemple les études utilisant une autre limite supérieure en analyse de sensibilité et publiées en 2007. En effet, les études ayant rapporté des utilisations depuis plus de 5 ans ou plus de 6 ans (comme l'étude de Hours *et al.* 2007 ou de Klaeboe *et al.* 2007) présentent un risque pour une utilisation longue également puisque cette catégorie peut inclure des utilisateurs de plus de 10 ans.

L'absence d'analyse de sensibilité est problématique puisqu'une hétérogénéité importante existe entre les études. Le groupe de travail a recalculé les risques relatifs de cette méta-analyse, et l'on remarque que l'étude de Hardell *et al.* 2006 est une étude particulière. Par exemple, le risque relatif (RR) global de gliome pour une utilisation de téléphone mobile pendant plus de 10 ans, en utilisant la méthode de *DerSimonian and Laird*, est de 1,2 [IC 95 % : 0,8 - 1,9] avec une hétérogénéité significative ($Q = 28,3$, $p < 0,001$). En analyse de sensibilité, l'exclusion de l'étude de Hardell *et al.* 2006 conduit a une estimation de risque de 1 [IC 95 % : 0,8 - 1,2] et à l'élimination de l'hétérogénéité ($Q = 6,1$, $p = 0,30$). Cette analyse de sensibilité montre qu'une étude particulière, conduite par le même auteur, est responsable de l'hétérogénéité entre les études.

Kan et al. 2008

Cette méta-analyse publiée en 2008 par Kan *et al.* regroupe les données de 9 études cas-témoins publiées jusqu'à Avril 2006. Elle cherche à estimer le risque pour l'ensemble des tumeurs intracrâniennes. Deux études sont exclues sans justification : l'étude de Inskip *et al.* 2001 et l'étude de cohorte danoise (Johansen *et al.* 2001). Les OR inclus dans le calcul portent à l'origine sur différents types de tumeurs : gliomes, méningiomes, neurinomes de l'acoustique.

Par ailleurs, les OR extraits de Lönn 2004 sur le risque de neurinome et de Lönn 2005 sur le risque de gliome, sont inclus comme s'ils provenaient de deux études indépendantes alors qu'ils sont chacun basés sur les données des mêmes témoins.

De nombreux tests sont effectués, il y a d'ailleurs au total presque deux fois plus de tests statistiques que d'études incluses. Le nombre d'analyses en sous-groupes est d'ailleurs problématique (voir paragraphe sur les analyses en sous-groupes plus bas).

Kundi 2009

Cette publication est, comme celle de Hardell 2007, une revue de la littérature dans laquelle une méta-analyse a été réalisée. Comme pour Hardell *et al.* 2007 et Hardell *et al.* 2008, la méta-analyse présentée s'est limitée au sous-groupe des utilisateurs depuis plus de 10 ans. Ce choix conduit à ne pas inclure les études de (Klaeboe et coll 2007, Hours et coll 2007, Inskip et coll 2001) pour lesquelles les utilisateurs de longue durée sont ceux de plus de 5 ou 7 ans et à réaliser une méta-analyse sur deux ou trois études sélectionnées. Kundi conduit cette méta-analyse en se basant sur un modèle fixe car les tests d'hétérogénéité ne sont pas significatifs. Or, le test d'hétérogénéité est connu pour avoir une puissance statistique limitée ; ainsi la probabilité de détecter une vraie hétérogénéité diminue fortement lorsque peu d'études sont inclues (Higgins et Thompson 2002). Un modèle aléatoire aurait donc été

plus approprié à ce type d'analyse. Aucune analyse d'hétérogénéité n'est conduite, ni de test de sensibilité. Aucune recherche d'un éventuel biais de publication n'est entreprise.

L'article ne permet pas de trouver tous les OR inclus dans la méta-analyse. Par exemple, pour les gliomes, Kundi mentionne l'utilisation des OR rapportés par « Hardell *et al.* 2006c ; Lahkola *et al.* 2007 ; Schûz *et al.* 2006a » ; où « Hardell *et al.* 2006c » fait référence à la publication suivante : *Hardell L, Carlberg M, Hansson Mild K. Pooled analysis of two case-control studies on use of cellular and cordless telephones and the risk for malignant brain tumours diagnosed in 1997-2003. Int Arch Occup Environ Health. 2006;79(8):630-9.* Cette dernière référence n'est pas mentionnée dans le tableau, et la publication originale ne fait aucune mention d'un OR pour les gliomes puisqu'elle s'intéresse aux tumeurs intracrâniennes dans leur ensemble et aux astrocytomes. D'après les effectifs rapportés, il semble que l'auteur ait considéré comme estimateur approché l'odds-ratio de l'ensemble des tumeurs intracrâniennes (dont 90% sont des gliomes).

Ahlbom et al. 2009

Cette méta-analyse est la plus récente publiée à ce jour et a été réalisée par le comité épidémiologie de l'Icnirp. Elle regroupe l'ensemble des études observationnelles sur l'utilisation de téléphone mobile et le risque de tumeurs intracrâniennes publiées jusqu'à environ mi-2008. Aucune information ne permet de déterminer quand la recherche bibliographique s'est arrêtée.

Cette méta-analyse, comme pour la méta-analyse de Lahkola *et al.* 2006, présente une analyse statistique complète en cherchant toutes les sources potentielles de variabilite de l'OR : analyse d'hétérogénéité, analyses de sensibilité de type retrait et ajout, recherche de biais de publication.

Le choix des OR retenus pour l'estimation du méta-OR n'est pas justifié : ainsi les auteurs semblent avoir pris les études originales plutôt que l'étude nordique conjointe de Lakhola, alors que celle-ci contient les données finlandaises, non publiées par ailleurs.

Les auteurs ont analysé le risque de tumeur intracrânienne en fonction de la durée d'utilisation en trois classes d'exposition. La définition de chacune de ces classes regroupe des intervalles de durée très hétérogènes. Les autres métriques d'exposition aux téléphones portables, telles que durée de communication, nombre d'appels, nombre d'années total d'utilisation, n'ont pas été analysées. L'effet différentiel en fonction de la localisation des tumeurs n'a pas non plus été étudié.

Analyses en sous-groupes

Toutes les méta-analyses présentent des analyses en sous groupes. Les deux méta-analyses de Hardell *et al.* (Hardell 2007, Hardell 2008) et celle de Kundi (Kundi 2009), en s'intéressant à une question précise, effectuent en réalité une analyse en sous-groupe sur une métrique choisie et une catégorie d'exposition (utilisations depuis plus de 10 ans pour Kundi, latéralité pour Hardell *et al.*). Contrairement a une étude étiologique ou l'on pose une hypothèse d'existence d'un risque *a priori*, ce choix est effectue *a posteriori* en ayant connaissance des résultats individuels des différentes études utilisées dans la méta-analyse. Il aurait été important de considérer également les méta-OR pour les autres métriques : nombre d'appels, durée d'appels, nombre d'années depuis la première utilisation.

D'une manière générale, ces analyses en sous-groupes sont à considérer avec la plus grande précaution, car la multiplication des tests augmente le risque de conclure à un effet alors qu'il n'y en a pas, c'est-à-dire qu'il devient impossible de déterminer si un résultat significatif est réel ou un simple *artefact* dû à un grand nombre de tests.

On observe ainsi dans les différentes méta-analyses une grande hétérogénéité des résultats de ces analyses en sous groupes. La méta-analyse de Ahlbom *et al.* semble néanmoins moins affectée par ces fluctuations, vraisemblablement grâce à un plus grand nombre

d'études incluses. La méta-analyse de Kan *et al.* est le meilleur exemple de cet effet des comparaisons multiples et des analyses en sous-groupes. Kan *et al.* présentaient une augmentation significative du risque de tumeurs cérébrales pour une utilisation de téléphones mobiles supérieure à 10 ans, RR = 1,25 [IC 95 % : 1,01 - 1,54]. On observait également un facteur protecteur de l'utilisation régulière d'un téléphone mobile sur l'ensemble des tumeurs (RR = 0,90 [IC95 % : 0,81 - 0,99]) et plus particulièrement pour le méningiome (RR = 0,64 [IC 95 % : 0,56 - 0,74]). Pourtant, rien ne permet de discriminer dans cette étude ce qui relève d'un simple effet aléatoire d'une réelle interaction.

Sachant que les méta-analyses conduites jusqu'à présent comprennent de nombreux manques (méthodologiques, d'études incluses), les résultats montrant une augmentation ou une diminution de risque ne peuvent donner lieu à une interprétation causale et doivent être considérés, lorsqu'ils sont plausibles, comme des hypothèses à vérifier.

Résultats

La méta-analyse d'Ahlbom *et al.* 2009, qui inclut un plus grand nombre d'études que les autres méta-analyses, n'a pas montré d'augmentation de risque de tumeur intracrânienne pour aucun des sites de tumeurs étudiés quelles que soient les durées d'utilisation.

Les auteurs remarquent qu'il existe une hétérogénéité entre les études. Cette hétérogénéité ne semble pas le fait des études Interphone, mais proviennent des études conduites par le groupe de Hardell *et al.*

La question de l'utilisation à long terme a été examinée différemment dans les méta-analyses l'ayant considéré et conduisent à des résultats différents pour les gliomes : Ahlbom *et al.* concluent à l'absence de risque à long terme mais considèrent un point de coupure allant jusqu'à 6 ans d'utilisation et n'incluent pas les données finlandaises. Kundi conclut à un OR significativement supérieur à 1 mais ne considère pas de modèles à effets aléatoires dans son analyse et inclut pour l'une des études incluses toutes les tumeurs cérébrales malignes.

La question de la latéralité n'est pas non plus tranchée par les résultats des méta-analyses de Hardell étant données les limites que nous avons évoquées plus haut.

Il est peu probable que la publication du reste de l'étude Interphone modifie le résultat global de cette méta-analyse. Il faudra cependant attendre la publication de l'intégralité de l'étude Interphone. Il sera alors possible de réaliser une nouvelle méta-analyse. Celle-ci devra prendre en compte l'hétérogénéité entre les études : test d'hétérogénéité et tests de sensibilité (retraits et ajouts). Elle devra examiner le rôle du nombre d'appels, de la durée cumulée des appels, le nombre d'années depuis la première utilisation, le nombre d'années d'utilisation selon différents scénarios (différents points de coupure) et de la latéralité (ipsi *vs* controlatéralité).

Conclusions

Depuis 2005, 10 nouvelles études cas-témoins ont été publiées sur l'utilisation de téléphone mobile et le risque de tumeurs intracrâniennes en considérant les tumeurs cérébrales dans leur ensemble ou en sous-groupe : gliomes, neurinomes du nerf acoustique, méningiomes, tumeurs de l'hypophyse, tumeur des glandes parotides. Il y a eu également la publication de l'analyse conjointe des études nordiques Interphone (Lahkola *et al.* 2007), une analyse restreinte au groupe des cas de la partie finlandaise de l'étude Interphone (Hartikka *et al.* 2009), une mise à jour de l'analyse de la cohorte danoise (Schüz *et al.* 2006), et de nombreuses ré-analyses et analyses conjointes des études cas-témoins du groupe de Hardell (Hansson Mild *et al.* 2007, Hardell et Carlberg 2009).

Une étude a porté sur le risque de mélanome oculaire (Stang *et al.* 2009), la cohorte danoise a aussi permis l'étude du risque de tumeurs oculaires (Schuz *et al.* 2006), et deux études

suédoises du groupe de Hardell *et al.* (Hardell *et al.* 2005, Hardell *et al.* 2006) ont porté sur le lymphome non-hodgkinien et sur le cancer des testicules.

Toutes, sauf l'étude de Stang *et al.* 2009, proviennent d'une étude nationale d'Interphone ou d'une des deux études cas-témoins du groupe de Hardell.

Six méta-analyses ont été entreprises par différents groupes pour résumer ces études observationnelles et celles publiées précédemment. Dans l'ensemble, il n'y a pas d'augmentation significative du risque de tumeur cérébrale associé à l'utilisation régulière de téléphone mobile. On n'observe pas non plus de relation « effet-dose » quelle que soit la définition de la « dose » : durée d'utilisation cumulée, nombre d'années d'utilisation, nombre d'appels, année de début d'utilisation.

Il existe une forte hétérogénéité entre les études. Cette hétérogénéité s'explique en grande partie par les deux études cas-témoins du groupe de Hardell *et al.,* qui observent des OR très supérieurs aux autres études.

Les *designs* des différentes études ne permettent pas d'éliminer le possible rôle de biais de sélection ou de déclaration dans les résultats publiés jusqu'à présent.

Les analyses en sous-groupes montrent une augmentation du risque de tumeur intracrânienne pour une utilisation de téléphone mobile depuis plus de dix ans. Cette observation est basée sur une sélection des études ayant utilisé strictement la limite supérieure de 10 ans. Les analyses basées sur d'autres définitions de durée d'utilisation de téléphone mobile (nombre d'années cumulées, nombre d'heures de communication) telles qu'on les retrouve également dans les différentes études observationnelles, ne montrent pas d'augmentation de risque de tumeur intracrânienne. Il existe une grande hétérogénéité entre les études ce qui rend peu interprétables les estimations en sous-groupes réalisées dans les méta-analyses.

Conclusion sur le risque de tumeurs intracrâniennes associé à l'utilisation régulière de téléphone mobile

En conclusion, il n'y a pas à ce jour de preuve de l'augmentation du risque de tumeur intracrânienne lié à l'utilisation régulière de téléphone mobile par un phénomène de promotion. Cependant, une partie de la plus grande étude cas-témoins dans ce domaine, l'étude Interphone, n'a pas encore été publiée. Même si il est peu vraisemblable que les résultats globaux diffèrent, il restera à étudier les sources d'hétérogénéité entre toutes les études.

Certains résultats d'études suggèrent la possibilité d'une augmentation du risque de gliomes pour une utilisation d'une durée supérieure à 10 ans. D'autres semblent indiquer une diminution du risque de méningiomes pour une utilisation régulière de moins de 10 ans.

4.4.2.3 Radars

Le déploiement de nouvelles technologies utilisant des champs électromagnétiques de fréquences supérieures à 2 GHz, réseaux Wi-Fi et WiMAX notamment, rend pertinent l'examen spécifique des études épidémiologiques réalisées sur des populations exposées à des champs utilisant de telles fréquences. Il s'agit principalement de populations ayant été exposées à des radars. Dans la plupart des cas, la puissance délivrée est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle utilisée pour les réseaux Wi-Fi et WiMAX ; néanmoins, l'analyse du risque sanitaire sur ces populations permet par extrapolation de réduire les incertitudes sur le risque à de plus faibles puissances.

La revue a inclus les années antérieures à 2005, car les bandes de fréquences supérieures à 2 GHz n'ont pas été traitées dans les saisines précédentes de l'Afsset. Un total de 19 études a été recensé. Six études seulement permettent d'identifier un groupe spécifiquement exposé à des fréquences supérieures à 2 GHz, 4 études de cohorte (Robinette, Silverman *et*

al. 1980) mise à jour par (Groves, Page *et al.* 2002) et (Szmigielski 1996) mise à jour par Szmigielski 1996; (Finkelstein 1998); (Degrave, Meeusen *et al.* 2009), une étude cas-témoins sur le cancer du cerveau (Grayson 1996) et une étude cas-témoins sur le cancer des testicules (Baumgardt-Elms, Ahrens *et al.* 2002). Les caractéristiques principales de ces études sont résumées dans le Tableau 19. Les autres études sont abordées dans les chapitres suivants, dans la mesure où elles traitent de populations exposées à un large ensemble de fréquences.

Les 4 études de cohorte portent sur des populations de militaires (Szmigielski 1996; Groves, Page *et al.* 2002; Degrave, Meeusen *et al.* 2009) et d'officiers de police (Finkelstein 1998).

Des excès de leucémies ou de lymphomes et leucémies ont été observés parmi les groupes les plus exposés au sein des cohortes de militaires (Szmigielski 1996; Groves, Page *et al.* 2002; Degrave, Meeusen *et al.* 2009). Des excès statistiquement significatifs de mélanomes malins et non significatifs de cancers du testicule ont été observés dans la cohorte des officiers de police ontariens par comparaison à la population générale (Finkelstein 1998).

La limite principale de ces études est l'absence d'un indicateur d'exposition quantitatif. Par ailleurs, les publications relatives à l'étude de Szmigielski manquent de détails sur les méthodes utilisées. Il est à noter que l'étude la plus précise sur l'exposition est également la plus ancienne (Robinette, Silverman *et al.* 1980). Robinette *et al.* ont en effet défini, pour une étude cas-témoins nichée dans la cohorte[80], un indice synthétique basé sur la tâche, la durée d'emploi aux postes exposés et la puissance des équipements utilisés[81]. Il est regrettable que la mise à jour (Groves, Page *et al.* 2002) n'ait pas intégré cette évaluation de l'exposition dans le recueil de données. Enfin, les études de Szmigielski 2001 et (Finkelstein 1998) n'ont pas donné lieu à des mises à jour ni à des études cas-témoins complémentaires avec évaluation précise de l'exposition.

Ces études ont toutefois le mérite de porter sur des populations pour lesquelles les co-expositions sont peu probables. Les co-expositions aux rayonnements ionisants sont évoquées par Degrave pour les militaires (Degrave, Meeusen *et al.* 2009). L'ordre de grandeur des doses donné par les auteurs, de 15 mSv annuels au *maximum*, conduirait à un risque relatif associé aux rayonnements ionisants au *maximum* de l'ordre de 1,2 pour les lymphomes et les leucémies. Or le risque observé dans la cohorte est de 7,22 [IC 95 % : 1,1 - 47,9].

Notons qu'une cohorte de militaires français de la Marine Nationale potentiellement exposés aux radars a été constituée par le CRSSA. Les résultats sont en cours d'analyse***.***

Les 230 cas et 920 témoins de l'étude sur les tumeurs du cerveau de Grayson (Grayson 1996) ont été sélectionnés au sein d'une cohorte de 60 000 aviateurs militaires américains (Grayson and Lyons 1996). Les facteurs de risque étudiés sont les champs électromagnétiques de basse fréquence, les radiofréquences et les rayonnements ionisants. Pour les deux premiers, l'évaluation a été faite par une matrice emplois-expositions élaborée à partir de registres sur les incidents d'exposition. Les auteurs ont pris en compte les interactions entre ces facteurs dans l'analyse. Une association statistiquement significative entre l'exposition (en oui / non) aux radiofréquences et le risque de tumeurs a été observée (OR = 1,39 [IC 95 % : 1,01 - 1,90]), sans toutefois la mise en évidence d'une relation entre le niveau d'exposition et l'effet.

---

[80] Etude cas-témoins nichée dans une cohorte : étude consistant à sélectionner au sein d'une cohorte d'une part les individus atteints de la pathologie que l'on cherche à étudier (cas) et d'autre part des individus non atteints de cette pathologie (témoins), et à comparer les expositions des deux groupes.

[81] Cet indicateur leur avait permis de mettre en évidence une association significative entre le niveau d'exposition et (i) la mortalité toutes causes, (ii) la mortalité par cancers respiratoires, et une association non significative entre le niveau d'exposition et la mortalité par cancers lymphatiques et hématopoïétiques

L'étude de Baumgards-Elms *et al.* sur le cancer des testicules porte sur 267 cas et 797 témoins (Baumgardt-Elms, Ahrens *et al.* 2002). L'exposition a été évaluée à partir d'un questionnaire détaillé qui portait sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Aucun effet de l'exposition aux radars n'est mis en évidence. Peu de cas et de témoins toutefois étaient exposés (7 et 8 % respectivement) et il est probable, d'après les auteurs eux-mêmes, que parmi ceux classés exposés, certains ne l'aient pas été dans la réalité.

Conclusion

Les excès de lymphomes et leucémies observés et leur répétition sur trois cohortes de militaires exposés à des radars montrent que l'on ne peut à ce jour écarter la possibilité d'une association entre l'exposition aux radiofréquences (radars professionnels) de plus de 2 GHz et le risque de lymphomes et leucémies.

4.4.2.4 Autres Etudes

Dans ces études où l'exposition est le plus souvent abordée uniquement par la profession, les résultats sont à considérer à titre indicatif, comme générateurs éventuels d'hypothèses.

4.4.2.4.1 Tous cancers

Une étude de cohorte réalisée sur 481 femmes italiennes de l'industrie du plastique exposées à des radiofréquences comprises entre 300 kHz et 300 GHz a mis en évidence un excès de cancers par rapport à la population générale (Lagorio, Rossi *et al.* 1997). Celui-ci ne repose que sur 6 cas observés (pour 2 attendus) et des co-expositions aux solvants et au chlorure de vinyle pourraient avoir contribué à l'excès observé.

4.4.2.4.2 Leucémies et lymphomes

Une étude de mortalité proportionnelle (Milham, 1985) avait suggéré une association entre le risque de lymphomes et de leucémies et la pratique d'une profession exposant aux champs électromagnétiques. Ces résultats sont difficiles à interpréter à la fois du fait de la diversité des fréquences auxquelles sont exposés les travailleurs concernés et du fait de la méthodologie employée[82].

L'étude de cohorte de Garland sur le personnel de la marine militaire américaine examine l'incidence des leucémies en fonction des professions exercées (Garland, Shaw *et al.* 1990). Un excès statistiquement significatif a été observé pour les aides électriciens : 7 cas observés pour 2,8 attendus, mais ceux-ci sont probablement exposés plutôt à des champs basse fréquence. En revanche, un excès non significatif a été également observé pour les aviateurs en charge du matériel (4 cas observés pour 1,4 attendus) qui peuvent être exposés à des radiofréquences supérieures à 2 GHz.

Zheng *et al.* ont observé un excès de lymphomes non hodgkiniens et de leucémies lymphoïdes chroniques (combinés) chez les travailleurs du secteur des télécommunications filaires et radio (Zheng, Blair *et al.* 2002).

[82] Les analyses de mortalité proportionnelle (PMR : « proportional mortality ratio ») consiste à comparer la répartition selon la cause de décès des cas observés dans la population étudiée à la répartition observée au sein d'une population de référence, ces comparaisons peuvent également se faire entre sous-groupes de la population d'étude. Elles sont difficiles à interpréter, un excès observé pouvant provenir à la fois de la pathologie concernée ou de déficits sur les autres pathologies {Breslow, 1987}.

Enfin, Karipidis a montré une association non significative entre l'exposition aux radiofréquences évaluée par une matrice emploi-expositions et la survenue de lymphomes non Hodgkiniens (test de tendance : p = 0,09) (Karipidis, Benke *et al.* 2007).

4.4.2.4.3 Cancer du cerveau

L'étude de Thomas *et al.* a montré un excès de cancers du cerveau pour les individus ayant des professions exposantes dans le secteur de l'électricité et de l'électronique (Thomas, Stolley *et al.* 1987). Cet excès porte plus précisément sur les individus effectuant des activités de conception, production, installation et maintenance. Les auteurs évoquent toutefois le rôle possible de co-expositions aux solvants dans cet excès.

Dans le cadre de l'étude Interphone en Allemagne, une étude de l'exposition professionnelle aux radiofréquences et microondes a été conduite par Berg *et al.* (2006). Elle a utilisé le questionnaire détaillé évaluant les activités reliées à une exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences et microondes développé par l' « *International Exposure Assessment Committee* » de l'étude Interphone. Les activités ont été considérées comme impliquant une exposition « probable » ou « élevée » (c'est-à-dire certaine et constante pendant les heures de travail et parfois supérieure à la limite proposée par l'Icnirp pour la population générale – 0,08 W/Kg) ; 147 activités ont ainsi été classées comme « probables » et 130 comme « élevées ». Parmi les 2 241 cas et témoins recrutés pour cette étude (*cf*. Tableau 12), 536 ont déclaré au moins une activité. Pour chacune des 734 activités professionnelles ainsi identifiées, une matrice activité-exposition a été construite et l'exposition classée en 3 catégories : activités fortement, probablement et non probablement exposées. Les expositions individuelles ont ensuite été calculées, aboutissant à 4 catégories d'individus : fortement exposés (87 personnes), probablement exposés (104), non probablement exposés (108), et non exposés (1 942). (A noter : l'utilisation de téléphone mobile n'a pas été considérée comme un confondant, des analyses de sensibilité ayant montré qu'elle n'influençait pas les résultats). Les analyses ont été conduites séparément pour les gliomes et les méningiomes, en utilisant des modèles de régression logistique conditionnelle.

Il n'a pas été montré d'association significative entre l'exposition professionnelle aux radiofréquences et les tumeurs cérébrales dans l'ensemble de la population étudiée. Pour les gliomes, l'*Odds Ratio* ajusté est de 1,04 [IC 95 % : 0,68 – 1,61].

En incluant la durée de l'exposition et en considérant uniquement les personnes fortement exposées, les auteurs observent que les OR pour les gliomes augmentent légèrement, de façon non significative : OR = 1,11 [IC 95 % : 0,48 – 2,56] pour les personnes exposées pendant moins de 10 ans, et OR = 1,39 [IC 95 % : 0,67 – 2,88] pour les personnes exposées 10 ans et plus. Pour les méningiomes, les ORs sont de : 1,14 [IC 95 % : 0,37 – 3,48] pour une exposition de moins de 10 ans, et 1,55 [IC 95 % : 0,52 – 4,62] pour une exposition de 10 ans et plus.

Cette étude en population générale n'a pas la puissance nécessaire (seulement 13 cas et 20 témoins fortement exposés 10 ans pour les gliomes, et 6 cas et 8 témoins pour les méningiomes). Un design recrutant en milieu professionnel avec des expositions substantielles serait plus robuste.

4.4.2.4.4 Cancer des testicules

L'article de Davis (Davis and Mostofi 1993) rapporte de façon détaillée un *cluster* observé de cancers des testicules chez six officiers de police utilisant des fusils radars et incitent à la réalisation d'études étiologiques. L'étude cas-témoins de Hayes a abordé l'exposition aux microondes de deux façons : exposition déclarée en réponse à un questionnaire et profession exposante. Une association entre l'exposition déclarée et le cancer des testicules

a été mise en évidence, mais celle-ci n'a pas été confirmée par l'examen des relations entre professions exposantes et la pathologie (Hayes, Brown *et al.* 1990). L'étude de cohorte de 60 000 aviateurs militaires américains de Grayson a mis en évidence un excès de cancers des testicules par rapport à un groupe de militaires non navigants (Grayson and Lyons 1996). En revanche, rappelons que l'étude cas-témoins de Baumgards-Elms *et al.* n'a pas montré d'association (Baumgardt-Elms, Ahrens *et al.* 2002) mais sa puissance était limitée.

4.4.2.4.5 Cancer du sein chez l'homme

L'étude cas-témoins de Demers, basée sur 227 cas et 300 témoins montre une association entre les métiers exposant aux champs électromagnétiques et le cancer du sein chez l'homme (OR = 1,8 [IC 95 % : 1,0 - 3,7], plus élevé pour le secteur « communications et diffusion » qui inclut des professions exposées aux radars (OR = 2,9 [IC 95 % : 0,8 – 10] (Demers, Thomas *et al.* 1991).

4.4.2.4.6 Mélanomes oculaires

Trois études cas-témoins ont été réalisées sur l'association entre champs électromagnétiques et mélanomes oculaires (Gallagher, Elwood *et al.* 1985; Holly, Aston *et al.* 1996; Stang, Anastassiou *et al.* 2001), tumeurs considérées comme des cancers rares. Les études de Gallagher *et al.* et de Stang *et al.* n'ont pas montré d'association. Celle d'Holly *et al.* montre un doublement du risque chez les sujets exposés professionnellement aux microondes et aux radars (Holly, Aston *et al.* 1996).

4.4.2.4.7 Conclusion

On ne peut également, dans l'état actuel des connaissances, pas conclure pour les autres pathologies étudiées : tumeurs cérébrales, cancers des testicules, mélanomes.

4.4.2.5 Conclusions sur les études épidémiologiques

Il n'y a pas à ce jour de preuve de l'augmentation du risque de tumeur intracrânienne lié à l'utilisation régulière de téléphone mobile par un phénomène de promotion. Cependant, une partie de la plus grande étude cas-témoins dans ce domaine, l'étude Interphone, n'a pas encore été publiée, même s'il est peu vraisemblable que les résultats globaux diffèrent. Il restera à étudier les sources d'hétérogénéité entre toutes les études.

Certains résultats d'études suggèrent la possibilité d'une augmentation du risque de gliomes pour une utilisation d'une durée supérieure à 10 ans. D'autres semblent indiquer une diminution du risque de méningiomes pour une utilisation régulière de moins de 10 ans.

En revanche, les excès de lymphomes et leucémies observés et leur répétition sur trois cohortes de militaires exposés à des radars montrent que l'on ne peut à ce jour écarter la possibilité d'une association entre l'exposition aux radiofréquences de plus de 2 GHz aux niveaux d'exposition de ces applications et le risque de lymphomes et leucémies.

On ne peut également dans l'état actuel des connaissances pas conclure sur les risques pour les autres pathologies étudiées : tumeurs cérébrales, cancers des testicules, mélanomes, cancers du sein, mélanomes oculaires.

Tableau 12 : Récapitulatif des résultats publiés sur les analyses INTERPHONE nationales de l'utilisation des téléphones portables[1]

Pays	Tranche d'âge	Année du diagnostic	Nombre de cas et de témoins	*OR* et IC à 95 % Utilisation régulière Nb de cas	*OR* et IC à 95 % Début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé Nb de cas	*OR* et IC à 95 % Utilisation ipsilatérale, début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé Nb de cas	*OR* et IC à 95 % Utilisation controlatérale, début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé Nb de cas
Gliomes							
Danemark (Christensen et coll., 2005)	20-69	2000-2002	Bas grade 81 155 Haut grade 171 330	Bas grade 1,08 (0,58 ; 2,00) 47 Haut grade 0,58 (0,37, 0,90) 59	Bas grade 1,64 (0,44, 6,12) 6 Haut grade 0,48 (0,19 ; 1,26) 8	SO	SO
France (Hours et coll., 2007)	30-59	2001-2003	96 96	1,15 (0,65 ; 2,05) 59	*46 mois+ 1,96 (0,74 ; 5,20) 21*	SO	SO
Allemagne (Schuz et coll., 2006)	30-69	2000-2003	366 1,494	0,98 (0 ,74 ; 1,29) 138	2,20 (0,94 ; 5,11) 12	SO	SO
Japon (Takebayashi et coll., 2008)	30-69	2000-2004	83 163	1,22 (0,63 ; 2,37) 56	*6,5 ans + 0,60 (0,20 ; 1,78)*	SO	SO
Norvège (Klaeboe et coll 2007)	19-69	2001-2002	289 358	0,6 (0,4 ; 0,9) 161	*6 années + 0,8 (0,5 ; 1,2)* 70	*6 années + 1,3 (0,8 ; 2,1) 39*	*6 années + 0,8 (0,5 ; 1,4) 32*
Suède (Lonn et coll., 2005)	20-69	2000-2002	371 674	0,8 (0,6 ; 1,0) 214	0,9 (0,5 ; 1,5) 25	1,6 (0,8 ; 3,4) 15	0,7 (0,3 ; I,5) 11
Royaume-Uni (Hepworth et coll., 2006)	18-69	2000-2004	966 1,716	0,94 (0,78 ; 1,13) 508	0,90 (0,63 ; 1,28) 66	SO	SO
Pays scandinaves ensemble (Lahkola et coll., 2007)		2000-2004	1,522 3,301	0,78 (0,68 ; 0,91) 867	0,95 (0,74 ; 1,23) 143	1,39 (1,01 ; 1,92) 77	0,98 (0,71 ; 1,37) 67
Méningiomes							
Danemark (Christensen et coll., 2005)	20-69	2000-2002	175 316	0,83 (0,54 ; 1,28) 67	1,02 (0,32 ; 3,24) 6	SO	SO
France (Hours et coll., 2007)	30-59	2001-2003	145 145	0,74 (0,43 ; 1,28) 71	*46 mois+ 0,73 (0,28 ; 1,91) 15*	SO	SO
Allemagne (Schuz et coll., 2006)	30-69	2000-2003	381 762	0,84 (0,62 ; 1,13) 104	1,09 (0,35 ; 3,37) 5	SO	SO
Japon (Takebayashi et coll., 2008)	30-69	2000-2004	128 229	0,7O (0,42 ; 1,16) 55	*5,2 ans 1,05 (0,52 ; 2,11) 30*	SO	SO
Norvège (Klaeboe et coll 2007)	19-69	2001-2002	207 358	0,8 (0,5 ; 1,1) 98	*6 années + 1,0 (0,6 ; 1,8) 36*	*6 années + 1,1 (0,6 ; 2,3) 17*	*6 années + 1,2 (0,6 ; 2,3) 18*
Suède (Lonn et coll., 2005)	20-69	2000-2002	273 674	0,7 (0,5 ; 0,9) 118	0,9 (0,4 ; 1,9) 8	1,3 (0,5 ; 3,9) 5	0,5 (0,1 ; 1,7) 3
Pays scandinaves ensemble (Lahkola et coll., 2008)		2000-2004	1 209 3 299	0,76 (0,65 ; 0,89) 573	0,91 (0,67 ; 1,25) 73	1,05 (0,67 ; 1,65) 33	0,62 (0,38 ; 1,03) 24
Neurinomes de l'acoustique							
Danemark (Christensen et coll., 2004)	20-69	2000-2002	106 212	0,90 (0,51 ; 1,57) 45	0,22 (0,04 ; 1,11) 2	SO	SO

Pays	Tranche d'âge	Année du diagnostic	Nombre de cas et de témoins	*OR* et IC à 95 % Utilisation régulière	Nb de cas	*OR* et IC à 95 % Début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé	Nb de cas	*OR* et IC à 95 % Utilisation ipsilatérale, début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé	Nb de cas	*OR* et IC à 95 % Utilisation controlatérale, début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé	Nb de cas
France (Hours et coll., 2007)	30-59	2001-2003	109 214	0,92 (0,53 ; 1,59)	58	*46 mois+* *0,66 (0,28 ; 1,57)*	*14*	SO		SO	
Allemagne (Schlehofer et coll., 2007)	30-69	2000-2003	97 194	0,67 (0,38 ; 1,19)	29	SO	0	SO		SO	
Japon (Takebayashi et coll., 2006)	30-69	2000-2004	101 339	0,73 (0,43 ; 1,23)	51	*8 années +* *0,79 (0,24 ; 2,65)*	*4*	SO		SO	
Norvège (Klaeboe et coll 2007)	19-69	2001-2002	45 358	0,5 (0,2 ; 1,0)	22	*6 années +* *0,5 (0,2 ; 1,4)*	*8*	*6 années +* *0,9 (0,3 ; 2,8)*	*5*	*6 années +* *0,8 (0,2 ; 2,5)*	*4*
Suède (Lonn et coll., 2004)	20-69	1999-2002	148 604	1,0 (0,6 ; 1,5)	89	1,9 (0,9 ; 4,1)	14	3,9 (1,6 ; 9,5)	12	0,8 (0,2 ; 2,9)	4
Pays scandinaves ensemble (Schoemaker et coll., 2005)		1999-2004	678 3,553	0,9 (0,7 ; 1,1)	360	1,0 (0,7 ; 1,5)	47	1,3 (0,8 ; 2,0) *1,8 (1,1-3,1)**	31 *23*	1,0 (0,6 ; 1,7) *0,9 (0,5 ; 1,8)**	20 *12*
Tumeurs de la glande parotide											
Israël (Sadetzki et coll., 2007)	18+	2001-2003	Total 460 1,266 Bénignes 402 1,072 Malignes 58 294	Total 0,87 (0,68 ; 1,13) Bénignes 0,85 (0,64 ; 1,12) Malignes 1,06 (0,54 ; 2,10)	285 252 33	Total 0,86 (0,42 ; 1,77) *Total – utilisateurs réguliers seulement* *1,45 (0,82 ; 2,57)*	13 *13*	Total 1,60 (0,68 ; 3,72) Bénignes 1,97 (0,81 ; 4,85)	10 10	Total 0,58 (0,15 ; 2,32)	3
Suède et Danemark (Lonn et coll., 2006)	20-69	2000-2002	Bénignes 112 321 Malignes 60 681	Bénignes 0,9 (0,5 ; 1,5) Malignes 0,7 (0,4 ; 1,3)	77 25	Bénignes 1,4 (0,5 ; 3,9) Malignes 0,4 (0,1 ; 2,6)	7 2	Bénignes 2,6 (0,9 ; 7,9) Malignes 0,7 (0,1 ; 5,7)	6 1	Bénignes 0,3 (0,0 ; 2,3) Malignes SO	1 0

* Analyse selon la durée d'utilisation plutôt que selon le temps écoulé depuis le début de l'utilisation.

[1] : A la différence des tableaux ci-après, l'effet de la latéralité seule (ipsi/contro ever regulal/never), n'est pas présentée par le Circ.

Source : www.iarc.fr/fr/research-groups/RAD/Interphone8oct08_fr.pdf

Tableau 13: Téléphone mobile et risque de tumeurs cérébrales malignes - Gliomes

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas*	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
Lönn *et al.*, 2005 Suède (Umea, Stockholm, Göteborg, Lund)	Cas-Témoins	1er septembre 2000 – 31 août 2002	371(150 F, 221 H) 20-69 ans Hôpitaux neuro-oncologiques et neuro-chirurgicaux et registres régionaux des cancers Participation : 74%	674 (356 F, 318 H) appariement sexe, âge (± 5 ans / cas), résidence Registre population Suède Participation : 71 %	Protocole Interphone : interview face à face assistée par ordinateur. Caractéristiques du téléphone utilisé (analogique, digital, modèle). Nombre d'années depuis la première utilisation régulière jusqu'au diagnostic (latence); Nombre années d'utilisation; Utilisation cumulée (heures); Nombre d'appels cumulés.	Utilisation régulière ou jamais : OR= 0,8 (0,6 – 1,0) Début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé : OR= 0,9 (0,5 – 1,5) Utilisation > 10 ans : OR = 0,9 (0,5 – 1,6) -heures cumulées (> 500 h) : OR= 0,7 (0,4-1,0) -analogique : OR = 0,8 (0,5 – 1,2) -digital : OR = 0,8 (0,6 – 1,0) -Utilisation ipsilatérale : OR = 1,1 (0,8 – 1,5) -Utilisation controlatérale: OR = 0,7 (0,5 – 1,0)	Age, sexe, région, niveau d'éducation	Etude Interphone Légère augmentation (non significative) du risque de gliome liée à la durée d'utilisation ipsilatérale (>10 ans : OR = 1,8; 0,8 – 3,9) non retrouvée dans l'analyse de l'utilisation ipsilatérale restreinte aux tumeurs temporales ou pariétales.
Collatz Christensen *et al.*, 2005 Danemark	Cas-Témoins	1er septembre 2000 – 30 septembre 2002	252 20-69 ans Services de neuro-chrirugie et Registre Danois du Cancer Participation : 71%	485 appariement individuel sexe, âge (± 5 ans / cas), Registre population Participation : 64%	Protocole Interphone : interview face à face assistée par ordinateur. Téléphone utilisé Nombre d'années depuis la première utilisation régulière jusqu'au diagnostic (latence); Nombre années d'utilisation; Utilisation cumulée (heures); Nombre d'appels cumulés.	Gliomes de bas grade Utilisation régulière : OR= 1,08 (0,58 – 2,0) Début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé : OR = 1,64 (0,44 – 6,12) Heures cumulées (>467,9) : OR= 1,18 (0,45 - 3,08) Gliomes de haut grade Utilisation régulière : OR= 0,58 (0,37 – 0,90) Début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé : OR = 0,48 (0,19 – 1,26) Heures cumulées (>467,9) : OR= 0,52 (0,25 - 1,10)	Régression logistique non conditionnelle. Niveau d'éducation, situation maritale, région.	Etude Interphone Vérification de l'absence de biais de réminiscence par comparaison avec les données opérateurs pour un échantillon limité de cas et de témoins et par test de mémoire. Pas d'effet de l'exposition aux radiations ionisantes.
Hardell *et al.*, 2005	Cas-Témoins	1er janvier 1997 – 30 juin	709 (distribution selon le	558 (distribution selon	Auto-Questionnaire.	Effet de la résidence rurale plus prononcé pour les	Age, sexe, catégorie socio-	Ré-analyse en fonction résidence

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas*	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
Suède (Uppsala/Örebro, Stockholm, Linköping, Göteborg)		2000	sexe non precisé) 20-80 ans Participation : 88% Neuro-oncologie, Registre de cancers.	le sexe non precisé) Appariement âge, sexe, résidence. Registre de population. Participation :91%	Modèle de téléphone (analogique, digital, sans fil). Nombre et durée des appels. Utilisation (voiture, antenne extérieure ou oreillette) Résidence urbaine ou rurale.	téléphones digitaux : OR = 1,4 (0,98 – 2,0), et 3.2 (1,2 – 8,4) pour latence de 5 ans. Résidence urbaine : OR = 0,9 (0,8 – 1,2) et 0,9 (0,6 – 1,4). Effet plus net pour les tumeurs cérébrales malignes.	économique.	urbaine *vs* rurale d'une étude publiée (Hardell *et al.*, Int J Oncol 2003;22:399–407). Très faibles effectifs (1 seul cas tumeur maligne pour téléphone digital, résidence rurale, 5 ans de latence : OR = 8,4 (1,02 - 69)
Hardell *et al.*, 2006 Suède (Uppsala/Örebro, Linköping)	Cas-Témoins	1er juillet 2000 – 31 Décembre 2003.	317 (128 F, 189 H) 20-80 ans Neuro-oncologie et Registres régionaux de cancers. Participation : 88%	692 (400 F, 292 H) Appariement individuel : âge, (± 5 ans), sexe, région de résidence. Registres de population. Participation :84%	Mêmes méthodes que l'étude précédente y compris le questionnaire.	Téléphone analogique : OR = 2,6 (1,5 – 4,3) latence >10ans : OR = 3,5 (2,0 – 6,4) Digital : OR = 1,9 (1,3 – 2,7) latence > 10 ans : OR = 3,6 (1,7 – 7,5) Sans Fil : OR = 2,1 (1,4 – 3,0) latence >10 ans : OR = 2,9 (1,6 – 5,2)	Sexe, âge, index socio-économique, année de diagnostic.	ORs augmentent avec la durée cumulée d'utilisation et sont les plus élevés pour les astrocytomes de haut grade Risque apparaît plus élevé pour les localisations frontales que pour les temporales.
Hepworth *et al.*, 2006 Royaume Uni (5 régions, 43% de la population du RU)	Cas-Témoins (population)	1er Décembre 2000 – 30 juin 2003 (Nord) ou 29 Février 2004.	966 (362 F, 604 H) 18-69 ans Hôpitaux, Registres de cancers. Participation : 51%	1716 (887 F, 829 H) Appariement fréquence (Sud-Est) ou individuel (Nord): âge, sexe, résidence. Listes de médecins généralistes Participation : 43%	Protocole Interphone : interview face à face assistée par ordinateur. Caractéristiques du téléphone utilisé (analogique, digital, modèle). Nombre d'années depuis la première utilisation régulière jusqu'au diagnostic (latence); nombre années d'utilisation; utilisation cumulée (heures); nombre d'appels	Utilisation régulière : OR = 0,94 (0,78 – 1,13) latence ≥ 10 ans : OR = 0,90 (0,63 – 1,28) Utilisation ≥ 10 ans : OR = 1,14 (0,74-1,73) > 544 heures: OR = 0,94 (0,71 – 1,23) > 6909 appels : OR = 0,97 (0,74 – 1,28) Utilisation : - Ipsilatrale : OR = 1,24 (1,02 – 1,52) - Controlatérale : OR = 0,75 (0,61 – 0,93)	Age (groupes de 5 ans), sexe, région, catégorie socio-économique et date d'interview.	Etude Interphone Utilisation « régulière » = utilisation au moins 1 fois par semaine pendant au moins 6 mois au cours de la période de plus d'un an avant la date de diagnostic. Les risques complémentaires associés à l'utilisation ipsi- et controlatérale peuvent être dus à un biais de réminiscence.

Auteurs; année de publication Pays	**Type d'étude**	**Période de recrutement**	**Cas***	**Témoins**	**Mesure de l'exposition**	**Risque (IC 95%)**	**Ajustements**	**Commentaires**
					cumulés.			
Schüz et coll, 2006 Allemagne	Cas-Témoins (population)	15 octobre 2000 – 31 octobre 2003	366 (216 H, 150 F) 30-69 ans cliniques neuro-chirurgicales (Bielefeld, Mainz, Heidelberg, Mannheim) Participation : 79,6%	732 (432 H, 300 F) Participation : 62%	Protocole Interphone: Interview face à face modèle de téléphone (téléphone sans fil) Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Utilisation régulière : OR= 0,98 (0,74 – 1,29) Début d'utilisation 10 ans ou plus dans le passé : OR = 2,20 (0,94 – 5,11) Heures cumulées > 195 h : OR= 1,01 (0,64- 1,60) >4350 appels : OR = 1,34 (0,86 – 2,07)	Age, statut social et région	Etude Interphone Pas d'excès de tumeurs temporales. (probabilité de gliome temporal liée seulement à l'âge). Pas d'effet de l'utilisation de téléphones sans fil.
Hardell et coll 2006 Suède	Cas-Témoins	1997-2003	905 tumeurs malignes (539 astrocytomes de haut grade, 124 astrocytomes de bas grade, 242 autres tumeurs malignes 20-80 ans Registres régionaux du cancer Suède Participation : 90%	2162 appariement sexe, âge, résidence Registres population générale Participation : 89%	Interview ou auto-questionnaire : Modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Utilisation totale plus d'un an: Tumeurs malignes : téléphone analogique : OR = 1,2 (0,97 – 1,5) téléphone digital : OR = 1,1 (0,9 – 1,4) téléphone sans fil : OR = 1,1 (0,9 – 1,3) Astrocytomes de haut grade : téléphone analogique : OR = 1,3 (1,001 – 1,7) téléphone digital : OR = 1,3 (1,03 – 1,6) téléphone sans fil : OR = 1,2 (0,9 – 1,4)	Analyse multivariée : Régression logistique non conditionnelle Sexe, âge, statut socioéconomique, année de diagnostic.	Analyse en pool de deux études conduites en 1997-2000 et 2000-2003. Pas de cas communs avec l'étude Interphone suédoise.
Schüz *et al.*, 2006 Danemark	Cohorte d'abonnés privés.	1982-1995	Total de 14 249 cancers survenus dans la cohorte (15 001 cas attendus) : SIR = 0,95 (0,93 – 0,97) 580 tumeurs cérébrales et du système nerveux (600 cas attendus) 257 gliomes (254 cas attendus)	420 095 personnes de 18 ans et plus (62 542 F- 357 553 H) ayant souscrit un abonnement téléphonique entre 1982 et 1995. Suivis jusqu'au 31 Décembre 2002.	Etude basée sur liaison d'enregistre-ments (registres de population, registre national danois du cancer). N.B. Membres de la cohorte exclus de la population de référence. Données d'utilisation	Tumeurs cérébrales et nerveuses : SIR = 0,97 (0,67 – 1,09) Gliomes : SIR = 1.01 (0,89 -1,14) pas de différences selon la localisation de la tumeur (léger excès de localisations temporales : SIR = 1,21 ; 0,91-1,58). Abonnés long terme (10	Comparaison avec les sujets inclus dans l'étude Interphone danoise (liaison de fichiers).	Suivi de la cohorte publiée en 2001. Durée moyenne de suivi : 8,5 ans (max. 21 ans) Ne prend pas en compte les abonnements professionnels, ni les abonnements postérieurs à 1995

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas*	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
					du téléphone fournies par opérateurs.	ans et +) : SIR = 0,66 (0,44 – 0,95)		(inclus dans la population de référence), ce qui peut réduire les estimations. Sujets inclus dans la cohorte 4 fois plus souvent utilisateurs fréquents que les témoins Interphone.
Lahkola *et al.*, 2007 5 pays Nord Europe (Danemark, Finlande, Norvège, Suède, Sud-Est Angleterre)	Cas-Témoins (population)	Septembre 2000 – Février 2004	1521 (628 F, 893 H) 20–69 ans (pays nordiques) 18-59 ans (Sud Est Angleterre) Hôpitaux et registres de cancer. Participation : 60%	3301 (1771 F, 1530 H) Appariement (fréquence) sur âge, sexe, résidence. Registres de populations (pays nordiques), listes de médecins généralistes (Sud-Est Angleterre); Participation : 50 %	Protocole Interphone : interview face à face assistée par ordinateur.	Utilisation régulière : OR = 0,78 (0,68 – 0,91) latence ≥ 10 ans : OR = 0,95 (0,74 – 1,23) Utilisation ≥ 10 ans : OR = 0,94 (0,69-1,28) > 503 heures: OR = 0,90 (0,73 – 1,10) > 7792 appels : OR = 0,91 (0,74 – 1,12) Utilisation : - Ipsilatérale : OR = 1,13 (0,97 – 1,31) latence ≥ 10 ans : OR = 1,39 (1,01 – 1,92) p tendance utilisateurs seulement = 0,18 - Controlatérale : OR = 0,75 (0,64 – 0,88) latence>≥ 10 ans : OR = 0,98 (0,71 – 1,37) p tendance utilisateurs seulement = 0,20	Régression logistique conditionnelle strates définies par pays, région, sexe, âge (±5 ans) à la date de référence. Confondants possibles (niveau d'instruction, antécédents familiaux de gliome et radiothérapie antérieure) n'affectent pas les résultats de plus de 2%.	Analyse en pool de 5 études Interphone. Critères d'âge plus étendus que ceux d'Interphone. Porte sur plus de la moitié des malades inclus dans Interphone (2708 gliomes). « Les résultats n'indiquent pas d'augmentation de risque en relation avec l'utilisation de téléphone mobile ».
Klaeboe *et al.*, 2007 Norvège (Sud/Est et Centre/Ouest)	Cas-Témoins	2001-2002	289 (119 F, 170 H) 19-69 ans. 5 Hopitaux universitaires Participation :77% (36 % réponses par proches)	358 (182 F, 176 H) Appariement (fréquence) sur âge, sexe, résidence. Registre de population. Participation : 69%	Protocole Interphone : interview face à face assistée par ordinateur. Catégorie de référence : non utilisateurs ou utilisateurs occasionnels.	Utilisateur régulier *vs* non utilisateur ou non régulier : OR = 0,6 (0,4-0,9) Quartile supérieur : latence ≥ 6 ans : OR = 0,5 (0,2 – 1,4) Utilisation ≥ 6 ans : OR = 0,5 (0,2-1,4)	Age, sexe, résidence, niveau d'instruction.	Etude Interphone

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas*	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
					Cut off = 1er et 3ème quartiles chez les témoins. Caractéristiques du téléphone utilisé (analogique, digital, modèle). Nombre d'années depuis la première utilisation régulière jusqu'au diagnostic (latence); nombre années d'utilisation; utilisation cumulée (heures); nombre d'appels cumulés.	> 425 heures: OR = 0,6 (0,3 – 1,8) > 7000 appels : OR = 0,7 (0,2 – 1,9) Utilisation - Ipsilatérale: OR = 1,0 (0,7 – 1,4) - Controlatérale: OR = 0,7 (0,5 – 1,1)		
Hansson Mild *et al.*, 2007 Suède	Cas-Témoins	1er janvier 1997 – 30 juin 2000 et 1er juillet 2000 – 31 Décembre 2003.	905 tumeurs malignes 20-80 ans Neuro-oncologie et Registres régionaux de cancers. Participation : 90%	2162 Appariement individuel : âge, (± 5 ans), sexe, région de résidence. Registres de population. Participation : 89%	Auto-Questionnaire complété par interview téléphonique.	Latence > 10 ans: Astrocytomes I et II - analogique OR = 1,6 (0,6 – 4,1) - digital OR = 1,3 (0,2 – 11) - sans fil OR = 1,6 (0,5 -4,6) pas d'augmentation significative avec latence Astrocytomes III et IV - analogique OR = 2,7 (1,8 – 4,2) - digital OR = 3,8 (1,8 – 8,1) - sans fil OR = 2,2 (1,3 – 3,9) Risque augmente avec latence et durée d'utilisation.	Age, sexe, statut socio-économique, année de diagnostic.	Analyse en pool de 2 études antérieures (Hardell *et al.*, Int J Oncol 2003;22:399–407, et Hardell *et al.*, 2005) Analyse par latence et durées d'utilisation
Hours *et al.*, 2007 France (Lyon, Paris)	Cas-Témoins	1er Décembre 2000 – 31Août 2003	96 (37 F, 59 H) 30-59 ans	96 (37 F, 59 H) Appariement individuel sexe, âge (± 5 ans),	Protocole Interphone : interview face à face, assistée par	Utilisateur régulier *vs* non utilisateur ou non régulier : OR = 1,15 (0,65–2,05)	Catégorie socio-professionnelle, statut tabagique,	Etude Interphone. Augmentation non significative du risque

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas*	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
			Services hospitaliers Participation : 60%	résidence. Listes électorales. Participation : 74,7%	ordinateur. Informations socio-démographiques, tabac, antécédents médicaux, expositions rayonnements (médicale et professionnelle), historique professionnel. Téléphone(s) utilisé(s), Nombre et durée des appels, mode d'utilisation (kit piéton, rural, urbain).	Utilisation : - ipsilatérale : OR = 1,15 (0,55-2,43) - controlatérale : OR = 1,17 (0,52–2,65) ≥ 2 téléphones : OR = 2,18 (0,98–4,83) Quartile supérieur : ≥46 mois : OR = 1,96 (0,74–5,20) ≥260 heures : OR = 1,79 (0,74–4,34) durée moyenne ≥ 5,5 min. : OR = 1,72 (0,75–3,96) nombre appels ≥5100 : OR = 1,53 (0,62–3,77)	statut matrimonial.	chez les plus « gros consommateurs » : utilisateurs de longue durée, temps de communication élevé, ayant utilisé un plus grand nombre de téléphones.
Takebayashi et al. ; 2008 Japon	Cas-Témoins	Décembre 2000-Novembre 2004	101 (39F, 62H) 30-69 ans Hôpitaux Participation : 75,6%	161 (60F, 101H) Appariement individuel âge, sexe, résidence. population générale par numéro de téléphone au hasard. Participation : 49,4%	Protocole Interphone : interview face à face modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Usage régulier *vs* Jamais : OR = 0,9 (0,5 – 1,61) Quartile supérieur -durée totale d'utilisation (7,2 ans et plus) OR = 0,75 (0,31 – 1,82) - heures d'utilisation : OR = 1.33 (0,58 – 3,09)	Sexe, âge, niveau d'éducation Situation familiale.	Etude Interphone Analogique vs digital : pas de différence.
Hartikka *et al.*, 2009 Finlande	Cas-Cas	Novembre 2000-Octobre 2002	99 (47 H, 52 F) avec imagerie mesurable et données d'utilisation du téléphone. 20-60 ans Services de neurochirurgie, Hopitaux universitaires Helsinki et Tampere. Participation : 78% (totalité des 144 cas enregistrés)	21 (des 99 malades) non utilisateurs.	Mesure radiologique de la distance entre le centre de la tumeur et la ligne oreille-coin de la bouche (logiciel GridMaster conçu pour l'étude Interphone). Utilisation du téléphone : interview face à face assistée par ordinateur (protocole Interphone).	Distance tumeur-source : - Utilisateurs 5,9 cm - Non utilisateurs 6,2 cm [Médiane 5,6 - vs 6,1] Proportions de tumeurs dans le quartile supérieur (<= 4,6 cm) : - Non utilisateurs : 14% - Utilisateurs réguliers : 28% Indicateurs d'utilisation du téléphone chez les « Exposés » (<= 4,6 cm): - utilisation régulière OR = 2,58 (0,65 – 10,28) ->540 h: OR = 2,52 (0,45 - 13,9)	Sexe, âge, statut socio-économique.	Sous-ensemble de l'étude Interphone Critères d'âge plus étendus que ceux d'Interphone. Proportion de cas avec une distance de moins de 4,6 cm non significativement plus élevée chez les utilisateurs que chez les non utilisateurs. Pas d'effet significatif de l'utilisation du téléphone mobile pour les gliomes les plus proches de la source d'exposition.

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas*	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
						- ipsilatérale : OR = 1,34 (0,29 – 6,20) -controlatérale : OR = 4,9 (1,13 – 21,46)		
Hardell et Carlberg,, 2009	Cas-Témoins	1er janvier 1997 – 30 juin 2000 et 1er juillet 2000 – 31 Décembre 2003.	905 (distribution selon le sexe non precisé) Neuro-oncologie et Registres régionaux de cancers. Participation : 90%	2162 (distribution selon le sexe non precisé) Appariement individuel : âge, (± 5 ans), sexe, région de résidence. Registres de population. Participation : 89%	Auto-Questionnaire complété par interview téléphonique. Modèle de téléphone (analogique, digital, sans fil). Nombre et durée des appels.	Astrocytomes grades I-IV (n= 663): OR=1,4 (1,1-1,7) - ipsilatéral OR = 2,0 (1,5-2,5) - ipsilatéral >10 ans OR=3,3 (2,.0-5,4) - controlatéral OR = 1,0 (0,7 – 1,4) Première utilisation <20 ans : - téléphone mobile OR = 5,2 (2,2 – 12) -téléphone sans fil OR = 4,4 (1,9 – 10)	Age, sexe, statut socio-économique, année de diagnostic	Ré-analyse de l'étude en pool publiée en 2006. Analyse par classes d'âge (<2, 20-49, 50-80), et latéralité. OR élevés correspondent à des effectifs faibles.

Tableau 14: Téléphone mobile et risque de méningiomes

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
Christensen et coll 2005 Danemark	Cas-Témoins	1 septembre 2000 - 31 aout 2002	175 20-69 ans Registre cancer Danois Participation : 74%	316 appariement individuel sexe, âge (± 5 ans / cas), Registre population Participation : 64%	Protocole Interphone Interview face à face par une infirmière ou un étudiant en médecine : modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Utilisation régulière ou jamais : OR= 0,83 (0,54 – 1,28) Début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé : OR = 1.02 (0,32 – 3,24) Heures cumulées (>467,9) : OR= 0,64 (0,26-1,61)	Régression logistique non conditionnelle. Niveau d'éducation, situation maritale, région	Etude Interphone Latéralité : pas d'association entre la localisation du méningiome et l'utilisation du téléphone.
Lönn et coll 2005 Suède (Umeå, Stockholm, Göteborg, Lund)	Cas-Témoins	1 septembre 2000 - 31 aout 2002	273 (194 F, 79 H) 20-69 ans Hôpitaux neuro-oncologiques et neuro-chirurgicaux et registres régionaux des cancers Participation : 85 %	674 (356 F, 318 H) appariement sexe, âge (± 5 ans / cas), résidence Registre population Suède Participation : 71 %	Interview modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Utilisation régulière ou jamais : OR= 0,7 (0,5 – 0,9) Début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé : OR= 0,9 (0,4 – 1,9) Utilisation > 10 ans : OR = 0,7 (0,.3 – 1,6) -heures cumulées (> 500 h) : OR= 0,7 (0,4-1,2) -analogique : OR = 0,7 (0,4 – 1,3) -digital : OR = 0,6 (0,5 – 0,9) -Utilisation ipsilatérale : OR = 0,8 (0,5 – 1,1) -Utilisation controlatérale: OR = 0,6 (0,4 – 0,9)	Age, sexe, région, niveau d'éducation	Etude Interphone
Hardell *et al.*, 2005a Suède	Cas-Témoins	1 juillet 2000 – 31 Décembre 2003	305 (229 F, 76 H) 20-80 ans Registre des cancers Participation : 89 %	692 (400F, 292 H) appariement, âge (± 5 ans), lieu de résidence. Registre de population Participation : 84 %	Questionnaire téléphonique Exposition téléphone cellulaire et sans fil + courrier pour préciser antenne fixe de voiture et côté d'utilisation du téléphone	Téléphone analogique : OR = 1,7 (0,97–3,0) Utilisation depuis 10 ans : OR = 2,1 (1,1–4.3) Téléphone digital : OR = 1,3 (0,9 – 1,9) utilisation depuis 10 ans : OR = 1,5 (0,6 – 3,9) Téléphone sans fil : OR = 1,3 (0,9 – 1,9) utilisation depuis 10 ans :	Age, sexe, niveau socio-économique, année de diagnostic.	Pas d'effet de latéralité

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
						OR = 1,9 (0,97 – 3,6)		
Hardell et coll 2006a Suède	Cas-Témoins	1997-2003	916 20-80 ans Registres régionaux du cancer Suède Participation : 88%	2162 appariement sexe, âge, résidence Registres population générale Participation : 89%	Interview ou auto-questionnaire : Modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Type de téléphone : analogique: OR = 1,3 (0,99 – 1,7) digital : OR = 1,1 (0,9 – 1,3) sans fil : OR = 1,1 (0,9 – 1,4) Utilisation cumulée > 1000 H : analogique : OR = 1,4 (0,5– 3,8) digital : OR = 0,7 (0,3 – 1,4) sans fil : OR= 1,6 (1,1 -2,2	Sexe, âge, statut socioéconomique	Analyse en pool de deux études conduites en 1997-2000 et 2000-2003. Pas de cas communs avec l'étude Interphone suédoise.
Schüz et coll 2006a Allemagne	Cas-Témoins	15 octobre 2000 - 31 octobre 2003	381 (103 H, 278 F) 30 – 69 ans cliniques neuro-chirurgicales Participation : 88%	762 (206 H, 556 F) appariement sexe, âge, résidence Registre de population Participation : 62%	Interview face à face modèle de téléphone (téléphone sans fil) Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Utilisation régulière OR= 0,84 (0,62 – 1,13) Début d'utilisation 10 ans ou plus dans le passé : OR = 1,09 (0,35 – 3,37) Heures cumulées > 195 h : OR= 1,04 (0,60- 1,81) >4350 appels : OR = 0,76 (0,44 – 1,34)	Age, statut social et région	Etude Interphone
Schuz et coll 2006b Danemark	Cohorte d'abonnés privés.	1982-1995	68 (79 cas attendus)	420 095 personnes de 18 ans et plus (62 542 F- 357 553 H) ayant souscrit un abonnement téléphonique entre 1982 et 1995. Suivis jusqu'au 31 Décembre 2002.	Etude basée sur liaison d'enregistre-ments (registres de population, registre national danois du cancer). Données d'utilisation du téléphone fournies par opérateurs.	SIR = 0,86 (0,67 – 1,09).	Comparaison avec les sujets inclus dans l'étude Interphone danoise (liaison de fichiers).	Suivi de la cohorte publiée en 2001. Durée moyenne de suivi : 8,5 ans (max. 21 ans) Ne prend pas en compte les abonnements professionnels, ni les abonnements postérieurs à 1995 (inclus dans la population de référence), ce qui peut réduire les estimations. Sujets inclus dans la

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
								cohorte 4 fois plus souvent utilisateurs fréquents que les témoins Interphone.
Klaeboe et coll 2007 Norvège Sud/Est et Centre/ouest	Cas-Témoins	2001- 2002	207 (156 F, 51 H) 19-69 ans. 5 Hopitaux universitaires Participation :77% (36 % réponses par proches) Participation : 71%	358 (182 F, 176 H) Appariement (fréquence) sur âge, sexe, résidence. Registre de population. Participation : 69%	Protocole Interphone : interview face à face assistée par ordinateur. Catégorie de référence : non utilisateurs ou utilisateurs occasionnels. Cut off = 1er et 3ème quartiles chez les témoins. Caractéristiques du téléphone utilisé (analogique, digital, modèle). Nombre d'années depuis la première utilisation régulière jusqu'au diagnostic (latence); nombre années d'utilisation; utilisation cumulée (heures); nombre d'appels cumulés.	Utilisateur régulier ou non régulier : OR = 0,8 (0,5-1,1) Début d'utilisation 6 ans et + dans le passé : OR = 1,0 (0,6 – 1,8) Utilisation ≥ 6 ans : OR = 1,2 (0,6 – 2,2) heures cumulées (≥450 h) : OR = 0,9 (0,5 – 1,8) Téléphone : -analogique (6ans et +) : OR = 1,2 (0,5 – 2,4) -digital (6 ans et +) : : OR = 1,0 (0,6 – 1,8 -Utilisation : ipsilatérale :(6 ans +) : OR = 1,1 (0,6 – 2,3) - controlatérale (6ans +) : OR = 0,9 (0,9 – 2,3)	Age, sexe, résidence, niveau d'instruction	Etude Interphone
Hours *et al.*, 2007 France (Lyon, Paris)	Cas-Témoins	1 Décembre 2000 – 31Août 2003	145 (119 F, 26 H) 30-59 ans Services hospitaliers Participation : 60%	145 (119 F, 26 H) Appariement individuel sexe, âge (± 5 ans), résidence. Listes électorales. Participation : 74,7%	Interview face à face, assistée par ordinateur. Informations sociodémographiques, tabac, antécédents médicaux, expositions rayonnements (médicale et professionnelle),	Utilisateur régulier *vs* non utilisateur ou non régulier : OR = 0,74 (0,43–1,28) Ipsilatéral : OR = 0,87 (0,44 – 1,75) Controlatéral : OR = 0,65 (0,33–1,27) ≥ 2 téléphones : OR = 0,73 (0,35–1,53) Quartile supérieur : ≥46 mois :	catégorie socio-professionnelle, statut tabagique, statut matrimonial.	Etude Interphone. Augmentation non significative du risque chez les plus « gros consommateurs » : utilisateurs de longue durée, temps de communication élevé, ayant utilisé un plus grand nombre de téléphones.

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
					historique professionnel. Téléphone(s) utilisé(s), Nombre et durée des appels, mode d'utilisation (kit piéton, rural, urbain).	OR = 0,73 (0,28–1,91) ≥260 heures : OR = 0,78 (0,29–2,07) durée moyenne ≥ 5,5 min : OR = 1,21 (0,54–2,68)		
Takebayashi et coll., 2008 Japon	Cas-Témoins	Décembre 2000-Novembre 2004	128 (29 F, 99 H) 30-69 ans Hôpitaux Participation : 75,6%	229 (48 F, 181 H) appariement individuel âge, sexe, résidence. population générale Participation : 49,4%	Protocole Interphone : Interview face à face, modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Usage régulier *vs* Jamais : OR = 0,7 (0,42 – 1,16) Quartile supérieur -durée totale d'utilisation (5,2 ans et plus) / OR = 1,05 (0,52 – 2,11) - heures cumulées : OR = 0,92 (0,43 – 1,96) -analogue+digital : OR = 1,06 (0,36 – 3,09) -ipsilatérale : OR = 1 ,14 (0,65 – 2,01) -controlatérale: OR = 0,65 (0,37 – 1,13)	Sexe, âge, niveau d'éducation Situation familiale	Etude Interphone
Lahkola et coll 2008 5 pays Europe du Nord : Danemark, Finlande,Norvège Suède, Royaume-Uni (sud de l'Angleterre)	Cas-Témoins	20 septembre 2000 - février 2004	1209 20-69 ans Hôpitaux de neuro-chirurgie, oncologie et neurologie Registres régionaux ou nationaux du Cancer Participation : 82 %	3299 appariement âge ± 5 ans, sexe, résidence. registre de la population des pays nordiques Participation : 85 %	Protocole Interphone : interview face à face assistée par ordinateur.	Utilisation régulière : OR= 0,76 (0,65 – 0,89) Début d'utilisation 10 ans et + dans le passé : OR = 0,91 (0,67 – 1,25) Utilisation ≥ 10 ans : OR = 0,85 (0,57-1,26) - heures cumulées: OR = 0,88 (0,68 – 1,13) -analogue : OR = 0,76 (0,58 – 0,98) -digital : OR = 0,74 (0,63 – 0,87) - Ipsilatrale : OR = 0,81 (0,66 – 0,99) Début d'utilisation 10 ans + : 0R = 1,05 (0,67 – 1,65)	Régression logistique conditionnelle strates définies par pays, région, sexe, âge (±5 ans) à la date de référence.	Analyse en pool de 5 études Interphone nationales. Critères d'âge plus étendus que ceux d'Interphone.

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
						- Controlatérale : OR = 0,67 (0,54 – 0,83) Début d'utilisation 10 ans + OR = 0,62 (0,38 – 1,03)		

Tableau 15: Téléphone mobile et risque de neurinomes du nerf acoustique

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
Christensen et coll 2004 Danemark	Cas-Témoins	1 septembre 2000-31 aout 2002	106 (52 F, 54 H) 20-69 ans Dept ORL Université de Copenhague. Participation : 82%	212 (104 F, 108 H) appariement sexe, âge (± 5 ans / cas), Registre population Participation : 64%	Protocole Interphone : Interview face à face, modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Utilisation régulière ou jamais : OR= 0,9 (0,51 – 1,57) début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé : OR = 0,22 (0,04– 1,11) -heures cumulées : OR= 0,66 (0,25-1,74) -analogique : OR = 0,26 (0,08– 0,83) -digital : OR = 1,11 (0,60– 2,04)	Niveau d'éducation, kit main libre, situation maritale, région	Etude Interphone
Lönn et coll 2004a Suède (Stockholm, Göteborg, Lund)	Cas-Témoins	1er janvier 2000- 31 aout 2002	148 (68 F, 80 H) 20-69 ans Hôpitaux de neurochirurgie, neurologie et ORL et Registre du Cancer Participation : 93%	604 (314 F, 290 H) Appariement sur âge, sexe, résidence. Population générale de la Suède Participation : 72%	Protocole Interphone : Interview face à face, modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Utilisateur régulier ou non régulier : OR = 1,0 (0,6 – 1,5) début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé : OR = 1,9 (0,9 – 4,1) Utilisation ≥ 10 ans : OR = 1,6 (0,7- 3,6) - heures cumulées: OR = 1,1 (0,6– 2,1) -analogique : OR = 1,6 (0,9– 2,8) -digital : OR = 0,9 (0,60– 1,4) Utilisation : - Ipsilatérale: OR = 1,1 (0,7 – 1,6) - Controlatérale: OR = 0,9 (0,6 – 1,4)	Age, sexe, résidence et niveau d'éducation	Etude Interphone
Schoemaker et coll 2005 5 pays d'Europe du Nord	Cas-Témoins	1 septembre 1999- 31 aout 2004	678 (360 F, 318 H) 18-69 ans Centres de neurochirurgie, neurologie, otorhinolaryngologie Registre cancer Participation : 83%	3553 (1907 F, 1646 H) Appariement sur âge et résidence. Registres de population. Participation : 51%	Protocole Interphone : Interview face à face, modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Utilisateur régulier ou non régulier : OR = 0,9 (0,7 – 1,1) début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé : OR = 1,0 (0,7 – 1,5) Utilisation ≥ 10 ans : OR = 1,1 (0,7- 1,8)	Age, sexe, résidence, niveau d'instruction, région, année d'interview	Etude Interphone Analyse en pool de 5 études Interphone.

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
						- heures cumulées: OR = 0,9 (0,7– 1,2) -analogique : OR = 0,9 (0,7– 1,2) -digital : OR = 0,9 (0,7– 1,1) Utilisation : - Ipsilatérale: OR = 0,9 (0,7 – 1,1) - Controlatérale: OR = 1 1 (0,9 – 1,4)		
Hardell *et al.*, 2005d Suède (Uppsala/Örebro, Stockholm, Linköping, Göteborg)	Cas-Témoins	1 janvier 1997 – 30 juin 2000	579 « tumeurs bénignes (distribution selon le sexe non precisé) neurinomes non individualisés 20-80 ans Participation : 88% Neuro-oncologie, Registre de cancers.	528 (distribution selon le sexe non precisé) Appariement âge, sexe, résidence. Registre de population. Participation :91%	Auto-Questionnaire. Modèle de téléphone (analogique, digital, sans fil). Nombre et durée des appels. Utilisation (voiture, antenne extérieure ou oreillette) Résidence urbaine ou rurale.	Effet de la résidence rurale plus prononcé pour tous les téléphones : - analogique OR = 1,7 (1,01 – 3,0) - digital : OR = 1,6 (0,98 – 2,7) - sans fil OR = 1,2 (0,8 – 1,9) Résidence urbaine : OR respectifs a = 1,3 (0,9 – 1,9) d = 0,8 (0,6 – 1,01) sf = 0,8 (0,6 – 1,1) Effet observé pour les seuls neurinomes et non pour les méningiomes (données non présentées).	Age, sexe, catégorie socio-économique. Régression logistique non conditionnelle.	Ré-analyse en fonction résidence urbaine *vs* rurale d'une étude publiée (Hardell *et al.*, Int J Oncol 2003;22:399–407). Faibles effectifs.
Hardell *et al.*, 2005a Suède (Uppsala/Örebro, Linköping)	Cas-Témoins	1 juillet 2000 – 31 Décembre 2003	84 (45 F, 39 H) 20-80 ans Registre des cancers Participation : 89 % (calculé sur 413 (285 F, 128 H) tumeurs bénignes	692 (400F, 292 H) (ensemble des témoins de l'étude) appariement, âge (± 5 ans), lieu de résidence. Registre de population Participation : 84 %	Auto-questionnaire complété par interview téléphonique Exposition téléphone cellulaire et sans fil + courrier pour préciser antenne fixe de voiture et côté d'utilisation du téléphone	Téléphone analogique : OR = 4,2 (1,8 - 10) Utilisation depuis 15 ans : OR = 8,4 (1,6 - 45) Téléphone digital : OR = 2,0 (1,05 – 3,8) Téléphone sans fil : OR = 1,5 (0,8 – 2,9) Analyse multivariée (régression logistique) : - analogique OR = 2,1 (1,1 – 3,8)	Age, sexe, niveau socio-économique, année de diagnostic.	OR élévés calculés sur effectifs faibles Risque significatif uniquement pour téléphones analogiques en analyse multivariée.

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
						- digital OR = 1,4 (0,8 – 2,4) - sans fil OR = 1,2 (0,8 – 2,0)		
Hardell et coll 2006a Suède	Cas-Témoins	1997-2003	243 (distribution selon le sexe non precisé) 20-80 ans registres régionaux du cancer Suède Participation : 88% (calculé sur les 1254 tumeurs bénignes)	2162 (distribution selon le sexe non precisé) appariement sexe, âge, résidence registre population générale Participation : 89%	Auto-questionnaire ± Interview téléphonique. Modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Type de téléphone : - analogique OR = 2,9 (2,0 – 4,3) [analyse multivariée : OR = 2,5 (1,8 – 3,5)] - digital OR = 1,5 (1,1 – 2,1) - sans fil OR = 1,5 (1,04 – 2,0) Utilisation : > 1000 H analogique : OR = 5,1 (1,9 – 1,4) digital : OR = 3,1 (1,5 – 6,4) sans fil : OR= 2,1 (1,2 -3,7)	Sexe, âge, indice socioéconomique, année de diagnostic.	Analyse en pool de 2 études antérieures (Hardell *et al.* 2005a et Hardell *et al.* 2005b)
Schüz *et al.*, 2006c Danemark	Cohorte d'abonnés privés.	1982-1995	Total de 14 249 cancers survenus dans la cohorte (15 001 cas attendus) : SIR = 0,95 (0,93 – 0,97) 32 tumeurs des nerfs crâniens (31 neurinomes de l'acoustique confirmés) (43,7 cas attendus)	420 095 personnes de 18 ans et plus (62 542 F- 357 553 H) ayant souscrit un abonnement téléphonique entre 1982 et 1995. Suivis jusqu'au 31 Décembre 2002.	Etude basée sur liaison d'enregistre-ments (registres de population, registre national danois du cancer). N.B. Membres de la cohorte exclus de la population de référence. Données d'utilisation du téléphone fournies par opérateurs.	Tumeurs des nerfs crâniens : SIR = 0,73 (0,50 – 1,03)	Comparaison avec les sujets inclus dans l'étude Interphone danoise (liaison de fichiers).	Suivi de la cohorte publiée en 2001. Durée moyenne de suivi : 8,5 ans (max. 21 ans) Ne prend pas en compte les abonnements professionnels, ni les abonnements postérieurs à 1995 (inclus dans la population de référence), ce qui peut réduire les estimations. Sujets inclus dans la cohorte 4 fois plus souvent utilisateurs fréquents que les

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
								témoins Interphone.
Takebayashi et coll., 2006 Japon	Cas-Témoins	Décembre 2000- Novembre 2004	97 (52F, 45H) 30-69 ans Hôpitaux Participation : 84,2%	330 (198 F, 132H) Appariement âge, sexe, résidence. population générale par numéro de téléphone au hasard. Participation : 52,4%	Protocole Interphone : Interview face à face. Modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Usage régulier *ou* Jamais : OR = 0,73 (0,43 – 1,23) -durée totale d'utilisation (8 ans et plus) OR = 0,79 (0,24 – 2,65) - heures cumulées : OR = 0,67 (0,25- 1,83) -analogue + digital : OR = 1,19 (0,37 – 3,79) - Ipsilatérale: OR = 0,90 (0,50 – 1,62) - Controlatérale: OR = 0,93 (0,55 – 1,59)	Niveau d'éducation Situation familiale.	Etude Interphone
Schlehofer et coll 2007 Allemagne (Bielefeld, Heidelberg, Mayence, Mannheim)	Cas-Témoins	Octobre 2000- octobre 2003	97 (46 F, 51 H) 30- 69 ans Départements de neurochirurgie, et d'ORL (Mayence). Participation : 89%.	194 (92 F, 102 H) Appariement individuel sexe, âge (± 2 ans), région. (appariement post-hoc pour assurer une date de référence identique à la date de diagnostic des cas). Registres de population. Participation : 55%.	Protocole Interphone : interview face à face assistée par ordinateur : Modèle de téléphone Fréquence d'utilisation. Années d'utilisation Exposition de loisir ou professionnelle au bruit. Expositions professionnelles aux RF (Berg *et al.*, 2006). Exposition rayonnements ionisants (diagnostic, traitement).	Régressions logistiques multiples : Utilisateur régulier : OR = 0,67 (0,38 – 1,19) début d'utilisation 5-9 ans dans le passé : OR = 0,53 (0,22 – 1,27) - > 195 heures cumulées : OR = 0,35 (0,12 – 1,01) Exposition au bruit persistant : OR = 2,31 (1,15 – 4,66) Rhume des foins : OR = 2,20 (1,09 – 4,45)	Statut socioéconomique, région, âge au diagnostic, tabac, audition, acouphènes, autres facteurs de risque.	Etude Interphone
Mild HK *et al.*, 2007 Suède	Cas-témoins	1997 - 2003	1254 tumeurs bénignes (nombre neurinomes non précisé) 20-80 ans registres régionaux du cancer Suède Participation : 88%	2162 Participation : 89%	cf. Hardell *et al.*, 2006	Analyse multivariée, latence > 10 ans, téléphone analogique : OR = 2,2 (1,3 – 3,8) autres téléphones : OR non significatifs.	Sexe, âge, statut socioéconomique, année de diagnostic.	Nouvelle analyse en pool et par régression logistique de 2 études antérieures (Hardell *et al.* 2005a et Hardell *et al.* 2005b) N.B. Incohérences entre texte et tableaux.

Auteurs; année de publication Pays	Type d'étude	Période de recrutement	Cas	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
Hours et coll 2007	Cas-Témoins	1 Décembre 2000 – 31Août 2003	109 (56F 53 H) 30-59 ans Services hospitaliers Participation : 60%	214 (112F 102 H) Appariement individuel sexe, âge (± 5 ans), résidence. Listes électorales. Participation : 74,7%	Protocole Interphone : interview face à face, assistée par ordinateur. Informations socio-démographiques, tabac, antécédents médicaux, expositions rayonnements (médicale et professionnelle), historique professionnel. Téléphone(s) utilisé(s), Nombre et durée des appels, mode d'utilisation (kit piéton, rural, urbain).	Utilisateur régulier *vs* non utilisateur ou non régulier : OR = 0,92 (0,53–1,59) Controlatéral : OR = 1,23 (0,64–2,38) Ipsilatéral : OR = 0,62 (0,32 – 1,20) ≥ 2 téléphones : OR = 0,82 (0,43–1,55) Quartile supérieur : ≥46 mois : OR = 0,66 (0,28–1,57) ≥260 heures : OR = 0,92 (0,41–2,07) durée moyenne ≥ 5,5 min. : OR = 1,35 (0,63–2,92)	catégorie socio-professionnelle, statut tabagique, statut matrimonial.	Etude Interphone. Augmentation non significative du risque chez les plus « gros consommateurs » : utilisateurs de longue durée, temps de communication élevé, ayant utilisé un plus grand nombre de téléphones.
Klaeboe *et al.*, 2007 Norvège (Sud/Est et Centre/Ouest)	Cas-Témoins	2001-2002	45 (23 F, 22 H) 19-69 ans. 5 Hopitaux universitaires Participation :68%	358 (182 F, 176 H) Appariement (fréquence) sur âge, sexe, résidence. Registre de population. Participation : 69%	Protocole Interphone : interview face à face assistée par ordinateur. Caractéristiques du téléphone utilisé (analogique, digital, modèle). Nombre d'années depuis la première utilisation régulière jusqu'au diagnostic (latence); nombre années d'utilisation; utilisation cumulée (heures); nombre d'appels cumulés.	Utilisateur régulier ou non régulier : OR = 0,5 (0,2 – 1,0) début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé ≥ 6 ans : OR = 0,5 (0,2 – 1,4) Utilisation ≥ 6 ans : OR = 0,5 (0,2-1,5) - heures cumulées: OR = 0,6 (0,2– 1,8) analogique : OR = 0,8 (0,3– 2,2) digital : OR = 0,2 (0,2 – 0,9) - Ipsilatérale : OR = 0,7 (0,3 – 1,4) - Controlatérale : OR = 0,9 (0,5 – 1,9)	Age, sexe, résidence, niveau d'instruction.	Etude Interphone Catégorie de référence : non utilisateurs ou utilisateurs occasionnels. Cut off = 1er et 3ème quartiles chez les témoins.
Hardell et Carlberg,	Cas-Témoins	1 janvier 1997 –	1254 (distribution selon	2162 (distribution selon	Auto-Questionnaire	OR=1,7 (1,2 - 2,3)	Age, sexe, statut	Ré-analyse de l'étude

Auteurs; année de publication Pays	**Type d'étude**	**Période de recrutement**	**Cas**	**Témoins**	**Mesure de l'exposition**	**Risque (IC 95%)**	**Ajustements**	**Commentaires**
2009 Suède		30 juin 2000 et 1 juillet 2000 – 31 Décembre 2003.	le sexe non precisé) tumeurs bénignes 243 Neurinomes Neuro-oncologie et Registres régionaux de cancers. Participation : 88%	le sexe non precisé) Appariement individuel : âge, (± 5 ans), sexe, région de résidence. Registres de population. Participation : 89%	complété par interview téléphonique. Modèle de téléphone (analogique, digital, sans fil). Durée d'utilisation. Nombre et durée des appels.	>10 ans OR=2,9 (1,6 – 5,5) - ipsilatéral OR = 1,8 (1,2 - 2,6) - controlatéral OR = 1,4 (0,9 – 2,1) Première utilisation <20 ans : - téléphone mobile OR = 5,0 (1,5 – 16) - téléphone sans fil OR = 0,7 (0,1 – 5,9)	socio-économique, année de diagnostic	en pool publiée en 2006. Analyse par classes d'âge (<2, 20-49, 50-80), et latéralité. OR élevés correspondent à des effectifs faibles.

Tableau 16: Téléphone mobile et risque de tumeurs des glandes parotides

Auteurs année de publication Pays	**Type d'étude**	**Période de recrutement**	**Cas**	**Témoins**	**Mesure de l'exposition**	**Risque (IC 95%)**	**Ajustements**	**Commentaires**
Lönn *et al.*, 2006 Suède Danemark	Cas-Témoins	Septembre 2000 - août 2002	172 (86 F, 86 H) 20-69 ans Centres neurochirurgie, oncologie, otorhinolaryngologie Registres de cancers - 60 tumeurs malignes Participation : 85% -112 tumeurs bénignes (Suède) Participation : 88%	681 (346 F, 335 H) Danemark : 3 témoins/cas appariement individuel (âge, sexe) Participation : 60% Suède : appariement de fréquence (âge, sexe, résidence) et 321 témoins (167 F, 154 H) pour les tumeurs bénignes Participation : 72% Registres de population	Interview Modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années depuis la première utilisation Années d'utilisation	Utilisation régulière ou Jamais : Tumeurs **malignes** : OR = 0,7 (0,4 – 1,3) Tumeurs **bénignes** : 0R = 0,9 (0,5 – 1,5) Début d'utilisation 10 ans ou + dans le passé T. Malignes OR = 0,4 (0,1 – 2,6) T. Bénignes OR = 1,4 (0,5 – 3,9) Utilisation > 10 ans T. Malignes OR = 0,3 (0,0 – 2,5) T. Bénignes OR = 1,1 (0,4 – 3,6) Heures cumulées (≥ 450 h) : T. malignes OR = 0,6 (0,2 – 1,8) T. Bénignes OR = 1,0 (0,5 – 2,1) Utilisation -ipsilatérale : OR = 1,2 (0,6 – 2,6) OR = 1,4 (0,9 – 2,2) Utilisation controlatérale: T. malignes OR = 0,5 (0,2 – 1,1) T. bénignes OR = 0,7 (0,4 – 1,1)	Age, sexe, zone de résidence, pays, niveau d'éducation.	Etude Interphone
Schüz *et al.*, 2006c Danemark	Cohorte d'abonnés privés.	1982-1995	Total de 14 249 cancers survenus dans la cohorte (15 001 cas attendus) : SIR = 0,95 (0,93 – 0,97) 26 tumeurs des glandes salivaires (26 H, 0 F) (34 cas attendus)	420 095 personnes de 18 ans et plus (62 542 F-357 553 H) ayant souscrit un abonnement téléphonique entre 1982 et 1995. Suivis jusqu'au 31 Décembre 2002.	Etude basée sur liaison d'enregistre-ments (registres de population, registre national danois du cancer). N.B. Membres de la cohorte exclus de la population de référence. Données d'utilisation du téléphone	Tumeurs des glandes salivaires : SIR = 0,77 Hommes : SIR = 0,86 (0,56 -1,26) Femmes : SIR[83] = 0,00 (0,00 – 1,02)	Comparaison avec les sujets inclus dans l'étude Interphone danoise (liaison de fichiers).	Suivi de la cohorte publiée en 2001. Durée moyenne de suivi : 8,5 ans (max. 21 ans) Ne prend pas en compte les abonnements professionnels, ni les abonnements postérieurs à 1995 (inclus dans la population de référence), ce qui peut réduire les estimations.

[83] Standard incidence ratio (0 cas observés).

Auteurs année de publication Pays	**Type d'étude**	**Période de recrutement**	**Cas**	**Témoins**	**Mesure de l'exposition**	**Risque (IC 95%)**	**Ajustements**	**Commentaires**
					fournies par opérateurs.			Sujets inclus dans la cohorte 4 fois plus souvent utilisateurs fréquents que les témoins Interphone.
Sadetzki et coll; 2008a Israël	Cas-Témoins	Janvier 2001 - décembre 2003	460 (206 F, 254 H) 30-59 ans Centres d'otorhinolaryngologie -58 tumeurs malignes -264 tumeurs bénignes Participation : 87%	1266 (715 F, 551 H) appariement individuel : sexe, âge, Participation : 66% Registre population générale	Interview Modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années depuis la première utilisation Années d'utilisation	Utilisation régulière ou Jamais : Tumeurs **malignes** : OR = 1,06 (0,54 – 2,10) Tumeurs **bénignes** : OR = 0,85 (0,64 – 1,12) Utilisation régulière ≥ 10 ans : T. mal. OR = 0,45 (0,05 – 4,28) T. bén. OR = 1,42 (0,9 – 2,12) Heures cumulées (≥ 1035 h) : T. mal. OR= 1,22 (0,43-3,48) T. ben. OR = 1,08 (0,72 – 1,62) Utilisation depuis ≥ 10 ans : - ipsilatérale : OR = 1,6 (0,68 – 3,72) -controlatérale : OR = 0,58 (0,15 – 2,32)	Sexe, âge, date de l'interview	Etude Interphone L'analyse restreinte aux conditions d'exposition les plus fortes (usage intensif en zones rurales), tend à montrer une élévation non significative du risque (petit nombre de cas). Utilisation ipsilatérale : ORs = 1,58 (1,11 – 2,24) et 1,49 (1,05 – 2,13) pour le plus grand nombre et la plus grande durée cumulée d'appels.

Tableau 17: Téléphone mobile et risque de tumeurs (adénomes) de l'hypophyse

Auteurs année de publication Pays	**Type d'étude**	**Période de recrutement**	**Cas**	**Témoins**	**Mesure de l'exposition**	**Risque (IC 95%)**	**Ajustements**	**Commentaires**
Takebayashi et coll. 2008 Japon	Cas-Témoins	Décembre 2000-Novembre 2004	101 (39 F, 62 H) 30-69 ans Hôpitaux Participation : 75,6%	161 (60F, 101H) appariement individuel âge, sexe, résidence. population générale par numéro de téléphone au hasard. Participation : 49,4%	Interview Modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années depuis la première utilisation Années d'utilisation	Utilisation régulière ou Jamais : OR = 0,9 (0,5 – 1,61) Quartile supérieur : -durée totale d'utilisation (7,2 ans et plus) OR = 0,75 (0,31 – 1,82) - heures d'utilisation : OR = 1,33 (0,58 – 3,09) -analogique+digital : OR = 0,54 (0,17 – 1,75) -ipsilatérale : OR = 0,54 (0,17 – 1,75) -controlatérale: OR = 0,54 (0,17 – 1,75)	Sexe, âge, niveau d'éducation Situation familiale	Etude Interphone Analogique vs digital : pas de différence.
Schoemaker, Swerdlow 2009 Sud-Est Angleterre	Cas-Témoins	Janvier 2001-28 Février 2005	291 (155 F, 136 H) 18-59 ans Centres de neurochirurgie ou d'oncologie et Thames Cancer Registry. Participation : 63%	630 (336 F, 294 H) appariement sexe, âge, circonscription de santé. Listes de médecins généralistes de la région. Participation : 43%	Protocole Interphone Interview face à face. Modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années depuis la première utilisation Années d'utilisation	Utilisation régulière *vs* Jamais ou irréguliere : OR = 0,9 (0,7 – 1,3) Utilisation ≥ 10 ans : OR = 1,0 (0,5 – 1,9) > 51 heures cumulées : OR = 1,6 (0,8 – 3,6) Quartile supérieur - nombre appels : OR = 1.2 (0,7 – 1.9) - heures d'utilisation : OR = 1.1 (0,7 – 1.7) -analogique : OR = 1,0 (0,6 – 1,6) -digital : OR = 0,9 (0,7 – 1,3)	Sexe, âge, date de référence, score socio-économique, aire géographique	Etude complémentaire de l'étude Interphone. Analogique vs digital : pas de différence.

Tableau 18: Téléphone mobile et risque d'autres tumeurs : Lymphomes, Cancers du testicule, Tumeurs (Mélanomes) de l'œil

Auteurs; année de publication Pays Tumeur	Type d'étude	Période de recrutement	Cas	Témoins	Mesure de l'exposition	Risque (IC 95%)	Ajustements	Commentaires
Hardell *et al.*, 2005e Suède Lymphome non-Hodgkinien	Cas-Témoins	1 décembre 1999 - 30 avril 2002	910 (376 F, 534 H) 18-74 ans Experts pathologistes lymphomes Participation : 91%	1016 (424 F, 592 H) appariement individuel (âge, sexe) Registre de population Participation : 92%	Interview : modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	Utilisation : >5 ans Analogique : OR = 1,46 (0,58– 3,70) Digital : OR = 1,92 (0,77 – 4,80) Sans fil : OR= 2,47 (1,09-5,60)	Sexe, âge, année diagnostic	
Hardell et coll., 2006d Suède Cancer Testicule	Cas-Témoins	1993-1997	981 (592 seminome, 389 non-seminome) 20-75 ans Registre cancers Suède Participation : 91%	981 appariement individuel sexe, âge (± 5 ans), résidence Registre population générale Participation : 89%	Interview : modèle de téléphone Fréquence d'utilisation Années d'utilisation	seminome + non-seminome Utilisation : >5 ans analogique : OR = 1,2 (0,8 – 1,8) digital : OR = 2,8 (0,8 – 11) sans fil : OR= 1,0 (0,7-1,60) Utilisation : >10 ans analogique : OR = 1,6 (0,7– 3,8)	Sexe, âge, année de diagnostic	
Schüz *et al.*, 2006c Danemark Tumeurs de l'œil	Cohorte d'abonnés privés.	1982-1995	Total de 14 249 cancers survenus dans la cohorte (15 001 cas attendus) : SIR = 0,95 (0,93 – 0,97) 44 tumeurs oculaires (38 H, 6 F) (46 cas attendus)	420 095 personnes de 18 ans et plus (62 542 F-357 553 H) ayant souscrit un abonnement téléphonique entre 1982 et 1995. Suivis jusqu'au 31 Décembre 2002.	Etude basée sur liaison d'enregistre-ments (registres de population, registre national danois du cancer). N.B. Membres de la cohorte exclus de la population de référence. Données d'utilisation du téléphone fournies par opérateurs.	Tumeurs oculaires : SIR = 0,96 Hommes : SIR = 0,94 (0,66 -1,29) Femmes : SIR = 1,10 (0,40 – 2,39)	Comparaison avec les sujets inclus dans l'étude Interphone danoise (liaison de fichiers).	Suivi de la cohorte publiée en 2001. Durée moyenne de suivi : 8,5 ans (max. 21 ans) Ne prend pas en compte les abonnements professionnels, ni les abonnements postérieurs à 1995 (inclus dans la population de référence), ce qui peut réduire les estimations. Sujets inclus dans la cohorte 4 fois plus souvent utilisateurs fréquents que les témoins Interphone.

Auteurs; année de publication Pays Tumeur	**Type d'étude**	**Période de recrutement**	**Cas**	**Témoins**	**Mesure de l'exposition**	**Risque (IC 95%)**	**Ajustements**	**Commentaires**
Stang *et al.*, 2009 Allemagne (Duisburg, Essen) Mélanomes oculaires	Cas-Témoins	25 septembre 2002 – 24 septembre 2004.	455 (214 F, 241 H) 20 – 74 ans Centre de référence cancers oculaires. Participation : 94%	3 groupes témoins : - population (registre), 827 (372 F, 455 H), appariement sexe, âge (± 5 ans) participation : 57% - patients ophtalmologie 180 participation : 52% - fratrie (± 10 ans) 187 participation : 52%	Protocole Interphone : interview face à face. Utilisation : jamais, sporadique ou régulière. Années d'utilisation Nombre et durée des appels.	Utilisation régulière : - témoins population OR = 0,7 (0,5 – 1,0) - témoins ophtalmologie OR = 1,1 (0,6 – 2,3) - témoins fratrie OR = 1,2 (0,5 – 2,6)	Régression logistique conditionnelle	Recrutement témoins ophtalmologie limitée à première année. Analyse témoins fratrie limitée aux seuls malades ayant un témoin. Pas de tendance à une augmentation de risque avec augmentation de l'utilisation (années, nombre et durée appels).

Tableau 19: Etudes épidémiologiques identifiant spécifiquement des populations exposées à des champs de fréquences supérieures à 2 GHz

1er auteur, année de publication	type d'étude	population	période de suivi sanitaire	matériel exposant	indicateur d'exposition	pathologies considérées	résultats principaux	qualités de l'étude	limites de l'étude
Robinette, 1980 et Groves, 2002	cohorte et cas-témoins niché pour (Robinette, 1980) cohorte pour la mise à jour de (Groves, 2002)	**40 000 hommes vétérans US guerre de Corée**	1950-1974 (Robinette, 1980) 1950-1997 (Groves, 2002)	radar	indice synthétique à partir de : tâche, durée d'emploi aux postes exposés, puissance équipements utilisés sur le cas témoin niché (Robinette, 1980) groupes professionnels (Groves, 2002)	**grandes causes de décès**	**association significative du niveau d'exposition avec mortalité toutes causes, et avec mortalité par cancers respiratoires, association non significative pour cancers lymphatiques et hématopoïétiques** (Robinette, 1980) **RR leucémies =2,6 IC95%[1,53-4,43], chez le groupe le plus exposé** (Groves, 2002)	Puissance. Indicateur d'exposition dans (Robinette, 1980).	Mélange d'aviateurs et de marins pour augmenter la puissance, biais possible; perte de puissance dans le calcul; indice d'exposition uniquement sur un cas-témoins niché. Pour les cancers du système digestif l'association est inversée (Robinette, 1980). Il est fait mention de données incomplètes d'identification pour la cohorte et d'attribution de valeurs pour les données manquantes sur l'année de naissance. Absence d'indice d'exposition dans (Groves, 2002)
Szmigielski, 1996 et 2001	cohorte	**125 000 hommes militaires polonais dont 4 000 exposés**	1971-1985 pour Szmigielski 1996 et 1971-1990 pour Szmigielski 2001	RF de 150 à 3500 MHz, 80% à 0,1 à 2 W/cm² et 15% à 2 à 6 W/m²	poste occupé	**12 localisations de cancers**	**RR tous cancers = 2,07* RR œsophage estomac = 3,24* RR colorectal = 3,19* RR lymphomes et leucémies = 6,31* RR système nerveux central = 1,91*** **Pour** Szmigielski 1996 Résultats analogues pour Szmigielski 2001 : RR tous cancers = 1,83* RR œsophage et estomac = 1,92* RR colorectal = 1,76* RR peau/ mélanome = 2,07* RR SNC/Cerveau = 2.70*	Définition d'une population exposée spécifiquement aux RF pulsées de fréquence 150-3500 MHz avec probablement peu de coexpositions Evaluation de l'exposition dans Szmigielski 2001 mais publication peu claire	Absence de calcul des cancers attendus sur une référence annuelle. Manque d'élément de discussion sur la qualité des données : la population est-elle captive ? Si des "perdus de vue" parmi les non exposés l'ont été pour raison de santé, le dénominateur du risque relatif est sous-estimé. Les exposés bénéficient-ils d'un suivi sanitaire plus fort, qui pourrait entrainer un biais de diagnostic ?

1er auteur, année de publication	type d'étude	population	période de suivi sanitaire	matériel exposant	indicateur d'exposition	pathologies considérées	résultats principaux	qualités de l'étude	limites de l'étude
							RR = lymphome/ leucémie = 5,33*		
Degrave, 2009	cohorte	**7 349 hommes militaires belges**	1968-2004	radars de 1 à 10 Ghz, puissance moyenne émise d 1,5 kw avec pics de 500 kW	unités chargées des systèmes de défence anti-aérien	**grandes causes de décès et 8 localisations de cancers**	**RR cancers = 1,23 IC95%[1,03-1,47] RR cancers diminue avec l'âge au risque RR lymphomes et leucémies = 7,22 IC95%[1,09-47,91]**	Identification d'une population spécifiquement exposée. Indique une possibilité d'excès de leucémies et lymphomes assoicée à l'exposition aux radars. La plausibilité de l'impact des rayonnements ionisants est faible (calcul d'excès de risque associé à l'exposition réalisé)	partielle exhaustivité de la cohorte (25% exclus). Puissance limitée pour les cancers spécifiques
Finkelstein, 1998	cohorte	**22 197 officiers de police ontariens (H+F)**	1964-1995	radars de 10,525 Ghz ; 24,15 GHz et 35 Ghz, ondes continues	profession d'officier de police	**incidence cancers**	**SIR testicules =1,3 SIR mélanomes =1,45***		Durée de suivi limitée. Calculs approchés de SIR (en complément de ceux plus haut) sur les personnes-années incluses depuis 1964 malgré le peu de certitude sur l'exhaustivité. Pas d'éléments sur l'exposition (fréquence, intensité)
Grayson, 1996	cas-témoins niché cancers du cerveau	**hommes aviateurs militaires américains** 230 cas et 920 témoins	1970-1989	matériels RF, extrêmement basse fréquence et rayonnements ionisants	Matrice emploi-expositions. Principalement exposés : réparateurs d'outils RF et micro-ondes	**cancer du cerveau**	**OR cancer cerveau RF = 1,39* pas de relation exposition-effet évidente**	Bon protocole. Ajustements et prise en compte des interactions RF, ELF et RI dans l'analyse. Intérêt exploratoire sur les effets cancérigènes des RF	Evaluation de l'exposition.
Baumgards-	cas-témoins cancers des	**hommes**	1995-1997	Champs électromagnétiques	questionnaire	**Cancer des**	**OR cancer testicules RF**	Bon protocole. Evaluation détaillée de	Faible puissance (7 à 8% d'exposés aux radars) et

1er auteur, année de publication	type d'étude	population	période de suivi sanitaire	matériel exposant	indicateur d'exposition	pathologies considérées	résultats principaux	qualités de l'étude	limites de l'étude
Elms, 2002	testicules	**allemands** 267 cas et 797 témoins		y compris radars		**testicules**	**= 1 IC95%=[0,67-1,21]**	l'exposition	surestimation probable de l'exposition

4.4.3 Hypersensibilité électromagnétique

L'hypersensibilité électromagnétique (aussi appelée ici EHS, par son acronyme anglais) a été l'un des thèmes principaux du débat médiatique qui s'est installé ces derniers temps en France sur les effets sanitaires des ondes radiofréquences et de la téléphonie mobile. Il a été retenu dans les conclusions de la table ronde « Radiofréquences, santé, environnement » et le communiqué de presse interministériel du 18 juin 2009 indique que *« l'élaboration d'un protocole d'accord et de prise en charge des patients hypersensibles aux ondes électromagnétiques sera poursuivie. »*

Le GT Radiofréquences a donc accordé une attention particulière à cette question difficile et encore confuse. Il a procédé pour cela à l'analyse de 62 articles ou documents qui lui ont été consacrés, dont 44 articles retrouvés dans la littérature et publiés depuis 2005 et 18 articles publiés antérieurement mais conservant un certain intérêt.

Le concept d'hypersensibilité électromagnétique est né en Suède au début des années 1980. Dans les services de dermatologie et de médecine du travail, des personnes ont commencé à se plaindre de manifestations cutanées diverses, subjectives (démangeaisons, picotements *etc*.) et/ou objectives (rougeurs, éruptions *etc*.) qu'elles attribuaient à leur travail sur ordinateur. Progressivement, les plaintes se sont étendues à toute une gamme de signes fonctionnels attribués à la proximité d'un nombre croissant d'appareils électriques. Depuis le début des années 1990, la téléphonie mobile (combinés et surtout stations de base) est devenue la source d'exposition la plus fréquemment mise en cause. Aujourd'hui, toute nouvelle technologie, le Wi-Fi par exemple, est immédiatement suspectée. Dans les années 1990, les travaux scientifiques sur la question sont devenus suffisamment nombreux pour justifier l'organisation de plusieurs réunions *ad hoc* (Simunic, 1995 ; Berqvist et Vogel, 1997 ; Leitgeb, 1998 ; WHO, 2004). Ces quatre réunions ont conclu qu'il n'y avait aucune preuve permettant d'établir une relation de causalité entre une exposition aux radiofréquences et l'apparition de symptômes fonctionnels divers.

Sur ces bases, en 2005, le rapport de l'Afsset n'avait consacré à ce problème qu'un court chapitre intitulé « 5.1.3. Effets subjectifs » (page 44), portant sur deux articles. Le premier (Balikci *et al.* 2004) y faisait l'objet de critiques méthodologiques sévères : *« cette étude pose le problème, habituel aux études de type transversal, de la maîtrise des biais de sélection et d'information – par exemple, peu de détails sont donnés quant au type de questionnaire utilisé, or en ce qui concerne les symptômes étudiés, le recueil d'information est délicat -. De plus, les analyses statistiques ne sont pas les plus appropriées et rendent difficile l'interprétation des résultats. Ce type de publication pose la question de la pertinence des études qui ne maîtrisent pas correctement les méthodes d'investigation épidémiologique ».* Le deuxième article (Wilèn *et al.* 2003) avait été considéré comme plus pertinent. Portant sur *« 2197 personnes téléphonant au moins 2 minutes par jour »*, il étudiait les relations entre une longue série de symptômes subjectifs et les DAS calculés, pour chaque appareil, en trois positions sur la tête (au-dessus, au niveau et au dessous de l'oreille). Une relation avait été trouvée entre le DAS et certains symptômes comme la sensation d'inconfort, la diminution de concentration, la sensation de chaleur au niveau de l'oreille ou les maux de tête. *« Toutefois, le fait que de nombreux tests aient été réalisés augmente la probabilité d'observer des résultats statistiquement significatifs ».*

La même année, en 2005, quatre revues générales ont été publiées sur le sujet. L'une, en langue française, faisait le point sur le problème de diagnostic posé par l'EHS et sa prévalence, ainsi que sur les hypothèses concernant ses étiologies possibles et les étapes de son développement ; elle proposait un modèle explicatif et des perspectives thérapeutiques (Crasson, 2005). Les trois autres, en langue anglaise, étaient consacrées, la première aux études de provocation par les radiofréquences émises par les écrans, les téléphones mobiles et l'ensemble des radiofréquences (Rubin *et al.*, 2005), la deuxième aux articles sur la symptomatologie fonctionnelle publiés entre 2000 et 2004 (Seitz *et al.* 2005) et la troisième faisait, comme la revue française, un large tour d'horizon portant sur les symptômes fonctionnels et les différents types d'exposition, l'histoire naturelle, les caractéristiques des sujets EHS, les marqueurs physiopathologiques, la prise en

charge, la prévalence et le recoupement avec d'autres situations (Irvine, 2005). Ces quatre revues concluaient à la nécessité de poursuivre les études sur ce sujet. De plus, toujours en 2005, l'OMS a publié la feuille de synthèse issue du *workshop* qu'elle avait organisé sur ce thème, à Prague, en octobre 2004. Le compte-rendu complet de ce *workshop* a été publié en 2006.

Depuis 2005, au moins 44 articles ont été publiés sur cette question (37 mémoires originaux, 5 revues, 1 lettre à l'éditeur et un article de discussion sur les dissonances entre experts). Ces travaux ont été réalisés en Grande-Bretagne (King's College à Londres, Université d'Essex), en Suède (Institut Karolinska à Stockolm, Université d'Umea), en Allemagne (Hôpital Universitaire de Ratisbonne), en Autriche (Université Technologique de Graz), aux Pays-Bas (Fondation Hollandaise sur l'électrosensibilité) et par un groupe de chercheurs germanophones autour de l'équipe suisse de M. Röösli. Cette importante activité de recherche ne se retrouve pas en France, où il n'y a pas eu de travaux sur ce sujet depuis ceux de l'équipe de Santini à Lyon qui n'ont pratiquement jamais été cités dans la littérature (Santini et al, 2001 : 1 citation ; Santini et al, 2002 : 3 citations ; Santini et al, 2003 : 1 citation) et qui sont des études de population, utilisant des questionnaires insuffisants et ne comportant pas de véritable dosimétrie.

Ces études ont porté sur (1) les aspects cliniques, (2) les corrélats biologiques, fonctionnels, psychiques et sociaux, (3) la prévalence des troubles, (4) les réponses à une « provocation » et (5) les essais de traitement et la prise en charge des patients présentant une hypersensibilité électromagnétique.

Avant d'aborder ces différents aspects du problème, il convient de préciser que ce terme d'hypersensibilité électromagnétique (*electromagnetic hypersensitivity*, EHS) s'est imposé, parmi plusieurs autres, à la suite d'une réunion d'experts de la Commission Européenne (Bergquist & Vogel, 1997), pour désigner un état dans lequel des personnes se plaignent de symptômes subjectifs non-spécifiques dont ils attribuent la cause à une exposition à des champs électromagnétiques (pour plus de détails voir les revues de Crasson, 2005 et d'Irvine, 2005). Il est aujourd'hui consacré par l'usage, malgré la tentative d'un groupe d'experts de l'OMS de le remplacer par celui d' « intolérance environnementale idiopathique attribuée aux OEM » (Hansson Mild *et al.*, 2006), lors d'un *workshop* sur ce thème en 2004. Par ailleurs, il existe un *consensus* pour distinguer l'hypersensibilité électromagnétique de l'électrosensibilité, définie comme l'aptitude à percevoir l'exposition électrique ou électromagnétique et étudiée par l'équipe de l'Université Technologique de Graz (Leitgeb et Schröttner, 2003 ; Schröttner *et al.*, 2007), sans que les relations entre ces deux entités aient été clairement précisées.

4.4.3.1 Les aspects cliniques

Ils sont à l'origine du problème et de nombreux travaux ont essayé de caractériser : (1) les symptômes attribués à l'exposition aux champs électromagnétiques et leurs relations avec le type d'exposition, (2) les étapes du développement de l'EHS et son pronostic, (3) les caractéristiques des sujets EHS, (4) les pathologies associées et (5) l'expérience des médecins généralistes sur le sujet.

4.4.3.1.1 La symptomatologie attribuée à l'exposition aux champs électromagnétiques.

En 2005, trois revues se sont intéressées aux signes cliniques attribués par les patients à une exposition aux champs électromagnétiques. Ces revues présentent des différences notables concernant la sélection des articles qu'elles ont pris en compte : ainsi, les deux revues les plus larges, celle de Crasson (2005) et celle d'Irvine (2005), utilisent respectivement 99 et 75 références, dont 35 seulement sont communes et, sur les 13 articles qui constituent le noyau dur de la revue de Seitz *et al.* (2005), 8 sont utilisés par Crasson et 3 seulement par Irvine (à noter que l'article de Balikci *et al.*, 2004, n'est jamais cité alors que celui de Wilèn *et al.*, 2003, est cité deux fois). Cette différence entre experts dans la sélection des articles est comparable à celle relevée par Schütz et Wiedeman (Schütz, 2005) à l'occasion de l'expertise réalisée, à la demande de

l'opérateur allemand de téléphonie mobile T-Mobile, par quatre institutions allemandes. Pour ces derniers auteurs, cette différence initiale explique en partie les désaccords entre experts sur l'évaluation des risques liés à l'exposition aux ondes radiofréquences de la téléphonie mobile, désaccords qui constituent l'une des causes importantes du débat public conflictuel sur le sujet. C'est la raison pour laquelle le GT s'est efforcé d'être aussi exhaustif que possible dans la sélection des articles publiés sur l'EHS depuis 2005.

S'agissant des symptômes, la revue la plus structurée et probablement la plus pertinente est celle d'Irvine, la plus sélective celle de Seitz *et al.* et la plus légère celle de Crasson. Il apparaît que plusieurs termes ont été utilisés, Crasson en relève 6, dont celui de dermatite des écrans, et Irvine 7, avant que celui d'hypersensibilité électromagnétique soit adopté par la plupart des auteurs. Irvine et Crasson s'accordent sur l'historique des descriptions cliniques : celle d'un syndrome dermatologique, ou dermatite de l'écran, qui a émergé en Suède et en Norvège au début des années 1980, et celle d'un syndrome général, d'apparition plus récente et moins bien défini, observé dans plusieurs pays. Ce syndrome général serait de pronostic moins favorable car pouvant quelquefois mener à une incapacité à travailler et à un isolement social. Crasson en reste là, soulignant seulement que les deux syndromes se chevauchent souvent en fonction de l'attribution du problème et de la nature des symptômes. Irvine s'attache au contraire à répertorier et à classer les symptômes, en distinguant ceux rapportés par les études publiées dans des revues à comité de lecture, ceux rapportés dans une enquête réalisée en 1997 dans des centres de médecine du travail et dans des groupes d'entraide de la Communauté Européenne (Bergquist & Vogel,. 1997) et ceux rapportés par les patients eux-mêmes et/ou leur défenseurs. A partir de 5 articles publiés entre 1995 et 2004, il relève pas moins de 52 symptômes différents chez 754 sujets EHS ayant répondu à des questionnaires. Dans l'enquête européenne, dont le taux de réponse était de 45 % pour 138 centres de médecine du travail et de 67 % pour les 15 centres d'entraides, les symptômes les plus fréquents étaient la fatigue, les maux de tête et les symptômes cutanés, avec des prévalences différentes entre les pays, notamment en ce qui concerne les symptômes cutanés plus fréquents en Finlande, Islande, Norvège et Suède. En ce qui concerne les descriptions faites par les sujets EHS eux-mêmes, l'exemple retenu par Irvine montre que ces symptômes englobaient toute la pathologie. Aucune spécificité de ces symptômes ou de leur regroupement n'a été relevée par Irvine, tout au plus une prévalence plus grande des symptômes cutanés chez les sujets EHS par rapport à la population générale, d'après 3 études distinctes du Département de santé environnementale de l'Institut Karolinska à Stockholm.

La revue de Seitz *et al.* était plus sélective (sur les 22 documents retrouvés dans les bases de données bibliographiques, 13 seulement ont été jugés de qualité scientifique suffisante pour être pris en compte). Cette revue a souligné les limitations méthodologiques de la plupart de ces études (7 étaient des études observationnelles et 6 expérimentales). Les auteurs ont ensuite analysé les 6 symptômes qu'ils ont considérés comme étant les plus fréquemment rapportés, à savoir, par ordre de fréquence décroissant, les troubles du sommeil et la fatigue, les troubles de l'équilibre, les céphalées, les problèmes cutanés, les difficultés de concentration et les pertes de mémoire et la nervosité. Ils ont fait le constat qu'aucun de ces symptômes n'avait fait l'objet de résultats concordants pour ce qui est de sa fréquence et de son intensité.

Ces trois revues ont en commun de souligner (1) l'absence de critères de diagnostic autres que l'attribution causale par la personne elle-même des symptômes éprouvés à une exposition à des champs électromagnétiques, (2) le fait que cette attribution n'implique pas que la réalité de cette relation causale soit établie, et (3) la nécessité d'un effort de recherche interdisciplinaire (Seitz *et al.*) ou multidisciplinaire (Crasson), associant des approches psychologiques, physiopathologiques, biologiques et épidémiologiques, ainsi qu'une amélioration de la dosimétrie individuelle.

L'aide-mémoire de l'OMS exprimait un point de vue très proche : *« La HSEM est caractérisée par divers symptômes que les individus touchés attribuent à l'exposition aux CEM. Parmi les symptômes les plus fréquemment présentés, on peut mentionner des symptômes dermatologiques (rougeurs, picotements et sensations de brûlure), des symptômes neurasthéniques et végétatifs (fatigue, lassitude, difficultés de concentration, étourdissements, nausées, palpitations cardiaques et troubles digestifs). Cet ensemble de symptômes ne fait partie d'aucun syndrome reconnu.*

La HSEM présente des analogies avec les sensibilités chimiques multiples (SCM), un autre trouble associé à des expositions environnementales de bas niveau à des produits chimiques. La HSEM, comme les SCM, se caractérisent par une série de symptômes non spécifiques, pour lesquels on manque d'éléments tangibles sur le plan toxicologique ou physiologique, ou de vérifications indépendantes. Il existe un terme plus général pour désigner la sensibilité aux facteurs environnementaux : l'intolérance environnementale idiopathique (IEI), définie lors d'un atelier convoqué par le Programme international sur la sécurité des substances chimiques (IPCS) de l'OMS à Berlin en 1996. L'IEI est un descripteur n'impliquant aucune étiologie chimique ou aucune sensibilité de type immunologique ou électromagnétique. Ce terme regroupe un certain nombre de troubles ayant en commun des symptômes non spécifiques similaires, qui restent non expliqués sur le plan médical et dont les effets sont préjudiciables pour la santé des personnes. Cependant, le terme HSEM étant d'usage courant, il continuera d'être utilisé dans la suite de ce document. »

A l'exception du travail d'Eltiti *et al.*, 2007, les études ultérieures (Schreier *et al.*, 2006 ; Schröttner & Leitgeb, 2008 ; Schooneveld & Kuiper, 2008) n'ont guère apporté plus d'éclaircissement. Une place à part peut cependant être faite à l'étude de Küçer (2008) qui porte exclusivement sur les symptômes oculaires.

Le travail de Schreier *et al.* (2006) avait pour but principal d'étudier la prévalence de l'EHS en Suisse et d'explorer la perception du risque sanitaire en rapport avec les champs électromagnétiques, mais il s'est également intéressé à la fréquence des symptômes et des sources d'exposition déclarées par les sujets EHS comme étant la cause de leur symptomatologie fonctionnelle. Une enquête téléphonique assistée par ordinateur a été réalisée sur un échantillon représentatif de la population suisse âgée de plus de 14 ans. Sur 2 048 personnes interrogées, 107 (5 %) se sont déclarées EHS et, parmi ces dernières, 42,7 % se plaignaient de troubles du sommeil, 33,8 % de céphalées, 10,4 % de troubles de concentration, 8,6 % de nervosité, 5,6 % de douleurs ostéo-musculaires, 5 % de troubles respiratoires et 4,8 % de troubles de l'équilibre. A noter qu'aucune plainte cutanée n'a été exprimée.

L'enquête de Schröttner & Leitgeb (2008) a été réalisée dans un groupe de 526 personnes, représentatif de la population autrichienne. Son but principal était d'évaluer la prévalence de l'EHS dans cette population et de la comparer à la prévalence observée par le même groupe une dizaine d'années plus tôt. Dans l'ensemble du groupe, les plaintes les plus fréquentes ont été la sensibilité aux changements de temps (14 %), les migraines (14 %), les troubles du sommeil (8,2 %) et les maux de tête (8 %). Dans ce groupe, les auteurs ont considéré comme étant des sujets EHS, ceux qui ont déclaré avoir été handicapés par les troubles qu'ils attribuaient aux champs électromagnétiques à un degré tel qu'ils s'étaient adressés à un médecin pour les traiter, soit 3,5 % de la population. Chez ces sujets, les symptômes les plus fréquemment décrits étaient les troubles du sommeil, les migraines, la nervosité et les acouphènes, sans autres précisons.

L'étude de Schooneveld et Kuiper (2008) présente la particularité d'avoir été réalisée par un organisme regroupant et soutenant des personnes se déclarant électrosensibles, la Fondation néerlandaise sur l'hypersensibilité électrique. Il s'agit d'une étude purement descriptive qui reconnaît ses limites : échantillon non représentatif de la population, pas de groupe témoin, pas de traitement statistique. Elle n'en fournit pas moins des données détaillées sur les symptômes cliniques, sur les sources d'exposition et sur les pathologies associées, qui peuvent être comparées aux données des autres études.

Le Tableau 20, qui rassemble les symptômes relatés par les personnes EHS elles-mêmes, illustre bien l'hétérogénéité, pour ne pas dire l'incohérence, de ces données.

Par exemple, les signes cutanés de la face, qui sont les symptômes les plus fréquemment observés par l'étude suédoise dans une population de 50 sujets EHS (en comparaison avec une population de 200 sujets présentant une dermatite de l'écran), ne sont plus que 4ème en fréquence dans l'étude des Pays-Bas et ne sont pas mentionnés dans les études suisse et autrichienne. La fatigue, qui est le symptôme le plus fréquemment observé par l'étude des Pays-Bas et le 2ème en fréquence dans l'étude suédoise, n'est que 4ème en fréquence dans la première étude suisse et

n'est mentionnée ni dans la seconde étude suisse, ni dans l'étude autrichienne. Les deux seuls symptômes mentionnés dans 4 études sur 5 comme étant fréquemment observés sont les troubles du sommeil, les maux de tête et la nervosité.

Sur ces bases, il n'est pas possible de faire un tableau clinique acceptable de l'EHS.

Tableau 20 : Fréquence (en %) des symptômes attribués à une exposition à des champs électromagnétiaques

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Pays de l'étude	Suède	Suisse	Suisse	Autriche	Pays-Bas
Nombre de sujets EHS	50	394	107	16	250
Signes cutanés face	62				66
Fatigue	32	18			70
Palpitation	26				16
Maux de tête	22	41	33,8		48
Difficultés concentrat	12	16	10,4		68
Troubles du sommeil		58	42,7	+	62
Nervosité		19	8,6	+	20
Douleurs ostéo-musc			5,6		
Tbles respiratoires			5,0		42
Tbles de l'équilibre			4,8		43
Migraine				+	
Acouphènes				+	
Tbles de l'audition					67
Tbles de la vision					63
Signes cutanés génér.					49
Engourdissement tête					49
Tbles de la mémoire					40
Irritation					38
Agitation					24
Spasmes intestinaux					16
Jambes sans repos					13
Autres			35,9		

d'après les articles de : (1) Stenberg *et al.*, 2002 ; (2) Röösli *et al.*, 2004 ; (3) Schreier *et al.*, 2006 ; (4) Schröttner & Leitgeb, 2008 ; (5) Schooneveld & Kuiper, 2008.

Schooneveld & Kuiper (2008) en sont arrivé aussi à cette conclusion et en ont déduit que chaque cas d'EHS était unique. Or, tout clinicien expérimenté sait que cette opinion s'applique à n'importe quelle maladie. Il est hautement probable que, si l'on soumettait les patients atteints d'une quelconque maladie bien identifiée à un questionnaire comportant 38 questions sur leurs troubles fonctionnels, avec 284 réponses possibles, et que l'on se contente de dénombrer les réponses, on obtiendrait un résultat comparable à celui des auteurs hollandais, sans pour autant progresser dans la compréhension du phénomène étudié.

Bien différente, est l'approche de Eltiti *et al.* (2007a) sur la symptomatologie clinique de l'EHS. Au moment du présent rapport, cette étude peut être considérée comme le seul travail de référence sur la question. Ces auteurs ont appliqué des procédés d'analyse en composante principale aux données obtenues à l'aide de deux questionnaires de 35 questions d'abord, puis de 57 questions. Dans les deux cas, ils ont obtenu 8 « sous-échelles », qu'ils n'ont pu valider qu'avec les données du deuxième questionnaire. Ces 8 « sous-échelles » regroupent respectivement les symptômes neurovégétatifs, cutanés, auditifs, cardio-respiratoires, liés au froid, locomoteurs et liés à l'allergie. De plus, ils ont montré que cette structure était identique chez les sujets EHS et chez les témoins, confirmant la non-spécificité des symptômes fonctionnels attribués par certaines personnes à une exposition aux champs électromagnétiques. Mais, l'intensité des symptômes étant plus élevée

chez les sujets EHS que chez les témoins, l'utilisation de *Z-scores* a permis de définir une note globale permettant de sélectionner les sujets pour des études complémentaires sur l'EHS. Malgré son intérêt évident, ce travail doit être considéré comme préliminaire. De l'aveu même des auteurs, il devrait être répliqué sur une population d'au moins 500 sujets EHS, ce qui implique une étude multicentrique. Deux études complémentaires semblent en outre nécessaires : la première pour comparer les sujets EHS non plus à des témoins normaux, mais à des sujets se plaignant de troubles comparables comme les sujets chez lesquels les diagnostics de syndrome de fatigue chronique, de fibromyalgie, voire de spasmophilie ont été porté (*cf.* 4.4.3.1.4) ; et la seconde pour rechercher, à l'aide des *Z-scores*, d'éventuels profils symptomatiques correspondants spécifiquement à certaines sources d'exposition.

Cette approche quantitative des symptômes et leur regroupement en composantes ont été appliqués récemment de manière fructueuse par Rubin *et al.* (2008) et Brand *et al.* (2009) dans des études portant sur les corrélats psychiques (voir ci-dessous). Mais, leurs modalités de quantification étaient différentes et le regroupement en composantes effectué *a priori* et non après analyse non probabiliste. Une standardisation des méthodes serait souhaitable avant que l'on entreprenne de nouvelles études.

Il faut aussi prendre en compte les études plus focalisées ne concernant qu'une catégorie de symptômes. Ainsi, Küçer (2008) a réalisé une étude spécifique des symptômes oculaires dans une population de 229 étudiants de l'Ecole du service de santé de Kocaeli (Turquie). Il a utilisé un questionnaire en deux parties, la première faite de questions sur la santé générale des participants et sur leur utilisation des téléphones mobiles, et la seconde faite de six questions sur la symptomatologie oculaire : (1) vision floue, (2), rougeur des yeux, (3) troubles de la vision, (4) sécrétion oculaire, (5) inflammation des yeux et (6) larmoiement des yeux. La population comprenait 181 (79 %) femmes et 48 (21 %) hommes. Globalement, les femmes ont présenté presque deux fois plus de symptômes que les hommes, mais la différence entre les deux sexes n'a été significative que pour l'inflammation des yeux (30,4 % pour les femmes *vs* 10,4 % pour les hommes, $p < 0,05$). La population a ensuite été divisée en deux groupes, les possesseurs de téléphone mobile depuis plus de deux ans ($n = 184$, 80,3 %) et les possesseurs depuis deux ans ou moins ($n = 45$, 19,7 %). Les premiers se sont plaints de vision floue de façon significativement plus fréquente que les seconds (27,2 % *vs* 8,8 %, $p < 0,05$). Bien que ce dernier résultat soit en accord avec deux études antérieures (Balik *et al.*, 2005 ; Meo *et al.*-Dress, 2005), ces résultats doivent être considérés avec prudence, compte-tenu du possible recoupement des questions posées (aucune définition précise n'est donnée) et, surtout, de l'absence de prise en considération de facteurs susceptibles d'interférer avec les symptômes oculaires.

Les sources d'exposition

La même hétérogénéité se retrouve lorsqu'on considère les données sur les sources d'exposition.

Irvine (2005) note qu'elles ont surtout été décrites dans la littérature grise : le livre grand public de Philips et Philips, 2003, en mentionne une cinquantaine. L'enquête européenne de 1997 (Berqvist & Vogel, 1997) a mis en évidence des différences prononcées entre pays dans l'attribution des symptômes à une source spécifique. Deux enquêtes par questionnaire réalisées en Suède, en 2002, et en Suisse, en 2004, illustrent bien ce phénomène. Les principales sources d'exposition étaient, dans la première, les VDU (62 %), les écrans de télévision (54 %), les lumières fluorescentes (70 %) et les ampoules électriques (24 %) et, dans la seconde, les stations de base (74 %), les téléphones mobiles (36 %), les téléphones sans fil (29 %) et les lignes électriques (27 %).

Pour Schreier *et al.* (2006), les source d'exposition le plus souvent invoquées étaient les lignes électriques (28,4 %), les téléphones mobiles (24,8 %), les écrans de télévision et d'ordinateurs (20,8 %) et les relais de télévisions (15 %), les stations de base de téléphonie mobile n'étant paradoxalement mises en cause que par 12,9 % des personnes et 20,0 % n'avaient pas de

sources d'exposition spécifiques. Les relations entre les symptômes et les sources d'exposition n'ont pas été étudiées.

Les études de Schröttner & Leitgeb (2008) et de Schooneveld & Kuiper (2008) ont donné de longues listes de sources, mais aucune indication sur leurs relations avec les symptômes.

Le Tableau 21 rassemble toutes ces données. Comme pour les symptômes fonctionnels (cf. Tableau 20), on note une grande incohérence entre les résultats des différentes études et donc une impossibilité à établir la moindre relation de causalité entre les symptômes et les causes qui leurs sont attribuées.

Tableau 21 : Sources de champs électromagnétiques (en %) considérées comme cause de symptômes fonctionnels

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	Suède	Suisse	Suisse	Autriche	Pays-Bas
Ecrans d'ordinateur	62		20,8	50	
Ecrans TV	54			35	55
Lampes fluorescentes	70			6	32
Lampes électriques	24				
Stations de base		74	12,9	77	
Téléphones mobiles		36	24,8	46	
Téléphones DECT		29		11	27
Lignes électriques		27	28,4	79	
Relais TV-radio			15,0	11	
Ordinateurs				41	40
Fours micro-ondes				34	
Installation électrique				21	
Radio réveil				14	
Appareillage ménager				9	
Baby phone				5	
Lampes halogènes				3	33
GSM/UMTS tech					42
Blue tooth					16
WIFI					15
Ventilateur plafond					9
Ecrans LCD					14
Répondeurs téléphon					12
Plusieurs sources			20,0		49

d'après les articles de : (1) Stenberg *et al.*, 2002 ; (2) Röösli *et al.*, 2004 ; (3) Schreier *et al.*, 2006 ; (4) Schröttner & Leitgeb, 2008 ; (5) Schooneveld & Kuiper, 2008.

4.4.3.1.2 Les étapes du développement de l'EHS et son pronostic

Irvine (2005) a consacré un chapitre de sa revue à l'histoire naturelle de l'EHS. Il y a rappelé la position de l'association suédoise des sujets EHS (http://www.geocities.com/emrsafety/Escases) qui considère que le tableau clinique se constitue en deux étapes, la première marquée par des symptômes cutanés attribués à une exposition aux écrans d'ordinateur, et la seconde par une évolution vers un syndrome plus généralisé pouvant impliquer de multiples sources d'exposition. Il a rappelé aussi les conclusions de l'étude européenne de 1997 (Berqvist & Vogel, 1997) décrivant une évolution en trois étapes, la première caractérisée par des symptômes temporaires chez des sujets ayant entendu parler de l'EHS et pouvant envisager la possibilité d'une association de leurs symptômes avec une exposition, la seconde caractérisée par la persistance et/ou l'aggravation des symptômes faisant évoluer l'hypothèse de l'association vers la certitude, avec recherche de confirmation et, parfois, comportement d'évitement, et la troisième, atteinte seulement par un petit nombre d'individu, caractérisée par des symptômes neurovégétatifs

déclenchés par la plupart des sources d'exposition et entraînant des conduites d'évitement extrêmes.

Crasson (2005) ne s'est pas intéressée directement à ces schémas évolutifs, mais a repris l'étude de Stenberg *et al.* dont les résultats sont compatibles avec la position de l'association suédoise des sujets EHS. En comparant deux populations, l'une présentant des symptômes cutanés attribués aux écrans d'ordinateur ou de télévision, ou aux lumières fluorescentes (n = 200) et l'autre se plaignant de symptômes généraux (y compris cutanés) et cognitifs attribués à diverses sources d'électricité, ils ont constaté que les premiers avaient une histoire de leur symptomatologie significativement plus ancienne ($p < 0,001$) que les seconds, mais une meilleure insertion professionnelle (17 % *vs* 38 % étant sans emploi rémunéré) et un pronostic médical plus favorable (13,4 % *vs* 4,3 % déclarant ne plus avoir de symptômes). Cette position était également celle de Levallois (2002).

Cette distinction des sujets EHS en deux groupes vient d'être remaniée, sans être invalidée, par l'étude de Rubin *et al.* (2008). La dermatite des écrans semble avoir disparu – ou tout au moins ne pas être observée en dehors de la Suède – et être remplacée par une sensibilité à la seule téléphonie mobile, peu gênante dans la vie courante. Le syndrome général persiste, avec une hypersensibilité s'étendant à d'autres appareils que ceux de la téléphonie mobile et une altération notable du vécu corporel et des fonctions psychiques.

4.4.3.1.3 Les caractéristiques socio-démographiques des sujets EHS

Pour Crasson (2005), les sujets EHS *« ne forment pas un groupe homogène en terme de niveau scolaire, de statut socio-économique ou encore en fonction des symptômes rapportés. »*

Schreier *et al.* (2006), dans une étude portant un échantillon représentatif de la population suisse de 2 048 personnes, ont identifié 107 sujets EHS, 1 083 sujets préoccupés par les champs électromagnétiques mais n'attribuant pas de symptômes personnels à une telle exposition, et 858 personnes non concernés par les champs électromagnétiques. En comparaison avec ce dernier groupe, ils ont observé dans le groupe EHS une plus grande proportion de femmes (54,5 % *vs* 47,2 %) et de personnes âgées de 35 à 64 ans (59,4 % *vs* 44,1 %), ainsi qu'une plus faible proportion de sujets ayant un niveau éducatif bas (12,2 % *vs* 18,2 %). Mais, ils n'ont pas donné le degré de significativité de ces différences.

Pour Schröttner & Leitgeb (2008), la proportion de sujets EHS est à peu près identique chez les hommes (3,6 % pour les auteurs, 3,1 % en réalité) et chez les femmes (3,3 % pour les auteurs, 3,0 % en réalité). Ces auteurs ont en outre observé une proportion plus grande de sujets EHS chez les sujets à haut niveau éducatif que chez les sujets à moindre niveau (5,6 % *vs* 2,3 % ; $p = 0,006$) et chez les sujets âgés de 15 à 45 ans que chez les sujets de plus de 45 ans (3,5 % *vs* 2,5 % ; $p = 0,004$).

Dans l'étude de Schooneveld & Kuiper, qui porte sur une population de 250 sujets EHS, sans groupe témoin, les femmes représentent 68 % de l'effectif, les personnes âgées de 40 à 59 % plus de 50 %, celles de 60 ans et plus légèrement plus de 30 % et les moins de 40 ans un peu moins de 20 %.

De ces résultats disparates, on peut tirer la supposition d'une plus grande prévalence de l'EHS chez les femmes, les personnes d'âge moyen et les sujets ayant un niveau éducatif élevé.

4.4.3.1.4 Les pathologies associées

Selon les quelques articles contenant des informations sur cette question, les sujets EHS présenteraient un taux de pathologie associée plus élevé que la population générale.
Ces associations ont d'abord été décrites dans des ouvrages relatant l'expérience de groupes de patients, comme dans l'ouvrage de Philips A et Philips J. (2003), cité par Irvine 2005, ou Nordstöm G (2004), cité par Schooneveld et Kuiper.
Eltiti *et al.* (2007a) ont confirmé ce fait. Dans la première partie de leur étude, qui comparait 50 sujets EHS à 261 témoins, la proportion de maladies chroniques étaient significativement plus élevée (*chi2* = 8,39, p < 0,01) chez les sujets EHS (32,0 %) que chez les témoins (14,6 %). Dans la troisième partie (88 sujets EHS), les maladies les plus fréquemment rencontrées ont été le syndrome de fatigue chronique (9,1 %), le diabète (8,0 %), les maladies ostéo-articulaires (6,8 %) et l'hypo ou l'hyperthyroïdie (4,5 %). Cette dernière constatation est en accord avec les données biologiques de Dahmen *et al.* (2009)
Schooneveld et Kuiper (2008), sur 93 sujets EHS, rapportent aussi une fréquence élevée de pathologies chroniques associées : un *burnout* (16 cas), une sensibilité chimique multiple (16 cas), une fibromyalgie (13 cas), un syndrome de fatigue chronique (13 cas), des lésions de contrainte répétitive (8 cas), une maladie de Pfeiffer (6 cas), des maladies métaboliques (5 cas), un syndrome du bâtiment malsain (4), un syndrome de stress post-traumatique (3), une maladie de Sudeck (3 cas), une maladie de Lyme (2 cas), une légère dermatose polymorphe chronique (2).

Ces constatations posent question : ces pathologies associées sont-elles, d'une manière générale, des facteurs de risque de l'EHS ? Ou bien, lorsque leur symptomatologie se rapproche de celle de l'EHS et qu'elles n'ont pas, comme cette dernière, d'explication physiopathologique, peut-on les regrouper en un ensemble pathologique constituant un objet de recherche unique ? Cette dernière hypothèse a été argumentée par Bergdahl *et al.* (2005) et par Brand *et al.* (2009), dans deux articles qui sont résumés dans le chapitre sur les corrélats psychiques et sociaux, ci-dessous. Elle mérite d'être creusée sur la base d'une clinique rigoureuse, du type de celle développée par Eltiti *et al.*, malgré les difficultés méthodologiques que sa vérification semble *a priori* devoir poser.

La question de la dermatite atopique (DA) est différente. Evoquée devant la grande fréquence des signes cutanés chez les patients se déclarant hypersensibles aux ondes radiofréquences, elle fait l'objet de résultats contradictoires. Elle a été abordée très succinctement dans la discussion d'un travail relativement ancien (Stenberg *et al.*, 2002) qui mentionne que cette affection est plus fréquemment rencontrée dans le groupe de patients se plaignant de troubles cutanés attribués aux terminaux et écrans de visualisation que chez des sujets électrosensibles. Par la suite, Kimata (2002) a montré que, chez certains sujets DA, une exposition à des ondes radiofréquences de téléphonie mobile provoquait une accentuation des réactions urticariennes associée à une élévation de la substance P et du peptine vasoactif intestinal (VIP). Mais un travail de Johansson A *et al.* (2008) n'a pas confirmé ces résultats en montrant que, s'il existe bien des différences significatives dans les taux de TNF R1 et BGNF entre patients DA et témoins, avant exposition aux ondes radiofréquences de la téléphonie (*cf*. chapitre 4.4.1.6), ces différences persistent pendant toute l'expérience, sans modification induite par les conditions d'exposition. Par ailleurs, les auteurs n'ont pu évaluer la corrélation des symptomes aux conditions d'exposition, en raison du petit nombre de symptomes rapportés.

4.4.3.1.5 L'expérience des médecins généralistes

En contact direct avec les malades, les médecins généralistes ont une situation privilégiée pour observer l'émergence d'une pathologie et en apprécier certaines caractéristiques. Deux enquêtes ont été réalisées sur ce thème, la première en Autriche (Leitgeb *et al.* 2005) et la seconde en Suisse (Hüss et Röösli, 2006). Ces deux enquêtes ont utilisé des questionnaires qui ont été adressés par la poste dans le premier cas ou utilisés par téléphone, dans le second.

L'enquête autrichienne a adressé un questionnaire à un échantillon représentatif de 400 médecins généralistes (sur une population de 5 643) avec un taux de réponse de 49 %. Plus des

deux tiers (68 %) ont déclaré avoir été consultés, occasionnellement ou fréquemment, par des patients se déclarant hypersensibles aux champs électromagnétiques ; et presque les deux tiers (61 %) ont diagnostiqué une association entre pollution électromagnétique et symptômes pathologiques. Une majorité écrasante (96 %) a dit croire, en partie ou totalement, que les champs électromagnétique ont un rôle sur la santé et seulement 39 % n'ont jamais associé des symptômes avec la pollution électromagnétique. Cependant, pour 56 % d'entre eux, l'information disponible est insuffisante. Plus des deux tiers (69 %) ignorent les limites existantes d'exposition électromagnétique et le bas niveau des champs mesurés dans l'environnement. Les autorités jouent un rôle marginal dans l'information des praticiens ; 4 % seulement mentionnent avoir reçu une information sur la « pollution » électromagnétique par cette source. Les auteurs concluent en soulignant la large contradiction entre les opinions des praticiens et l'évaluation nationale et internationale du risque sanitaire et, en conséquence, la nécessité urgente d'une information de la part des associations de praticiens et des autorités responsables. Il s'agit d'une étude purement descriptive, ne donnant aucune information sur les symptômes observés, ne discutant pas la représentativité de l'échantillon répondeur.

L'enquête suisse a contacté un échantillon représentatif de 1 328 généralistes de langue française ou allemande (sur environ 7 200) et a pu obtenir 342 entretiens téléphoniques assistés par ordinateur (taux de réponses : 25,8 %). Deux cent trente sept généralistes (69,3 %) ont déclaré avoir été consultés pour des troubles rapportés par leurs patients aux champs électromagnétiques, avec un nombre de consultation pendant la dernière année égal ou supérieur à 10 pour 18,7 % d'entre eux. Les médecins exerçant une médecine douce (n = 58, 17 %) ont déclaré un taux de consultation statistiquement plus élevé (96,6 % *vs* 63,7 %, $p < 0,0001$) que les médecins n'ayant pas ce type d'activité. Pas de différence en fonction du sexe et de l'âge du médecin ou en fonction de l'origine rurale ou urbaine des patients. Les symptômes les plus fréquemment invoqués étaient les troubles du sommeil (43 %) et les maux de tête (39 %), suivis par la fatigue (14 %), la nervosité (12 %), les vertiges (10 %), les difficultés de concentration, les acouphènes, l'anxiété, les tumeurs et les troubles du rythme cardiaque, ce qui recoupe bien les conclusions tirées du Tableau 22, tout au moins pour les symptômes les plus fréquents. Les sources d'exposition les plus fréquemment suspectées ont été les antennes-relais de téléphonie mobile (33 %), les lignes électriques (14 %) et les téléphones mobiles (9 %) suivies par les appareils de télévision, les ordinateurs, les relais de télévision ou de radiodiffusion, les téléphones sans fil et les fours à micro-ondes. Aucune association claire n'a été mise en évidence entre ces symptômes et ces sources. Trois principales attitudes thérapeutiques ont été adoptées : le conseil de se débarrasser des sources d'exposition, des traitements à visée psychosomatique et l'absence d'avis. Une amélioration aurait été observée dans 43 % des cas. Indépendamment de leur expérience personnelle, 61 % des praticiens interrogés ont déclaré croire que l'exposition aux radiofréquences, dans les conditions de la vie quotidienne, peut provoquer des symptômes, avec des différences qui sont légères entre sexes (57,8 % des hommes *vs* 76,1 % des femmes) et significatives ($p < 0,0001$) entre médecins pratiquant une médecine parallèle (94,8 %) et médecins n'en pratiquant pas (54,6 %). Cette étude, sérieuse et documentée, a pour principal point faible, discuté et admis par les auteurs, le faible taux de réponse (les médecins intéressés ou préoccupés par les effets des radiofréquences ayant pu avoir répondu plus fréquemment que les médecins non concernés). Une autre critique concerne le non questionnement systématique des médecins sur la dimension psychosomatique des symptômes rapportés (cette dimension apparaît en filigrane et de façon imprécise dans les attitudes thérapeutiques).

Ces données doivent être rapprochées de celles de l'étude néerlandaise de Schooneveld & Kuiper (2008) qui donne le point de vue des sujets EHS sur leurs relations avec les professionnels de santé. Dans cette étude, plus de 98 % d'entre eux avaient consulté leur médecin de famille, et de nombreux autres avaient en outre consulté un ou plusieurs spécialistes, neurologues, allergologues ou médecin du travail le plus souvent. D'après eux, un « diagnostic correct » a rarement été fait et les traitements proposés n'ont jamais été autres que d'avoir un bon sommeil, de prendre un tranquillisant ou de recourir à une médecine alternative. Ces traitements ont rarement été efficaces et ont même parfois détérioré leur santé.

Le Tableau 22 rassemble les données relatives aux opinions des médecins généralistes en ce qui concerne les relations entre l'exposition aux champs électromagnétiques et les symptômes décrits par les patients. Dans les trois pays dans lesquels ces données sont disponibles, on constate qu'une forte proportion de médecins croit en la réalité de cette relation. Sans doute, le faible taux de réponse des médecins suggère que beaucoup de ceux qui n'attachent pas une grande importance à ce problème n'ont pas répondu aux questionnaires. Il serait intéressant de savoir pourquoi une partie non négligeable du corps médical semble ignorer les données actuelles de la science ou, tout au moins, ne pas en tenir compte.

Tableau 22 : Proportion de médecins généralistes croyant que l'exposition aux champs électromagnétiques a un effet défavorable sur la santé

	Leitgeb *et al.*, 2005	Hüss et Röösli, 2006					France, 2009
			Hommes	Femmes	Sans MP	Avec MP	
Nombre de médecins	196	342	275	67	284	52	372
Croient en un effet (%)	96	61	57,8	76,1	54,6	94,8	57
Ne croient pas en un effet		27					36
Sans opinion		12					7

MP = médecine parallèle. France = enquête réalisée sur le site informatique du JIM (Journal International de Médecine)

4.4.3.2 Les corrélats biologiques, fonctionnels, psychologiques et sociaux

Devant la subjectivité et le manque de spécificité des données cliniques, des corrélats objectifs ont été recherchés, soit simplement pour servir de marqueurs pouvant constituer des critères de diagnostic de l'EHS, soit plus ambitieusement pour formuler des hypothèses sur les mécanismes physiopathologiques sous-tendant les troubles fonctionnels. Ces corrélats ont été recherchés parmi les paramètres biologiques, fonctionnels, psychologiques et sociaux.

4.4.3.2.1 Corrélats biologiques

Ils ont été, à l'évidence, les plus simples à rechercher. Quelques différences entre sujets EHS et sujets sains ont été rapportées, mais aucune n'a jusqu'à présent été confirmée par au moins deux équipes indépendantes. Toutefois, pour des raisons diverses, trois pistes restent encore à explorer.

La plus ancienne est celle d'une augmentation des mastocytes cutanés proposée par Gangi et O. Johansson (2000) sur la base d'observations faites chez des sujets se déclarant sensibles aux écrans cathodiques de visualisation (Johansson *et al.* 1994 ; Hilliges *et al.* 1995 ; Johansson & Liu 1995 ; Johansson *et al.* 1996 ; Johansson *et al.* 1999). Cette « théorie » a été réfutée par Lonne-Rahm *et al.* (2000) qui n'ont observé aucune modification des mastocytes et des médiateurs de l'inflammation après exposition au stress et exposition aux champs radiofréquences émis par un écran de visualisation, chez 12 sujets EHS et chez 12 témoins. Johansson a néanmoins rapporté de nouvelles données obtenues lors d'études de provocation « *open-field* » chez des sujets normaux (Johansson *et al.* 2001). Depuis lors, cet auteur soutient

ardemment sa position (Johansson, 2006) y compris dans des interventions faites à la demande d'associations, sans toutefois fournir de nouveaux arguments. D'autres auteurs, comme H. Lai (BioInitiative 2007) concluent le contraire. Cette situation doit être tranchée définitivement par une étude tenant compte, en vue de leur réplication, à la fois des travaux de Johansson et de ceux de Lonne-Rahm *et al.*

La deuxième piste ne concerne apparemment que les signaux UMTS. Elle a été ouverte par une équipe du département de Génétique, Microbiologie et Toxicologie de l'Université de Stockholm qui, dans une série de 3 articles, a étudié les effets de divers types d'exposition aux ondes électromagnétiques sur l'ADN de lymphocytes humains chez des sujets EHS et chez des témoins appariés en âge et sexe. Dans la première étude (Belyaev *et al.*, 2005), ces sujets ont été exposés à des radiofréquences de type téléphonie mobile (915 MHz, DAS : 37 mW/kg) et à un champ magnétique basse fréquence (50 Hz, 15 µT de valeur crête) ; dans la deuxième (Markova *et al.*, 2005), l'exposition à un champ basse fréquence a été remplacée par une exposition à un signal de téléphonie mobile (905 MHz, DAS : 37 mW/kg) et dans la troisième étude (Belyaev *et al.*, 2009), à l'exposition aux deux signaux GSM précédents a été ajoutée une exposition à un signal UMTS. Les changements dans la conformation de la chromatine ont été mesurés avec la méthode AVTD et la réparation des ruptures des doubles brins d'ADN (DSBs) a été analysée par visualisation immunohistochimique des foyers de la protéine 53BP1 dans les trois études, et par celle des foyers de l'histone phosphorylée H2AX dans les deux dernières. Une condensation significative de la chromatine, comparable à celle induite par un choc thermique à 41°C, a été observée dans tous les cas, alors que des différences dans la formation des foyers de 53BP1 et de γ-H2AX ont été observées en fonction du type d'exposition. Dans la dernière étude, il a été noté que les effets des ondes sur les foyers de 53BP1 et de γ-H2AX ont duré 72 heures après l'exposition. Dans les trois études, les réponses des lymphocytes des sujets EHS n'ont pas été statistiquement différentes de celles des lymphocytes des sujets sains, excepté pour les effets des ondes UMTS et GSM à 915 MHz sur la formation des foyers de réparation de l'ADN qui ont été différents chez les sujets EHS ($p < 0,02$ pour 53BP1 et $p < 0,01$ pour γ-H2AX) et non chez les témoins.

Dernière piste à avoir été ouverte, les travaux de Dahmen *et al.* (2009) ont porté sur 132 sujets EHS et sur 101 témoins chez lesquels ont été effectué des analyses biologiques habituellement pratiquées pour identifier ou détecter des désordres somatiques banaux. Ils ont ainsi mesuré la thyréostimuline (TSH), les transaminases (ALT et AST), la créatinine, l'hémoglobine, l'hématocrite et la protéine C-réactive. Ces auteurs ont rapporté des différences significatives entre cas et témoins pour ce qui est de la TSH et du rapport ALT/AST, ce qui suggèrerait l'existence de dysfonctionnements thyroïdiens, déjà signalés comme pathologie associée à l'EHS dans l'étude de Schooneveld & Kuiper (2008), et hépatique, ainsi que des processus inflammatoires chroniques dans de petites, mais significatives, fractions des sujets EHS. Par contre, ils réfutent « sans ambiguité » les hypothèses selon lesquelles une anémie ou un dysfonctionnement rénal joueraient un rôle majeur dans l'électrosensibilité.

A côté de ces résultats positifs, mais à confirmer, on relève quelques travaux qui n'ont identifié aucune anomalie biologique chez les sujets EHS. L'étude de Lonne-Rahm *et al.* (2000), déjà citée pour sa réfutation de l'hypothèse « mastocytes », n'a en outre observé, chez les mêmes patients et dans les mêmes conditions, aucune variation du taux de certaines hormones de stress (mélatonine, prolactine, hormone adréno-coritcotrope, neuropeptide Y) de l'hormone de croissance, et de l'expression de différents peptides, de marqueurs cellulaires et de cytokines (somatostatine, CD1, facteur XIIIa et TNFalpha). Celle de Hillert *et al.* (2001) a étudié les relations entre l'activité cholinesterasique et l'état de fatigue chez 14 patients EHS se plaignant d'une fatigue invalidante, et n'a trouvé aucune diminution de cette activité chez aucun de ces patients.

4.4.3.2.2 Les corrélats fonctionnels

Les techniques d'exploration fonctionnelle des systèmes cardio-circulatoire (fréquence cardiaque, pressions sanguine, ECG), respiratoire (fréquence, spirométrie) et nerveux (EEG, TMS, débit et

métabolisme cérébral) offrent une large gamme d'investigation possible. Leur application à l'étude des effets sanitaires des ondes radiofréquences peut se faire selon deux modalités de signification bien différentes. Soit on compare des sujets EHS à des témoins non EHS en ce qui concerne les résultats obtenus par ces techniques ; on peut ainsi identifier, comme avec les paramètres biologiques, des anomalies qui peuvent être utilisées comme critères de diagnostic ou comme piste de recherches physiopathologiques. Soit on étudie les effets d'une exposition aux ondes radiofréquences sur ces paramètres fonctionnels ; les résultats sont alors à comparer aux effets cliniques et/ou cognitifs de cette exposition et ne seront donc pas analysés dans le présent chapitre.

Les études ayant comparé des sujets EHS à des sujets témoins à l'aide de tests d'exploration fonctionnelle sont, à ce jour, assez rares. Elles se résument à deux groupes de travaux, ceux de l'équipe de médecine du travail de l'Université d'Uméa (Suède) sur les modifications du spectre de fréquence cardiaque (Sandström *et al.*, 2003 ; Wilèn *et al.*, 2006) et ceux de l'équipe de psychiatrie de l'Hôpital Universitaire de Ratisbonne, dirigée par P. Eichhammer, sur l'excitabilité corticale étudiée avec la technique de stimulation magnétique transcrânienne (Frick *et al.*, 2005 ; Landgrebe *et al.*, 2007 ; Landgrebe *et al.* 2008). Cette dernière technique a aussi été utilisée pour étudier les effets d'une exposition aux ondes radiofréquences (Ferreri *et al.*, 2006 ; Inomata-Terada *et al.*, 2007), avec des résultats qu'il convient de comparer à ceux de l'équipe de Ratisbonne.

Les travaux de l'équipe d'Uméa sur les paramètres cardio-circulatoires se sont déroulés en deux temps. Dans un premier temps, Sandström *et al.* (2003) ont effectué des enregistrements ECG de 24 heures chez 14 sujets EHS et chez 14 témoins appariés en âge et sexe et ont calculé la fréquence cardiaque moyenne et la variabilité de la fréquence cardiaque, en relation avec la mesure de l'exposition environnementale aux champs magnétiques. Ils ont observé, chez les sujets EHS, une absence d'augmentation de la composante haute-fréquence lors de l'induction du sommeil et pendant la nuit et une faible différence dans le spectre des fréquences cardiaques entre veille et sommeil, suggérant l'hypothèse d'une perturbation des rythmes circadiens de la fréquence cardiaque, liée à un déséquilibre du système nerveux autonome. Dans un deuxième temps, Wilèn *et al.* (2006) ont analysé ce phénomène en réalisant une étude de « double provocation », conçue pour préciser les rôles respectifs du stress et d'une exposition aux ondes radiofréquences dans la modification de plusieurs paramètres physiologiques (fréquence cardiaque, variabilité de la fréquence cardiaque, fréquence respiratoire, débit sanguin cutané, réaction électrodermale). Cette étude a été effectuée avec 20 sujets EHS et 20 témoins appariés en âge et sexe. Chaque sujet a subi deux expositions de 30 min, une réelle et une simulée, à un champ electromagnétique de type GSM 900 MHz (DAS 1 W/kg) dans un ordre aléatoire à 24 heures d'intervalle. Chaque exposition était en outre précédée et suivie d'une mesure de la fréquence de fusion visuelle, d'un test de mémoire à court terme et d'une mesure du temps de réaction. Ces épreuves avaient pour but, d'une part, de générer un stress et d'évaluer les effets de ce dernier sur les paramètres physiologiques et, d'autre part, d'étudier les effets de l'exposition sur ces paramètres. Au total, chaque expérimentation avait une durée de 80 minutes. Aucune différence entre sujets EHS et témoins n'a été observée en ce qui concerne les mesures de base (effectuées avant toute exposition), sauf pour le temps de réaction, plus long chez les sujets EHS que chez les témoins, différence qui disparut lors de la répétition du test. De même, aucune différence significative n'a été observée en fonction des conditions d'exposition. En revanche, les sujets EHS différaient significativement des témoins en ce qui concerne la variabilité de la fréquence cardiaque pendant la réalisation des tests de fréquence de fusion visuelle et de mémoire, quelles que soient les conditions d'exposition. Cette différence, augmentation des activités basses-fréquences et diminution des activités hautes-fréquences, a été interprétée comme un effet du stress, qui déclencherait un déplacement de la régulation du système nerveux autonome vers une dominance sympathique et serait à l'origine des symptômes perçus. Cette hypothèse d'une dysrégulation du système nerveux autonome chez les sujets EHS, cause ou conséquence de leur état, est intéressante à considérer dans la mesure où elle pourrait expliquer les échecs thérapeutiques et où elle confèrerait à ces situations un pronostic relativement bénin. Elle est compatible avec les résultats de l'étude clinique quantitative d'Eltiti *et al.* (2007 a), dans laquelle la composante neuro-végétative est apparue comme la plus importante, rendant compte

de la moitié de la variance totale expliquée (voir ci-dessus). Elle n'a pourtant pas été, à notre connaissance, explorée plus avant. Cette expérience paraît pourtant relativement facile à reproduire. D'autres moyens pourraient être utilisés pour apporter d'autres preuves expérimentales de ce type de dysrégulation.

Les travaux de l'équipe de Ratisbonne sur l'excitabilité corticale, explorée par stimulation magnétique transcrânienne, se sont également déroulés en deux temps, même si la première étude a donné lieu à deux publications (Frick *et al.*, 2005 ; Landgrebe *et al.*, 2007). La stimulation magnétique transcrânienne, en anglais *transcranial magnetic stimulation* (TMS), est une méthode d'investigation du système nerveux, utilisée depuis plus de vingt ans (Barker *et al.* 1985) pour explorer, de façon non invasive et non douloureuse, l'excitabilité corticale et spinale, la plasticité neuronale, la connectivité cérébrale et la cartographie fonctionnelle du cerveau. Elle a fait également l'objet d'essais thérapeutiques dans le traitement d'affections psychiatriques (dépression, manie, schizophrénie, TOC) ou neurologiques (Parkinson, épilepsie). En bref, l'appareillage comprend un générateur de courant qui émet de brèves impulsions électriques, réglables en fréquence et en intensité (entre 5 et 10 kA), et une bobine connectée à ce générateur. Cette bobine peut être soit une bobine ronde, soit une bobine en forme de huit (pour permettre une meilleure focalisation de la stimulation). Le champ magnétique induit est de 1 à 2 Teslas. L'aire corticale stimulée est d'environ 3 cm^2 et 2 cm d'épaisseur. Trois types d'exploration peuvent être réalisés selon que les impulsions magnétiques sont appliquées isolément, par paires ou de manière répétitive. En appliquant une simple impulsion magnétique, on obtient (quand cette stimulation porte sur le cortex moteur) un potentiel évoqué moteur que l'on peut enregistrer avec une électrode de surface. On optimise le résultat en modifiant légèrement l'emplacement de la bobine et l'intensité de stimulation. On recherche ensuite le seuil de réactivité, c'est-à-dire l'intensité de champ magnétique la plus faible qui produit (« élicite ») le potentiel évoqué. En appliquant les impulsions magnétiques par paire, on étudie l'inhibition et la facilitation intracorticales. On joue pour cela sur les intervalles de temps entre les *stimuli* (ISIs) ; lorsque ces intervalles sont brefs, 1-5 ms, on teste l'inhibition et lorsqu'ils sont longs, 7-30 ms, on teste la facilitation. Les applications répétitives ne concernent que les essais thérapeutiques.

Le travail de l'équipe de Ratisbonne comprend donc deux études successives, une étude pilote (un groupe EHS et deux groupes témoins d'une trentaine de sujets chacun), et une étude cas-témoins (89 sujets EHS et 107 témoins) destinée à valider les résultats de l'étude pilote. Dans les deux cas, les auteurs ont étudié, outre les paramètres classiques obtenus avec les techniques de simple impulsion et d'impulsions par paire, la capacité à discriminer une impulsion réelle d'une impulsion simulée. Dans l'étude pilote, les sujets EHS ont été comparés à deux groupes de témoins sélectionnés dans un échantillon représentatif de la population générale en fonction du nombre de symptômes déclarés, les uns parmi les 10 % ayant le plus bas niveau de symptômes et les autres parmi les 10 % ayant le plus haut niveau. Ces trois groupes de l'étude pilote différaient significativement en ce qui concerne la proportion de femmes, la perception de l'état de santé, le nombre de visites médicales dans l'année écoulée, l'évaluation subjective de la qualité du sommeil, le nombre de plaintes somatiques et la fréquence des états dépressifs. Le premier article (Frick *et al.*, 2005) donne les résultats relatifs au seuil de détection du *stimulus* magnétique, à la réponse motrice, qui ne montrent pas de différence significative entre les trois groupes, et à la capacité de différencier le signal réel du signal simulé, qui est significativement abaissée chez les sujets EHS, du fait d'un taux élevé de faux positifs lors des expositions simulées, alors que le seuil de détection des expositions réelles ne différaient pas significativement entre les groupes. Le deuxième article (Landgrebe *et al.*, 2007) donne les résultats relatifs à l'inhibition intra corticale (ISIs = 2 ms), qui n'est pas significativement modifiée chez les sujets EHS, et à la facilitation intracorticale (ISIs = 15 ms), qui est statistiquement diminuée chez les sujets EHS par rapport aux deux autres groupes de patients. Pour les auteurs, la baisse de l'excitabilité neuronale reflétée par cette diminution de la facilitation corticale, pourrait atténuer la plasticité cérébrale et les capacités adaptatives des sujets. D'où l'hypothèse d'un dysfonctionnement de la régulation corticale et d'une déficience des ressources adaptatives qui pourraient rendre compte de la plus grande vulnérabilité des sujets EHS aux influences environnementales et, en même temps, de la diminution de la

capacité à discriminer les entrées sensorielles extéroceptives des perceptions internes qui expliquerait les faux positifs lors des expériences de perception.

Pour valider ses résultats, le groupe de Ratisbonne a entrepris une étude cas-témoins (Landgrebe *et al.*, 2008a), dont les effectifs, calculés *a priori* à partir des données des travaux antérieurs pour être égaux à 90 par groupe, ont été finalement de 89 sujets EHS et de 107 témoins appariés en âge, sexe et, pour minimiser les effets potentiels de l'environnement, lieu principal de vie (habitation ou lieu de travail). Le protocole de stimulation magnétique transcrânienne a été identique à celui de l'étude pilote. De plus, sur la base de travaux antérieurs du groupe sur l'expérience subjective que les sujets EHS avaient de leur hypersensibilité électromagnétique (Frick *et al.* 2005), il a procédé à une évaluation des stratégies cognitives avec un questionnaire portant, entre autres, sur la rumination, la tendance à « externaliser » les causes potentielles de sensations corporelles et à « catastrophiser » les symptômes, la défiance à l'égard de la médecine officielle, le maintien de l'estime de soi, la perception de la vulnérabilité, et l'intolérance aux plaintes corporelles. Dans cette étude, les sujets EHS avaient un état de santé significativement moins bon que les témoins : plus de jours de maladie et de consultations médicales au cours de l'année précédente, moins bonne appréciation subjective du sommeil et de l'état général, score de plaintes subjectives trois fois plus élevé, et plus grande prévalence de co-morbidité psychiatrique (dépression majeure, troubles anxieux généralisés, troubles somatoformes). Comme dans l'étude pilote, la capacité de discriminer les stimulations réelles et simulées a été plus faible chez les sujets EHS (40 % seulement d'entre eux contre 60 % des témoins n'ont ressenti aucune sensation pendant les stimulations simulées), alors que le seuil de perception des impulsions magnétiques réelles était comparable dans les deux groupes (21 % de l'intensité maximale de l'impulsion chez les sujets ES contre 24 % chez les témoins). La facilitation intra-corticale était diminuée chez les jeunes EHS, comme dans l'étude pilote, et augmentée chez les EHS âgés, différence que les auteurs ne peuvent expliquer. Par ailleurs, cette étude a retrouvé de manière significative, chez les sujets EHS, la tendance à « ruminer » et à ne pas tolérer les symptômes, le sentiment de vulnérabilité et de lutte pour maintenir l'estime de soi.

Les données relatives à la stimulation magnétique transcrânienne doivent être considérées à la lumière des deux études ayant utilisé cette technique pour étudier l'excitabilité cérébrale après exposition à un champ électromagnétique émis par un téléphone mobile de type GSM. L'étude de Ferreri *et al.* (2006) a comporté deux expositions de 45 min de l'hémisphère gauche, l'une réelle et l'autre simulée, pratiquées en *cross-over* et double aveugle, à une semaine d'intervalle, chez 15 volontaires sains de sexe masculin. La technique d'impulsion magnétique par paire a été utilisée pour étudier l'inhibition et la facilitation intra-corticales dans les deux hémisphères avant et à différents temps après l'exposition. Dans cette étude, l'inhibition a été diminuée et la facilitation augmentée dans l'hémisphère exposé en comparaison avec l'hémisphère non exposé et l'exposition simulée. Cette augmentation de la facilitation est à l'opposé de la diminution de ce paramètre observée par l'équipe de Ratisbonne ; mais le premier résultat a été obtenu après une exposition aiguë alors que le second l'a été dans des conditions chroniques. Dans l'étude d'Inomata-Terada *et al.* (2007), les expositions, réelles et simulées, ont été de 30 min chez 10 volontaires sains. Les techniques de simple impulsion, appliquées sur le cortex moteur, le tronc cérébral et un nerf spinal, et d'impulsion par paire ont été utilisées. Aucun effet n'a été détecté. Ces quelques études illustrent bien les discordances de résultats, probablement en partie liées à des différences de technique et de procédure, que l'on observe dès que l'on multiplie les études de l'EHS avec un type de méthode.

Il n'en reste pas moins que les résultats déjà obtenus avec l'analyse spectrale de l'ECG et la stimulation magnétique transcrânienne ouvrent des pistes d'investigation qui méritent d'être explorées à l'aide de programmes de recherche concertés de manière à apporter rapidement des réponses fiables et, si possible, définitives sur ces sujets.

Il est possible aussi que d'autres méthodes d'exploration fonctionnelle apportent de nouveaux éléments en faveur d'un léger dysfonctionnement cérébral et/ou d'une vulnérabilité particulière chez les sujets EHS. En effet, à notre connaissance, aucune étude comparative entre sujets EHS et témoins n'a été publiée, au cours des dix dernières années, en ce qui concerne les différentes formes d'EEG (de veille, de sommeil, potentiels évoqués) et les différentes techniques d'imagerie

fonctionnelle (tomographie d'émission, IRMf, MEG), alors que la plupart de ces techniques a été utilisée pour étudier les effets d'une exposition à des champs EM chez des sujets normaux, avec des résultats difficiles à interpréter. (*cf.* 4.4.1.7.2).

4.4.3.2.3 Les corrélats psycho-sociaux

Aucune étude sur les caractéristiques psychologiques et/ou psychiatriques des sujets EHS n'a été publiée jusqu'aux articles récents de Bergdahl *et al.* (2004), de Rubin *et al.* (2008) et de Brand *et al.* (2009). Cependant, la subjectivité, la complexité et la non spécificité des symptômes cliniques, la rareté et la faible intensité des corrélats biologiques et fonctionnels, et la quasi négativité des études de provocation (voir ci-dessous) conduisent légitimement à se demander si l'EHS n'est pas un trouble psycho-somatique.

L'étude de Bergdahl *et al.* (2005) a été la première et jusqu'à présent la seule, à notre connaissance, à avoir appliqué un test de personnalité classique (la version suédoise à 238 *item*s de l'Inventaire de Tempérament et de Caractère de Cloninger) à deux groupes de sujets se plaignant d'une sensibilité anormale, soit à un plombage dentaire (n = 26), soit à des champs électromagnétiques (n = 33). En comparaison avec un groupe témoin, ces auteurs ont constaté que ces deux groupes de patients présentaient des anomalies (augmentation du score « persistance » sur la dimension tempérament) leur permettant de les considérer comme ayant des personnalités vulnérables. N'ayant pas trouvé de différences significatives entre les deux groupes, ils en ont conclu que ces derniers étaient quasiment semblables sur le plan de la personnalité et ils ont émis l'hypothèse que cette vulnérabilité pouvait s'exprimer sous forme de divers symptômes mentaux et somatiques, qui pouvaient être interprétés comme des symptômes de maladie liée à l'environnement par les sujets affectés.

L'étude de Rubin *et al.* (2008) n'a pas été ciblée sur les troubles de la personnalité, mais sur la santé psychologique en général et sur les symptômes de dépression de sujets EHS. Elle portait aussi sur leur santé générale, la sévérité de leurs symptômes fonctionnels, leur inquiétude et la présence d'autres syndromes médicalement inexpliqués. La particularité de ce travail a été de distinguer, à côté d'un groupe de 60 sujets témoins, deux groupes inhabituels de sujets EHS : un groupe de 52 sujets se plaignant uniquement d'une hypersensibilité aux téléphones mobiles (sujets TM), et un groupe de 19 sujets se plaignant en outre de symptômes attribués à l'exposition à d'autres appareils électriques (sujets ES). Le pourcentage de sujets classés en souffarnce mentale sur la base du questionnaire GHQ-12, n'était pas statistiquement différent dans les trois groupes. Mais les sujets ES, statistiquement plus âgés que les sujets TM et que les témoins ($47,3 \pm 14,0$ *vs* $33,4 \pm 10,9$ et $33,5 \pm 10,2$, $p < 0,001$) et sensibles aux téléphones mobiles depuis plus longtemps que les sujets TM (54 mois *vs* 41, $p < 0,02$), avaient un score de dépression plus élevé que celui des deux autres groupes ($p = 0,001$), des inquiétudes plus grandes à l'égard des toxiques ($p < 0,001$) et des rayonnements ($p < 0,001$). Par ailleurs, leurs scores de santé générale étaient abaissés par rapport à ceux des sujets TM et des témoins pour 8 des 9 sous-échelles du questionnaire SF-36 : fonctionnement physique ($p < 0,001$), fonctionnement social ($p < 0,001$), limitation physique ($p < 0,001$), limitation émotionnelle ($p = 0,004$), santé mentale (abaissée par rapport au groupe témoin seulement ; $p = 0,02$), énergie et fatigue ($p = 0,003$), douleur ($p = 0,001$) et perception générale de santé ($p < 0,001$), et leurs symptômes fonctionnels plus sévères pour 9 des 10 catégories de l'échelle de 49 symptômes utilisée : neurophysiologiques ($p < 0,001$), respiratoires ($p = 0,008$), cardio-vasculaires ($p = 0,003$), ophtalmologiques ($p < 0,001$), globaux ($p < 0,001$), neurologiques périphériques (plus sévères que le groupe témoin seulement ; $p = 0,01$), uro-génitaux ($p = 0,001$), auditifs ($p < 0,001$) et musculo-squelettiques ($p < 0,001$). Enfin, ils avaient une fréquence de syndromes médicalement inexpliqués (37 %) plus élevée ($p < 0,001$) que les sujets TM (0 %) et les témoins (2 %). Cette étude confirme l'hétérogénéité de l'EHS et l'existence de deux tableaux cliniques distincts, selon que les sujets se déclarent sensibles à une seule ou à plusieurs sources de champs électromagnétiques, comme l'avaient déjà constaté Levallois (2002) et Stenberg *et al.* (2002).

L'étude de Brand *et al.* (2009) déborde largement le problème de l'EHS pour se consacrer à celui des sujets se plaignant de troubles qu'ils attribuent à l'environnement. Même si l'exposition aux champs électromagnétiques a été la source de pollution la plus fréquemment rencontrée (39,4 % des cas) dans la population étudiée (n = 61), les résultats ne peuvent pas être attribués simplement à ce seul facteur. D'autres sources de pollution, comme le CO2, ont été presque aussi fréquentes (32,8 % des cas). L'intérêt de cette étude pilote est d'avoir montré la faisabilité (coûteuse en temps et en argent) d'une approche multimodale complexe, associant un examen médical, une exploration psychiatrique et une analyse environnementale, et d'un traitement intégratif des nombreuses données ainsi recueillies. Ce traitement a permis de pondérer ces trois composantes les unes par rapport aux autres, d'observer la présence de désordres psychologiques ou psychiatriques chez 38 (62,3 %) des 61 patients étudiés, et de constater qu'environ la moitié des symptômes pouvait être attribuée à une cause psychiatrique. De plus, grâce à une simplification peut-être abusive, les 61 sujets ont pu être répartis en 4 groupes bien distincts, ce qui confirme la grande hétérogénéité des syndromes médicalement inexpliqués

En résumé, ces trois études récentes attirent l'attention sur le fonctionnement psychique des sujets EHS, considérés soit comme tels, soit comme appartenant à une catégorie plus vaste de sujets se plaignant de symptômes médicalement inexpliqués. Qu'il s'agisse de vulnérabilité psychique, de dépression ou de troubles plus diversifiés, ces données sont à rapprocher de certains résultats des études fonctionnelles (Landgrebe *et al.* 2008), montrant une plus grande prévalence de co-morbidité psychiatrique (dépression majeure, troubles anxieux généralisés, troubles somatoformes) chez les sujets EHS par rapport à des témoins normaux (*cf*. 4.4.3.2.2), ainsi que de certains résultats des études de provocation suggérant l'existence d'un effet *nocebo* (*cf*. encadré ci-après) des champs électromagnétiques (*cf*. 4.4.3.4).

4.4.3.3 La prévalence de l'EHS

Dans les revues à comité de lecture, la prévalence de l'EHS a fait l'objet d'estimations variant de 1,5 % en Suède (Hillert *et al.*, 2002) à 5 % en Suisse (Schreier *et al.*, 2006), avec des valeurs de 3,2 % en Californie (Levallois *et al.*, 2002 b), de 4 % en Grande-Bretagne (Eltiti *et al.*, 2007a) et de 3,5 % en Autriche (Schröttner et Leitgeb, 2008). Une seule équipe, celle de Leitgeb à l'Université de Graz (Autriche) a réalisé une étude de l'évolution de cette prévalence et a conclu à une augmentation de celle-ci qui serait passée de 2 % à 3,5 % (Schröttner et Leitgeb, 2008). Toutefois, ces données doivent être considérées avec prudence car cette équipe a utilisé, en 1994 et en 2008, deux méthodes différentes pour évaluer cette évolution. Quant à l'initiative prise par Hallberg et Oberfeld, dans une lettre à éditeur de 2006, de représenter ces données et des données tirées de la littérature grise en fonction du temps, elle ne résiste pas à la critique scientifique. Ces auteurs ont ajouté aux données des revues à comité de lecture des données de la littérature grise donnant des prévalences plus élevées : 8 - 10 % (Infas, 2006), 11 % (Fox 2004) et même 13,3 % (Spiss, 2003), et ont extrapolé de l'ensemble une prévalence de 50 % en 2017, sans justifier ni même discuter la validité de cette extrapolation. Ils n'ont pas évoqué les différences dans la définition de l'EHS, dans la méthodologie de sélection des populations étudiées et dans la rédaction des questionnaires utilisés, qui expliquent en grande partie les différences de prévalence observées entre les diverses études citées. Ils n'ont pas davantage évoqué l'évolution de l'exposition aux ondes radiofréquences qui a très probablement augmenté au cours de la période considérée (1995 - 2005) et qui pourrait se stabiliser ou tout au moins croître bien plus lentement par la suite.

A notre connaissance, il n'y a pas eu d'étude sur la prévalence de l'EHS en France.

4.4.3.4 Les études de « provocation »

Provoquer l'apparition de la symptomatologie EHS par une exposition expérimentale, en simple ou double aveugle, aux ondes radiofréquences apparaît comme un moyen scientifiquement irréfutable de vérifier la validité de la croyance des sujets EHS selon laquelle leurs troubles sont dus à leur exposition aux ondes électromagnétiques.

Ces études ont été suffisamment nombreuses pour justifier deux revues systématiques (Rubin *et al.*, 2005 et Röösli, 2008). La revue de Rubin *et al.* portait sur 31 articles et celle de Röösli, limitée aux radiofréquences de la téléphonie mobile, sur 2 articles inclus dans le travail de Rubin *et al.*, et sur dix nouveaux articles, publiés entre 2005 et 2007, auxquels ont été ajoutés quatre articles de population. Depuis cette date, 8 articles ont encore été publiés (Arnetz *et al.*, 2007 ; Boutry *et al.*, 2008 ; Kwon *et al.* 2008 ; Hillert *et al.* 2008 ; Cinel *et al.* 2008 ; Landgrebe *et al.* 2008b ; Johansson A *et al.* 2008 ; Augner *et al.* 2009). Sur la base des 49 mémoires originaux ainsi répertoriés, on peut dire que, dans des conditions expérimentales, les personnes se déclarant EHS ont été, dans l'immense majorité des cas, incapables de démontrer leur aptitude à différencier la présence et l'absence de champs électromagnétiques, ou bien n'ont pas présenté plus de symptômes fonctionnels pendant les périodes d'exposition que pendant les périodes de non exposition. Toutefois, l'analyse de ces résultats ne permet pas de rejeter complètement l'hypothèse qu'il existe de rares sujets réellement sensibles aux ondes radiofréquences.

Rubin *et al.* (2005) ont classé ces études de provocation en trois groupes : celles concernant les écrans de visualisation (N = 13), qui ont été réalisées entre 1982 et 2000, celles concernant la téléphonie mobile (N = 7), réalisées entre 1995 et 2003, et celles concernant divers autres sources de champs électromagnétiques (N = 11), réalisées entre 1991 et 2003. Sur ces 31 études, 7 seulement avaient donné des résultats supportant l'hypothèse d'une relation de causalité entre l'exposition aux radiofréquences et les symptômes, 2 aux champs émis par les écrans de visualisation, 2 aux champs émis par la téléphonie, 2 aux basse fréquences 50 Hz et 1 à des champs électromagnétiques de différentes fréquences.

Röösli (2008) a limité sa revue aux études sur les effets des radiofréquences de la téléphonie mobile. Cet auteur a présenté les résultats en deux parties, l'une regroupant les études au cours desquelles les patients étaient invités à dire s'ils étaient ou non exposés et l'autre regroupant les études portant sur la survenue de symptômes pendant des périodes d'exposition réelle ou simulée. La première partie comprend une méta-analyse de 7 études totalisant 182 sujets EHS et 332 témoins non sensibles (Figure 24). La différence relative globale entre les réponses correctes observées et attendues est de 0,042 [IC 95 % : -0,021 - 0,105]). Le taux de détection correcte du champ a été légèrement plus élevé dans les études portant sur des sujets EHS que dans les études portant sur des sujets non EHS, sans que la différence soit statistiquement significative. Dans la discussion, Röösli dit qu'on ne peut pas exclure complètement que cette différence soit due à un petit nombre de sujets véritablement capables de percevoir les champs radiofréquences de faible niveau, mais que ces sujets n'ont pas encore été identifiés. S'ils existaient vraiment, il serait toutefois important qu'ils puissent être reconnus, d'une part, parce qu'ils traduiraient l'existence d'un mécanisme biologique pour l'instant inconnu et, d'autre part, parce que cette notion pourrait être utile dans la prise en charge des sujets EHS. Dans la deuxième partie, les relations entre exposition aux radiofréquences et symptômes non-spécifiques ont été analysées à partir de 8 articles de provocation et des 7 articles tirés des 4 études de population. Sur les 8 études de provocation, 7 ont été réalisées dans d'excellentes conditions expérimentales : *cross-over* entre expositions réelles et simulées, double-aveugle dans 5 cas et simple-aveugle dans 2. Parmi elles, une seule a mis en évidence une augmentation significative de l'éveil (p=0,03) et une tendance à l'augmentation de l'anxiété (p = 0,06) et de la tension (p = 0,09) lors de l'exposition réelle à une station de base UMTS comparée à l'exposition simulée (Eltiti *et al.*, 2007b). Les auteurs ont expliqué ce résultat par un déséquilibre dans l'ordre des expositions mais cette explication a été analysée et contestée par Röösli et Huss (2008). Röösli rappelle aussi qu'une association entre symptômes et exposition UMTS a été publiée sur la base d'une expérience qui a été relatée dans le rapport TNO (Zwamborn *et al.*) mais qui n'a pas été reproduite (Regel *et al.*, 2006). (*cf.* 4.4.1.7.2). En revanche, cinq études ont donné des résultats suggérant fortement

l'existence d'un effet *nocebo* à l'origine des symptômes : la survenue chez certains sujets EHS de réactions sévères pendant l'exposition simulée (Rubin *et al.* 2006.b), l'augmentation significative du score de symptômes chez les sujets EHS, et non chez les témoins, quand ils ont été informés qu'ils étaient exposés (Eltiti *et al.*, 2007b), la corrélation significative entre le score de symptômes et l'intensité perçue du champ chez les sujets EHS et non-EHS, même si cette intensité n'était pas associée au niveau d'exposition (Regel *et al.*, 2006), la forte corrélation ($p < 0,0001$) entre le score des symptômes et l'état fonctionnel d'une station de base UMTS (Heinrich *et al.*, 2007), l'absence d'association entre exposition et maux de tête, lors d'une étude en double aveugle, chez 17 sujets EHS se plaignant de maux de tête lors de l'utilisation d'un téléphone mobile et ayant déclaré des maux de tête, lors d'un test ouvert, lorsqu'ils ont été informés qu'ils étaient exposés (Oftedal *et al.*, 2007). En revanche, les études de population ont systématiquement montré une relation entre symptômes et exposition aux radiofréquences dans l'environnement quotidien, bien que ces études aient été très différentes en fonction de leurs protocoles et des sources d'exposition. Dans la discussion, Röösli discute soigneusement cette différence en soulignant les limites des deux approches. En ce qui concerne les études de provocation, il souligne tout d'abord la faible durée de l'exposition, qui n'a jamais dépassé 1 heure, alors que les études de population permettent d'observer les effets à long terme. Il aborde ensuite la possibilité d'un manque de puissance des essais aléatoires, qui pourrait être dû au petit nombre de sujets inclus dans ces essais (on peut ajouter aussi que ce manque de puissance pourrait être dû à une mauvaise sélection des sujets) : il note que les différences entre les critères d'évaluation utilisés dans ces essais ont empêché la réalisation d'une méta-analyse qui aurait pu avoir plus de puissance, il note aussi que, si le manque de puissance était seul en cause, on aurait observé une augmentation non significative des symptômes pendant les expositions réelles dans la plupart des essais, ce qui n'a pas été le cas. Il note enfin que plusieurs études ont été assez sensibles pour faire apparaître un effet *nocebo*. Il en conclut que, pour les expositions à court terme, les phénomènes *nocebo* sont plus importants que les effets biologiques potentiels. De plus, jusqu'à présent, les recherches des laboratoires n'ont pas pu identifier les caractéristiques d'exposition les plus pertinentes pour la santé dans l'environnement quotidien. Les études de population présentent aussi des limites : (1) absence d'estimation fiable de l'exposition réelle, avec notamment l'incapacité actuelle de tenir compte à la fois des expositions locales, périodiques et élevées, dues à des sources proches du corps et des expositions corps entier, continues et faibles, dues aux champs électromagnétiques dans l'environnement, (2) connaissance de l'exposition par les sujets pouvant induire un effet *nocebo*, (3) difficulté de prendre en compte d'autres facteurs environnementaux susceptibles de générer les mêmes symptômes, (4) biais de sélection des patients, particulièrement dans les études transversales. Pour résoudre ces difficultés, Röösli estime que des recherches au *design* sophistiqué sont nécessaires.

Effet *nocebo*. Du latin «je nuirai». Médicament ou geste médical en principe sans effet, mais qui produit néanmoins des symptômes vécus par les patients comme étant pénibles et ayant une signification pathologique. L'effet *nocebo* est causé par la suggestion ou la croyance qu'un médicament ou un geste médical est nuisible. Le terme n'est entré en usage que dans les années 1990, auparavant, on parlait d'effet *placebo* pour désigner autant les effets désirables que les effets indésirables attribués au pouvoir de suggestion. Une revue de la question a été faite par Barsky *et al.*

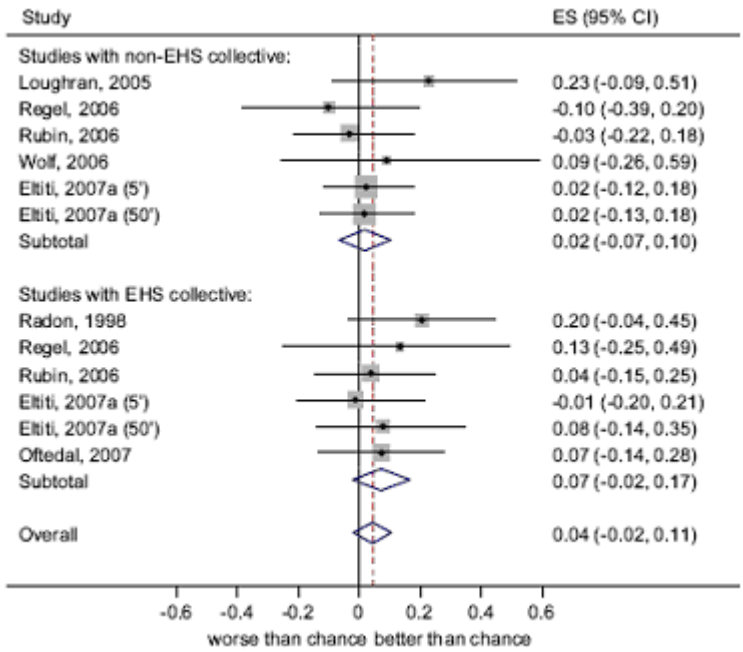


Figure 24 : représentation graphique des résultats d'études de provocation (d'après Röösli, 2008)

Après la revue de Röösli, sept études de provocation ont été réalisées donnant lieu à 8 publications (les articles de Arnetz *et al.*, 2007 et de Hillert *et al.*, 2008 donnant des résultats complémentaires obtenus lors de la même étude). Les autres publications sont celles de Boutry *et al.*, 2008 ; Kwon *et al.*, 2008 ;Cinel *et al.* 2008 ; Johansson A *et al.*, 2008 ; Landgrebe *et al.* 2008 ; Thomas *et al.*, 2008.

Plusieurs de ces études (Arnetz *et al.*, 2007 ; Kwon *et al.*, 2008 ; Cinel *et al.* 2008 ; Hillert *et al.*, 2008) ont confirmé l'incapacité des sujets, qu'ils soient EHS ou non, à reconnaître l'exposition aux radiofréquences mieux que par hasard, dans des circonstances variées. De ce point de vue, l'étude de Kwon *et al.* (2008) est particulièrement intéressante par le nombre de sujets inclus (N = 84), le nombre d'essais réalisés pour chaque sujet (N = 600) et par la récompense promise (50 €) si le taux de réponse correcte était ≥ 75 %. Deux sujets ont réussi une performance extraordinaire lors d'une série de 100 essais, avec un taux de réponse correcte de 97 et de 94 % respectivement, mais ils n'ont pas pu obtenir le même résultat lors de l'épreuve renouvellée, effectuée dans les mêmes conditions, un mois plus tard. L'étude de Cinel *et al.* (2008) a porté sur une population de 496 sujets normaux participant à trois études sur les effets cognitifs des ondes radiofréquences émises par un téléphone mobile de type GSM. L'expérimentation comportait deux expositions de 40 min, une réelle et une simulée, appliquées en double aveugle à une semaine d'intervalle. Lors de l'exposition réelle, le DAS moyen était de 1,4 W/kg et le DAS au *maximum* de 11,2 W/kg. Avant et après chacune des deux expositions, les sujets avaient à remplir un questionnaire de 5 *item*s (maux de tête, étourdissement, fatigue, piqure ou démangeaison dans la peau, sensation de chaleur cutanée) qu'ils devaient noter de 1 (pas de sensation) à 5 (sensation forte). Dans un groupe de sujets (N = 160), le score d'étourdissement a augmenté significativement (p = 0,001) pendant l'exposition réelle (de 1,12 ± 0,36 à 1,66 ± 1,0) en comparaison avec l'exposition simulée (de 1,16 ± 0,46 à 1,49 ± 0,81). Mais ce résultat n'a pas été retrouvé dans les deux autres groupes. Aucun autre paramètre n'a été modifié significativement. Pour les auteurs, leur recherche n'a pas trouvé de preuve solide suggérant que les ondes radiofréquences de la téléphonie mobile affectaient les symptômes subjectifs.

La publication de Arnetz *et al.* (2007) a été centrée sur les effets d'une exposition prolongée (3 heures) à un signal GSM à 884 MHz sur un enregistrement EEG du sommeil pratiqué une heure après la fin de l'exposition. Il s'agit d'un bref rapport préliminaire décrivant la méthodologie, qui est

rigoureuse et bien adaptée : recrutement soigneux des sujets ; population de 71 sujets, âgés de 18 à 45 ans, 38 EHS (22 femmes et 16 hommes) et 33 non-EHS (14 femmes et 19 hommes) ; protocole comportant 3 sessions de 3 heures, une session d'habituation, suivie de deux sessions d'exposition (réelle et simulée, sélectionnée au hasard) ; description détaillée du dispositif d'exposition (assurant une exposition reproductible de 1,4 W/kg de l'hémisphère gauche). Après l'exposition, les sujets étaient transférés dans un laboratoire de sommeil. Le temps de latence d'apparition du sommeil profond (stade 3) a été plus long après exposition réelle qu'après exposition simulée (0,37 ± 0,33 heures *vs* 0,27 ± 0,12, p = 0,0037). La quantité de sommeil de stade 4 a été moindre après exposition réelle qu'après exposition simulée (37,2 ± 28 *vs* 45,5 ± 28, p = 0,0019). Bien que rien ne soit dit, ni sur la comparaison des EEG de sommeil entre sujets EHS et non-EHS, ni sur l'évaluation subjective du sommeil, la discussion est réduite à sa plus simple expression, cette étude est à prendre en considération en raison de la durée de l'exposition et les données sur l'EEG de sommeil (qui restent à répliquer).

L'étude de Hillert *et al.* (2008), qui est signée par tous les auteurs de l'étude précédente, a porté sur le même nombre de sujets (N = 71 ; 38 EHS et 33 non-EHS) que celle-ci et ces sujets ont été soumis au même protocole de 3 sessions de 3 heures (habituation, puis expositions réelles et simulées en double aveugle et *cross-over*) avec le même système d'exposition de type GSM 884 MHz. La différence entre les deux études concerne les critères de comparaison entre sujets EHS et non-EHS et entre exposition réelle et exposition simulée. Il s'est agit ici d'étudier une série de symptômes fonctionnels, principalement les maux de tête, qui ont été évalués avec une échelle de Likert de 7 points avant les expositions, et après 1 h 30 et 2 h 45 d'exposition. Les maux de tête ont été plus fréquemment rapportés après exposition réelle qu'après exposition simulée, en raison surtout d'une augmentation dans le groupe non-EHS, ce qui justifie d'après les auteurs des investigations complémentaires à la recherche d'éventuels corrélats physiologiques. Par ailleurs, les sujets ont été invités à donner leur opinion sur la nature, réelle ou simulée, de l'exposition à laquelle ils étaient soumis et aucun groupe n'a détecté l'exposition réelle mieux que par hasard.

Au total, ces études très récentes apportent des solutions aux critiques formulées à l'encontre des études précédentes sur le nombre de sujets, sur les critères de leur sélection et sur la durée de l'exposition. Bien que les protocoles aient ainsi été améliorés, les sujets EHS, comme du reste les sujets non-EHS, sont restés incapables de différencier correctement les expositions réelles des expositions simulées. Toutefois, les légers effets fonctionnels et/ou symptomatiques qui ont été observés à la fin ou après des expositions prolongées (3 heures) justifient la poursuite de ce type de recherche.

Plus original est le travail de Landgrebe *et al.* (2008b) qui couple pour la première fois le paradigme de provocation par ondes électromagnétiques et le paradigme d'activation cérébrale, sur lequel a reposé les grands progrès accomplis ces 20 dernières années dans la connaissance des bases cérébrales des grandes fonctions psychiques. L'originalité de l'étude réside dans le choix des critères (activation des cortex cingulaire antérieur et insulaire) de réponse à une exposition simulée à des radiofréquences de type téléphonie mobile. Le protocole utilisé n'appelle aucune réserve méthodologique : comparaison de 15 sujets EHS et de 15 témoins sains appariés en âge et sexe, comparaison d'une exposition simulée à des radiofréquences et d'une exposition à la chaleur. Pendant l'anticipation et l'exposition simulée aux radiofréquences de type téléphonie mobile, les cortex cingulaire antérieur et insulaire ainsi que le gyrus fusiforme ont été activés chez les sujets EHS et non chez les témoins, alors que la stimulation calorique provoquait une activation similaire dans les deux groupes. Une relation entre les symptômes ressentis pendant l'exposition simulée et l'activation spécifique des cortex cingulaire antérieur et insulaire chez les sujets EHS constitue un argument fort en faveur de l'implication de ces aires corticales dans les perceptions désagréables et la génération de symptômes fonctionnels somatiques. Ce travail, qui

demande à être reproduit, ouvre une réelle perspective de démonstration de l'effet *nocebo* dans la genèse de l'EHS.

Il faut citer aussi l'étude de Johansson A. *et al.* (2008), qui a déjà été analysée dans les chapitres consacrés aux effets immunologiques et aux pathologies associées (voir ci-dessus). L'objectif principal de cette étude était d'étudier le rôle éventuel de la dermatite atopique (DA) dans l'EHS. Dans cette perspective, ces auteurs ont comparé les effets d'une exposition bien définie à des radiofréquences de téléphonie mobile dans deux populations, l'une de 15 sujets atteints de dermatite atopique (DA) et l'autre de sujets témoins appariés en âge et sexe. Indépendamment de la négativité des résultats cliniques et biologiques, leur permettant de rejeter l'hypothèse selon laquelle la DA serait un terrain favorable au développement de l'EHS, les auteurs ont noté que 9 sujets sur 13 chez les DA et 4 sujets sur 15 chez les témoins ont déclaré avoir ressenti des symptômes fonctionnels d'EHS pendant l'exposition. Dans les 2 groupes, les symptômes déclarés ont été plus nombreux le jour de l'exposition vraie que le jour de l'exposition simulée. Mais l'exploitation statistique de ces données n'a pas été possible en raison du petit nombre de ces symptômes.

Enfin, des réserves méthodologiques sur les systèmes d'exposition utilisés pour les études de provocation ont été formulées par Boutry *et al.*, 2008. En comparant les dispositifs utilisés par les équipes de Turku et de Swinburne, construits à partir des téléphones du commerce modifiés et donnant de ce fait une exposition très localisée de la joue (partie supérieure) et du gyrus temporal moyen (juste au-dessus de l'oreille) à celui de l'équipe de Zurich, spécialement optimisé pour exposer la totalité de l'hémisphère cible, ils ont obtenu des DAS au pic spatial, moyennés sur 1 g de cortex, de 0,19 W/kg pour le dispositif de Zwinburne, de 0,31 W/kg pour le dispositif de Turku et de 1 W/kg pour le dispositif de Zurich. De plus, avec les dispositifs basés sur des téléphones, l'exposition n'a pu être valablement calculée que dans une très petite zone autour de l'exposition maximum, l'exposition dans le reste du cortex pouvant varier grandement en fonction de la position de l'appareil et de l'anatomie locale des sujets. En conclusion, ils insistent sur la nécessité d'adopter des dispositifs d'exposition soigneusement conçus pour exposer les aires cérébrales adéquates à un niveau bien défini, les études de provocation ne pouvant être valablement comparées et reproduites que si elles comportent des informations dosimétriques suffisamment détaillées.

4.4.3.5 Les essais de traitement de l'EHS

Il peut paraître paradoxal d'avoir procédé à des essais thérapeutiques pour une « affection » dont la définition, purement clinique, est restée floue pendant longtemps (et le reste encore pour une part) et dont les causes et mécanismes sont inconnues. En fait, il faut considérer ces essais, non seulement, dans leur dimension pragmatique de recherche d'une solution efficace toujours nécessaire en médecine, mais aussi dans leur dimension théorique d'apport à la compréhension de ces causes et mécanismes.

Dans l'ensemble, ces essais n'ont pas donné de résultats véritablement significatifs. Ils auraient pu être résumés en quelques lignes s'il n'y avait pas le projet gouvernemental de poursuivre *« l'élaboration d'un protocole d'accord et de prise en charge des patients hypersensibles aux ondes électromagnétiques.*

Ces essais ont été suffisamment nombreux pour justifier trois synthèses publiées en 2005 et 2006 : les deux premières ont constitué des chapitres de revues envisageant les différents aspects de l'EHS (Crasson, 2005 – Irvine, 2005) et la troisième a porté exclusivement sur ces essais (Rubin et, 2006). Ces trois documents reposent sur l'analyse de 12 articles (Tableau 23), dont 7 figurent dans les 3 revues et 1 dans 2 revues. Parmi les 4 articles restant, 3 sont en langue suédoise. Inclus par Irvine (2005) mais pas dans sa liste de référence, leurs caractéristiques ont été extraites d'un compte-rendu de réunion (Hillert, in Leitgeb N, *International*

Workshop on Electromagnetic Fields and Non-pecific Symptoms. Proceedings. Graz, Austria, 1998). Reste un article cité par Irvine (2005) sur un essai d'antioxydants

Tableau 23 : Liste des publications relatant un essai thérapeutique dans l'EHS et indiquant leur citation dans les trois revues portant sur le sujet.

		Crasson, 2005	Irvine, 2005	Rubin *et al.*, 2006
Arnetz *et al.*, 1995	**A**	X	X	X
Oftedal *et al.*, 1996	**P**	X	X	X
Anderson *et al.*, 1996	**C**	X	X	X
Liden *et al.*, 1996	**G**		X	
Harlacher *et al.*, 1998*	**G**		X	
Harlacher *et al.*,1998*	**C**		X	X
Hillert *et al.*, 1998	**C**	X	X	X
Ockerman, 1998	**AO**		X	
Eliasch*	**S**		X	
Oftedal *et al.*, 1999	**P**	X	X	X
Hillert *et al.*, 2001	**AC**	X	X	X
Hillert *et al.*, 2002	**C**	X	X	X
A : acupuncture – P : protection physiques - C : thérapies cognitives - G : prise en charge globale – AO : supplémentation par antioxydants – S : *Shiatsu*				

*Ces publications en suédois sont citées par Hillert 1998.

Crasson (2005) et Irvine (2005) ont eu cependant une approche plus large de la prise en charge des sujets EHS. Ainsi, Crasson a mentionné les études du groupe de l'Université d'Uméa, Suède (Hillert & Kolmodin-Hedman, 1997 ; Hillert *et al.*, 2002) qui ont identifié, dans 10 à 20 % des cas, une maladie somatique expliquant les problèmes attribués à l'électricité. Ils en ont déduit qu'il fallait non seulement faire des bilans médicaux et éventuellement dentaires systématiques, mais aussi rechercher les facteurs environnementaux, autres qu'électromagnétiques, susceptibles de contribuer aux symptômes observés. Cette démarche a été mise en œuvre dans l'étude pilote menée par Brandt *et al.* (2009) dans la ville de Bâle (*cf.* paragraphe 4.4.3.2.3). Crasson a également repris la position de la Commission européenne (Berqvist & Vogel, 1997, selon laquelle il est important de prendre en considération les personnes hypersensibles à l'électricité et d'analyser leurs plaintes de manière adaptée, par une approche individuelle et sans focalisation sur un facteur unique. Enfin, Crasson a cité une étude montrant que, dans certains cas, les tests de provocation permettent aux personnes EHS de remettre en question la relation entre les symptômes fonctionnels et l'exposition aux champs incriminés (Toomingas, 1996).

Irvine, pour sa part, a retenu des essais antérieurs à 1995 qui ont été ignorés par Crasson et Rubin *et al.* et a dressé une liste des nombreux autres traitements qui ont été proposés,

notamment par des groupes de pression, bien qu'aucun n'ait été évalué. Irvine a également rappelé le seul programme complet de prise en charge des sujets EHS à avoir été publié (Hillert, 1998) Ce programme comprend 4 séries de mesures : (1) des mesures de prévention comprenant l'information objective du public et de groupes cibles ainsi que l'élimination/réduction des facteurs de risque ; (2) des mesures d'intervention précoce, basées dès les premiers symptômes, sur un examen médical complet à la recherche d'autres facteurs et sur des traitements symptomatiques aussi rapides que possible pour réduire l'incapacité et améliorer la qualité de vie ; (3) des mesures de traitement personnalisé pour les sujets dont les symptômes persistent, en fonction de la présentation clinique et des réponses au traitement et (4) des mesures d'évitement des champs électromagnétiques qui ne sont en aucune façon nécessaires et qui doivent être pesées soigneusement dans l'intérêt du sujet (il sera revenu plus loin sur ce sujet).

Tout récemment, un autre programme de prise en charge globale des sujets EHS a été proposé (Brandt *et al.*, 2009). Il comprend : (a) l'élimination ou la réduction des agents environnementaux nocifs, (b) le traitement des plaintes somatiques sans se préoccuper des éventuelles relations entre exposition environnementale et symptômes, (c) la détection et la réduction des facteurs psychiques intervenant dans la pathogénie et la perpétuation de la charge et (d) l'augmentation des perspectives de traitement positives.

Pour en revenir aux essais contrôlés, ils se répartissent en six groupes selon qu'ils concernent les thérapies cognitives (4 études), les protections physiques (2 études), la supplémentation alimentaire en antioxydants (2 études), les prises en charge globales et prolongées (2 études), l'acupuncture (1 étude) et le *shiatsu* (1 étude).

Les thérapies cognitives.

Pour Irvine (2005) et Rubin *et al.* (2006) elles ont donné lieu à 4 essais, dont 3 figurent aussi dans la revue de Crasson. Mais cette dernière mentionne 4 autres références sans en faire la moindre description. Rubin *et al.* (2006) ont décrit les bases théoriques justifiant l'utilisation de ces thérapies chez les sujets EHS, à savoir l'idée de rompre le cercle vicieux engendré par l'attribution de symptômes à une exposition aux champs électromagnétiques avec, outre un comportement d'évitement des sources d'exposition souvent mal adapté et difficile à réaliser, une anxiété, un découragement et une attitude d'hyper vigilance qui seraient à l'origine de nouveaux symptômes. Ces thérapies seraient un moyen d'encourager les sujets à mettre en question l'attribution des symptômes à une exposition aux champs électromagnétiques et à tester d'autres interprétations causales, ainsi qu'un moyen de faire face aux symptômes. Pour Rubin *et al.* (2006), 3 de ces 4 études ont rapporté une amélioration des sujets traités, mais chaque fois sur des critères différents : réduction du degré de la souffrance liée à l'EHS, réduction de la sévérité des symptômes, réduction du handicap et réduction du nombre de sujets se décrivant comme sensibles aux champs électromagnétiques. De plus, dans la seule étude ayant testé la réponse des sujets à une provocation expérimentale après thérapie cognitive, celle-ci n'a pas eu d'effet sur l'augmentation de la sévérité des symptômes induite par la provocation et sur les croyances des sujets quant à leur capacité à détecter les champs électromagnétiques. Pour Irvine (2005), 3 de ces études ont obtenu un « succès limité ». Pour Crasson enfin, des publications tendent à démontrer l'efficacité des thérapies comportementales au niveau du handicap perçu et du degré d'hypersensibilité.

Les protections physiques ont consisté en des filtres d'écran d'ordinateur fixés sur l'écran des travailleurs de bureau se déclarant EHS. ces dispositifs ont fait l'objet de deux études aléatoires en double aveugle, utilisant un filtre *placebo* inactif comme situation témoin. Ces deux études ont été résumées par Rubin *et al.* (2006) et par Irvine (2005). Dans la première, d'une durée de 2 semaines chez 20 travailleurs, aucune différence entre les deux situations n'a été observée en ce qui concerne les signes dermatologiques objectifs, bien que les participants aient rapporté une

diminution significativement plus importante des picotements avec le filtre actif qu'avec le *placebo*. La deuxième expérimentation, d'une durée de 3 mois chez 42 travailleurs, n'a observé aucune différence entre filtre actif et filtre *placebo*. Dans les deux études, l'utilisation des filtres, qu'ils soient actifs ou *placebo*, a été associée à une réduction des symptômes déclarés en comparaison avec une période de référence antérieure sans aucun filtre. Crasson, qui cite les deux articles sans en donner le contenu, se réfère à d'autres auteurs (Stenberg *et al.* 2002) pour dire que *« les mesures réalisées au niveau de l'environnement, notamment celles destinées à réduire l'exposition à l'écran ou à d'autres appareils électriques ne sont pas associées à un meilleur pronostic ».*

Au delà de ces études ponctuelles, Crasson a abordé le problème de la réduction de l'exposition globale d'une manière plus systématique. Les sujets EHS interrogés par Röösli *et al.* (2004) ont considéré que cette réduction avait été efficace, qu'elle soit le résultat d'une déconnexion de l'électricité, de la suppression des sources intérieures, de l'évitement des expositions, du réaménagement de la maison, voire même du déménagement. Mais, pour d'autres, cette réduction peut avoir des inconvénients. Elle peut renforcer la croyance en une relation de causalité entre exposition et symptômes et, ainsi, accroître la peur et intensifier la symptomatologie (Göethe *et al.*, 1995). Elle peut être inefficace chez les personnes qui pensent qu'elles ont été exposées pendant trop longtemps pour que leurs symptômes régressent (Hillert & Kolmodin-Hedman, 1997). Surtout, l'évitement total de toute source de champs EM étant pratiquement impossible, les tentatives de réduction peuvent entraîner un stress chronique lié à l'incapacité de contrôler l'exposition (Hillert *et al.*, 2002).

La supplémentation alimentaire en antioxydants a fait l'objet de deux études. La première, publiée uniquement sur internet[84], a montré une amélioration d'un score symptomatique et de certains paramètres biologiques, mais n'a pas comporté de groupe contrôle (Irvine, 2005). La seconde, citée dans les 3 revues, est une étude aléatoire, en double-aveugle, en *cross-over*, contre *placebo* (Hillert *et al.* 2001). Elle n'a pas montré de différence entre le traitement à base d'antioxydants et le traitement *placebo*. Pour Crasson, ce résultat invalide l'hypothèse du stress oxydatif comme principal acteur de l'EHS.

Les prises en charge globale et prolongée ont fait l'objet de deux rapports en langue suédoise, qui ont été extraits par Irvine d'un article antérieur (Hillert, 1998). L'une (Liden *et al.*, 1996) a été réalisée sur 220 travailleurs EHS, dans le cadre d'un programme interventionel multidisciplinaire de 2 ans mis en œuvre par le service de médecine du travail d'une entreprise. À l'issue de l'étude, 60 % des sujets n'avaient plus de symptômes (et travaillaient à plein temps sur écran d'ordinateur) et 30 % étaient mieux portants. La seconde (Harlacher *et al.*, 1998) relate l'expérience d'un dermatologiste qui a suivi 80 sujets EHS pendant 0 à 26 mois, en leur accordant un temps supplémentaire de consultation et en portant un intérêt spécial aux facteurs psychosociaux : 30 sujets ont récupéré.

L'acupuncture.

Elle a fait l'objet d'un des deux seuls essais contrôlés contre *placebo* (Arnetz *et al.,* 1995). Cet essai a été considéré comme bénéfique par Crasson (2005) et comme « *successful* » par Irvine (2005). Seuls Rubin *et al.* (2006) en ont fait l'analyse : l'efficacité de 5 semaines d'acupuncture profonde (traitement actif) a été comparée à celle de 5 semaines d'acupuncture superficielle (traitement témoin) chez 20 volontaires EHS. Un suivi de 6 mois a montré, d'après les déclarations des participants, que les deux traitements avaient entraîné une amélioration significative de la satisfaction au travail, de l'aptitude à travailler sur écran d'ordinateur, de l'aptitude à se relaxer après le travail, de l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques, de la

[84] Ockerman, 1998 ; http//www.papimi.gr/cases/ockerman/ockerman2.htm

sévérité des symptômes et de l'utilisation d'analgésiques, sans qu'il y ait de différence significative entre les deux traitements. L'hypothèse initiale étant que l'acupuncture profonde pouvait moduler les entrées sensitives, les auteurs avaient suggéré que ces améliorations n'étaient probablement pas dues à un quelconque effet de l'acupuncture, mais avaient pu être induits pas une diminution du sentiment de désespérance et une diminution de la conviction que tous leurs symptômes étaient causés par les champs électromagnétiques. On peut aussi considérer ce résultat comme dû à un effet *placebo*, compensant l'effet *nocebo* attribué par plusieurs auteurs à l'exposition aux champs électromagnétiques (voir chapitre consacré aux études de provocation chez les sujets EHS, ci-dessus), effet *nocebo* dont les bases neurales pourraient avoir été mises en évidence par un test d'activation (voir même chapitre).

Le *Shiatsu*, méthode manuelle mise au point au Japon pour améliorer globalement la santé, a fait l'objet d'une étude citée par Irvine (2005). Douze mois après le traitement, 78 % des 36 sujets se sont déclarés très satisfaits et 47 % étaient au travail. Pour Irvine, ce résultat, comme ceux qui ont été obtenus avec l'acupuncture, sont davantage dus à la mise en place d'un environnement soignant qu'à un effet spécifique des actions entreprises.

D'une manière générale, les trois revues s'accordent pour considérer que ces articles appellent des réserves méthodologiques. Pour Irvine (2005), ces études *« souffrent d'une combinaison d'un petit nombre de sujets inclus et de variations potentielles à l'intérieur des populations étudiées et entre elles. Peu d'information sont données sur les expositions attribuées aux sujets. Ces facteurs limitent leur applicabilité générale à l'extérieur du groupe étudié. »* Pour Rubin *et al.* (2006), *« Peu de recherches de qualité ont été réalisées sur les traitements possibles de l'EHS. Seulement trois essais (sur 9) étaient randomisés en double aveugle. Il est clair qu'une recherche de meilleure qualité est nécessaire. »* Pour Crasson, *« des études contrôlées à grande échelle sont nécessaires afin d'évaluer l'efficacité des différentes approches thérapeutiques. »*

A notre connaissance, depuis ces trois revues, une seule expérimentation thérapeutique a été publiée (Nieto-Hernandez *et al.* 2008). Il s'agit d'une étude au *design* complexe, réalisée dans le prolongement d'une étude de provocation (Rubin *et al.*, 2006) n'ayant montré aucune différence entre les effets d'une exposition à un signal GSM à 900 MHz et les effets d'une exposition simulée sur de nombreux paramètres pertinents, aussi bien chez des sujets EHS que chez des témoins. La divulgation tardive des résultats – négatifs pour la relation de causalité entre exposition et symptômes - de cette étude de provocation n'a eu aucun effet quantifié sur les symptômes de sujets EHS et sur leur croyance en la causalité de la téléphonie mobile. Ces résultats sont en désaccord avec ceux de Toomingas (1996) cité par Crasson (2005). Mais, la méthodologie, certes rigoureuse, étant probablement mal adaptée à l'objectif visé, ils ne permettent pas de clore le débat. D'autant qu'une discussion sur les données qualitatives extraites des discours recueillis au moment de la divulgation des résultats donne, en relation avec des considérations sur les thérapies comportementales, matière à réflexion pour des études ultérieures.

En résumé, les quelques tentatives et essais thérapeutiques dans l'EHS n'ont pas permis d'obtenir des résultats probants. Il semble cependant qu'une tendance se dégage en faveur des thérapies comportementales et des prises en charge globale, dans la mesure où elles sont davantage centrées sur les symptômes que sur leurs causes. Comme dans d'autres domaines, seules quelques études multicentriques portant sur plusieurs centaines de sujets et conduites selon les règles strictes des essais de médicaments pourront apporter des réponses claires à cette question. Toutefois, de telles études semblent être prématurées tant qu'un large consensus sur la symptomatologie de l'EHS et sa structuration n'aura pas été atteint et tant que ses relations avec des affections comme le syndrome de fatigue chronique, la fibromyalgie ou la spasmophilie n'auront pas été clairement précisées.

4.4.3.6 Conclusions sur l'EHS

Depuis 2005, aucun auteur n'a contesté la réalité du vécu des personnes qui attribuent leurs problèmes de santé à une exposition à des ondes radiofréquences. Mais, aucun n'a apporté la preuve d'une relation de causalité entre cette exposition et l'EHS.

Les nombreuses recherches sur l'EHS ont pâti, jusqu'à une date récente, d'une approche inadaptée de symptômes subjectifs (qui constituent l'essentiel de cette situation clinique). Un progrès vient d'être accompli avec la quantification de ces symptômes et leur regroupement en composantes. L'harmonisation des méthodes utilisées laisse espérer la mise au point d'un outil diagnostic convenable.

Parallèlement, un faisceau d'indices concordants a été recueilli, suggérant fortement que des facteurs neuro-psychiques individuels interviendraient, au moins en partie, dans la genèse de l'EHS. Ces indices prennent d'autant plus de valeur qu'ils proviennent d'études ayant des objectifs et des méthodes très différentes : dysrégulation du système nerveux autonome vers une dominance sympathique et baisse de la capacité à discriminer les stimulations réelles et simulées mise en évidence par les tests d'exploration fonctionnelle ; vulnérabilité psychique, score de dépression plus élevé et plus grande comorbidité psychiatrique mis en évidence par les études psychologiques et psychiatriques ; sensibilité à l'effet *nocebo* des champs électromagnétiques révélée par les études de provocation ; résultats des thérapies comportementales.

Ces données devraient être prises en compte dans « l'élaboration d'un protocole d'accueil et de prise en charge des patients hypersensibles » prévue par le gouvernement, opération qui représente par ailleurs une occasion unique de mettre en œuvre un programme de recherche cohérent et efficace, qu'il serait profondément regrettable de laisser passer.

4.4.4 Conclusions sur les effets sanitaires des radiofréquences

L'actualisation de cette expertise collective a reposé sur l'analyse d'un très grand nombre d'études, dont la majorité a été publiée au cours des cinq dernières années. La validité de ces études a été analysée et n'est pas toujours acquise. Les données issues de la recherche expérimentale disponibles n'indiquent pas d'effets sanitaires à court terme ni à long terme de l'exposition aux radiofréquences. Les données épidémiologiques n'indiquent pas non plus d'effets à court terme de l'exposition aux radiofréquences. Des interrogations demeurent pour les effets à long terme, même si aucun mécanisme biologique analysé ne plaide actuellement en faveur de cette hypothèse.

5 Synthèse des principaux rapports

5.1 Méthode d'analyse

Dans ce chapitre, les rapports d'études sur la question de l'impact sanitaire des radiofréquences rendus publics depuis 2005 ont été analysés. Dans le cadre des rapports, il est apparu important de distinguer :

- d'une part, les programmes de recherche subventionnés, en resituant leur cadre international (OMS) ou historique (rapport Stewart pour le MTHR). Pour chacun, un point des connaissances, les principaux résultats et les conclusions et les questions restant en suspens ont été proposés ;
- D'autre part, les rapports d'experts proprement dits : outre une démarche proche de la précédente, le champ d'application propre à chaque travail des groupes d'experts a été proposé, le cadre pouvant largement dépasser celui des radiofréquences.
- Une mention particulière a été faite au rapport Bioinitiative du fait de sa portée médiatique, bien qu'il s'agisse davantage d'un recueil de chapitres indépendants que d'une expertise collective au sens usuel du terme.

5.2 Rapports d'expertise collective

5.2.1 Programmes de recherches subventionnés

5.2.1.1 Rapport annuel 2006 du Conseil en santé des Pays-Bas concernant les champs électromagnétiques : *Health Council of the Netherlands* (HCN)

Ce rapport est une mise à jour plus spécialement destinée au DECT et à l'UMTS, avec en particulier une analyse critique de la réplication suisse de 2003 de l'étude TNO[85]. L'étude suisse a considéré des populations plus importantes et plus homogènes avec exposition UMTS (1 V/m et 10 V/m) et n'a pas retrouvé d'effet sur le bien-être ou sur les performances cognitives. D'autres études sur la perception visuelle (exposition céphalique) et la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique (cultures) se sont révélées négatives. La conclusion est qu'aucun effet à court terme n'est observé, sans préjuger de possibles effets à long terme.

En ce qui concerne les téléphones sans fil DECT en usage normal, cette valeur n'excède pas 1 V/m (l'estimation de la puissance absorbée est détaillée dans le rapport). Les études épidémiologiques sur le DECT sont rares et non concluantes spécialement sur la survenue de tumeurs cérébrales sur le long terme. Les autres études *in vitro* et *in vivo* sont rapportées aux signaux GSM et n'apportent pas de conclusions utiles. Finalement, le rapport conclut que le signal DECT n'excède pas les valeurs limites de l'Icnirp, et qu'il est peu probable que des effets délétères existent dans les limites d'utilisation.

[85] L'étude TNO avait montré des effets de l'exposition UMTS sur le bien être et les fonctions cognitives ; la sélection des populations et les questionnaires apparaissaient contestables à la date de publication de l'étude et plusieurs organismes avaient recommandé de répliquer l'étude TNO (notamment Afsset, 2005).

5.2.1.2 Rapport d'avancement 2006-2007 de l'OMS concernant le projet international sur les champs électromagnétiques (*The international EMF project*)

Après avoir resitué le cadre international des collaborations entre agences de protection sanitaire, l'évaluation du risque est présentée par gamme de fréquence (TBF, RF), indiquant les points d'appel, les groupes de travail et *meetings* chargés d'examiner ces points, et les sites sur lesquels trouver les conclusions dans les gammes des très basses fréquences et des radiofréquences. Pour les radiofréquences : la mise en place d'une publication est dans l'attente des résultats de l'étude Interphone et des publications du CIRC sur les cancers.

Dans la revue des congrès qui suit, un accent est mis sur les porteurs d'implants médicaux (pompe à insuline, implants cochléaires ou *pacemaker* par exemple), les femmes enceintes, la compatibilité électromagnétique et la dosimétrie.

Un projet de document législatif commun est à l'étude par les différentes institutions (Icnirp, IEEE, *etc*.), un manuel de recommandations pour le développement de normes pour la protection contre les champs électromagnétiques a été publié en 2006[86], ainsi qu'un modèle de réglementation à destination des états qui souhaitent se doter d'une législation en ce sens[87].

5.2.1.3 Rapport 2007 du programme de recherche britannique en santé et communication mobile : *Mobile Telecommunications and Health Research Program* (MTHR)

Le MTHR a été initié en 2001 à la suite des recommandations du groupe d'expert "Stewart", sous forme de 28 projets de recherches, dont 23 sont terminés. Ces 23 projets ont tous donné lieu à des publications[88], sur les thématiques suivantes :

Les tumeurs cérébrales et du système nerveux : aucune association n'a été retenue à court ou à moyen terme dans l'étude épidémiologique multinationale (Royaume-Uni, Danemark, Norvège, Finlande et Suisse) ni dans la majorité des études, y compris dans le cas de gliomes ou de neurinomes de l'acoustique. Cependant, l'incidence à long terme n'est pas connue et de nouvelles études de cohortes sont entreprises sur le sujet et sur d'autres pathologies cérébrales comme les maladies de Parkinson ou d'Alzheimer.

Fonctions cérébrales : après identification initiale de possibles effets sur la circulation cérébrale et la tension, ou bien des effets néfastes, les études menées, en particulier sur des volontaires sains (cas des systèmes TETRA), n'ont finalement apporté aucun argument dans ce sens.

Si de nouvelles études sur l'adulte paraissent maintenant inutiles, le cas n'est pas tranché pour l'enfant du fait du manque de recherches disponibles.

Hypersensibilité aux RF : des symptômes non spécifiques (céphalées, nausées, faiblesse, vertiges, *etc*.) ont été attribués à l'exposition aux champs électromagnétiques faibles. Les études menées jusqu'à présent sont toutes négatives. Cependant, trois études sur TETRA sont en cours mais les résultats ne sont pas encore disponibles.

Effets biologiques élémentaires : les effets cellulaires sur les protéines de stress ou le signal calcium ont été reliés à des effets thermiques. En l'absence d'autres éléments, le comité du MTHR ne juge pas nécessaire de soutenir d'autres programmes dans ce sens.

Autres considérations : les *micro* ou *pico* cellules, bien que de faible puissance, peuvent générer des niveaux d'exposition supérieurs ou comparables à ceux de *macro* cellules en raison de la proximité des personnes, si bien que le sujet reste sous surveillance du MTHR.

En termes de communication du risque, qu'il s'agisse de la définition de ce risque ou bien de recommandations d'attitudes de précautions individuelle ou collective, le sujet n'est pas couvert,

[86] http://www.who.int/peh-emf/standards/EMF_standards_framework%5b1%5d.pdf

[87] http://www.who.int/peh-emf/standards/EMF_model_legislation_2007.pdf

[88] www.mhtr.org.uk

en particulier du fait de la diversité des sources disponibles, de nombreux facteurs d'interprétation, de la non préhension du risque en tant que tel. Cette voie de recherche doit être poursuivie.

Conduite de véhicules : quoique autorisé, l'usage du kit mains-libres, comme du téléphone à la main, est source de distraction et donc d'accident. La controverse tient à la comparaison avec d'autres sources de distractions (conversation réelle).

A l'issue du rapport, les deux axes de priorité qui se dégagent portent sur les études de cohorte sur les adultes (cancer du cerveau à long terme) et sur l'exposition de l'enfant.

5.2.1.4 Rapport 2007 de l'office fédéral suisse de l'environnement concernant les téléphones mobiles

Ce rapport est une actualisation d'un rapport précédent publié en 2003, enrichi de l'examen des résultats des études PerformB et REFLEX. Les effets biologiques ont été classés :

- sur l'évaluation, en : *prouvé, probable, possible, improbable, non évaluable*, selon une classification OMS (*http://monographs.iarc.fr*).

- sur l'importance de l'effet lui-même en : *affections et mortalité, limitation du bien-être, modification des grandeurs physiologiques.*

Les données ont été regroupées sous forme d'un tableau explicite en fin de rapport.

Aucun nouvel effet sanitaire à des niveaux inférieurs à ceux de l'Icnirp n'a été prouvé. Néanmoins, certains effets sont considérés comme probables dans ce rapport pour des valeurs de DAS locaux compris entre entre 20 mW/kg et 2 W/kg, sans qu'un impact sanitaire clair ne soit établi. Cette observation concerne les téléphones mobiles et aussi les émetteurs radio pour lesquels : « une modification passagère ou durable du matériel génétique de certaines cellules est considérée comme possible, tout comme une altération de l'expression des gènes (…). Les implications de cette découverte pour les fonctions cellulaires ne sont actuellement pas claires ».

En observation humaine, aucun rapport, causal ou non, n'a pu être établi pour un grand nombre d'effets potentiellement délétères, tandis que pour d'autres la question reste entière.

Le rapport préconise de poursuivre et de vérifier les études expérimentales en utilisant des échantillons plus grands et plus sensibles.

Le problème des effets à long terme reste entier, et l'évaluation de l'exposition reste problématique pour les études de population. Sans qu'il soit possible d'argumenter sur la protection ou non conférée par les valeurs limites proposées par l'Icnirp (ou par l'ORNI en Suisse), il n'y a pas d'élément qui justifie leur évolution. Le principe de précaution en matière de rayonnement non ionisant doit donc être maintenu et l'effort dans les recherches soutenu.

5.2.1.5 Rapport 2008 du Programme de recherche allemand sur la téléphonie mobile (DMF)

Le programme DMF a été entrepris sous l'égide du bureau fédéral de radioprotection (BfS) entre 2002 et 2008. Les points mis en avant en sont :

- l'existence et l'étude des effets biologiques à des niveaux inférieurs aux valeurs limites pour vérifier leur adéquation à la prévention du risque ;
- les études épidémiologiques, en insistant sur la transparence et la consultation du public ;
- la communication du risque.

Ce programme de 17 M€ a été réparti sur 54 projets.

En termes de dosimétrie, l'accent a été mis sur le développement de méthodes de mesure et de calcul de l'exposition du public, notamment au quotidien, pour l'établissement de catégories d'exposition utilisables en épidémiologie. En général, les niveaux sont faibles sauf au contact, comme c'est le cas pour les stations de base de téléphonie mobile.

Pour observer des effets aigus et chroniques, les études sur cultures cellulaires visent la recherche de mécanismes d'action à des niveaux « athermiques », portant sur divers points comme la régulation hormonale, le métabolisme, les réactions cellulaires vis-à-vis des interactions extérieures, le système immunitaire et les systèmes acoustique et visuel. Ces études sont négatives à l'exception d'une observation de perturbation de l'expression génique sur un modèle de barrière hémato-encéphalique.

L'étude des effets sanitaires aigus est réalisée essentiellement par des essais cliniques centrés sur le sommeil, les troubles cognitifs, la mémoire, l'utilisation de l'information visuelle et acoustique. Aucune relation n'a été trouvée entre l'utilisation du téléphone mobile et des symptômes variés comme les maux de tête, les troubles du sommeil, ou la qualité de vie physique et mentale.

Les effets chroniques ont été étudiés essentiellement sur des modèles animaux. Ils concernent la BHE, l'induction de cancers, et les troubles de la reproduction et du développement. Aucun résultat positif n'a été identifié, en particulier pour les cancers du cerveau, les leucémies de l'enfant, les effets sur les stades précoces du développement. Néanmoins, la question des effets à long terme sur l'enfant par rapport à l'adulte reste d'actualité.

En conclusion, aucun argument favorable à la révision des valeurs limites n'a été identifié, mais le principe de précaution reste de rigueur pour ce rapport.

Implémentation d'une procédure d'identification des besoins et résultats du DMF

Des *forums* d'experts, puis divers *workshops*, colloques et conférences échelonnés entre 2001 et 2008 ont identifié les besoins en termes de recherche : mécanismes d'action, effets sur l'animal et l'homme, détermination de l'exposition et communication du risque. Des échanges *via* un portail internet descriptif ont également été mis en place, permettant une consultation publique avant la tenue du deuxième *workshop*.

Pour chaque rubrique, un état des lieux est présenté au début de l'étude, suivi des résultats et des points restant à traiter à la fin du projet DMF. Les résultats sont synthétisés par thématiques :

Effets aigus : parmi ces études, une étude croisée sur 30 000 adultes répartis sur l'Allemagne montre une perception différente selon la région (Nord / Sud), plus marquée en Bavière. Au contraire, aucune différence en termes d'hypersensibilité électromagnétique n'a été trouvée. Les champs ont été évalués selon la distance entre la tour d'émission, les conditions de géolocalisation et des mesures effectuées à domicile (lit) sur 1 808 sujets en différentes bandes (GSM, UMTS, TV, DECT, WLAN), et le contexte socio culturel estimé à l'aide de questionnaires.

Une étude de l'électroencéphalogramme (EEG) en laboratoire sur des volontaires, pour des niveaux de DAS en mode GSM ou UMTS allant jusqu'à 2 W/kg, n'a pas montré d'altération de l'EEG.

Une étude en double aveugle menée sur 10 localités (300 personnes) dans le voisinage de stations de base n'a pas pu mettre en évidence de perturbation de la qualité du sommeil ou de l'EEG.

Outre ces trois études, d'autres ont été analysées par le DMF. Dans l'ensemble, aucun lien n'a pu être établi entre l'EHS et l'exposition aux champs électromagnétiques. Par contre, les signes évoqués ont pu être rapprochés de l'existence d'un stress chronique, y compris dans les données biologiques ou les réponses aux questionnaires.

Perspectives : les études réalisées portent pour l'essentiel sur des hommes jeunes. Il faut viser des groupes différents : enfants, femmes, ou personnes souffrant de troubles du sommeil.

Mécanismes d'action : divers mécanismes d'action (études non répliquées) suggéreraient un effet génotoxique, une altération de l'expression génique ou du métabolisme cellulaire, pouvant

impliquer des mécanismes de stress cellulaire ou des radicaux libres oxygénés liés par exemple à la réduction du niveau de mélatonine. Les effets sur les systèmes auditif et visuel (température) sont aussi discutés, de même qu'une possible démodulation du signal par les membranes.

Résultats : aucun mécanisme entrainant un effet sur le système immunitaire, les ROS (*reactive oxygen species* – substances oxygénées réactives), les protéines de stress, et la BHE n'a été mis en évidence. Aucun effet neurophysiologique n'a été retrouvé sinon dans les limites normales de variation thermique (1°C / jour) pour des DAS pouva nt atteindre 20 W/kg.

Des essais de réplication de l'étude REFLEX sur fibroblastes humains n'ont pas confirmé ses résultats.

Ces observations ne justifient pas de mesures particulières de protection contre les radiofréquences. L'étude des effets génotoxiques pourrait néanmoins continuer en dehors du programme DMF.

Effets chroniques : Des effets chroniques sur la perméabilité de la BHE, l'incidence de divers cancers (sein, leucémies, cerveau, testicule, mélanomes uvéaux) avaient été évoqués, ainsi que des effets cardiovasculaires et l'induction possible de neurinomes de l'acoustique. Une crainte dominante porte sur les possibles effets à long terme chez l'enfant.

Barrière hémato-encéphalique (BHE) : aucun effet n'est retrouvé, aussi bien en exposition totale ou tête seule, ou encore dans les stades précoces du développement embryonnaire pour des niveaux d'exposition restant dans les limites actuelles. Une diminution de perméabilité à l'albumine a été retrouvée lors d'une exposition UMTS à 13 W/kg. L'observation inverse a également été notée dans un cas d'exposition répétée en mode GSM à 13 W/kg.

Il n'y a pas d'incidence sur l'apparition de lymphome, sur un modèle animal, pour des DAS de 0,4 W/kg à long terme. Les données (cas-contrôle) sur les mélanomes uvéaux ne permettent pas de conclure, pas plus que sur les leucémies de l'enfant proches des stations TV.

Une large étude de cohorte est souhaitable, focalisée en particulier sur l'enfant et les effets à long terme.

Dosimétrie : devant l'explosion des systèmes de communication et les nouveaux développements (DVB-T), l'augmentation de l'exposition globale peut être pressentie. En l'occurrence, l'existence d'effets néfastes peut être crainte du fait de l'impossibilité de mesurer les champs électromagnétiques dans les tissus vivants, et les sévères limitations rencontrées dans la réalisation de modèles numériques. De plus, les résultats obtenus en laboratoire ne sont pas directement transposables à l'homme.

Les résultats du DMF ont permis d'évaluer les niveaux *maximum* et réels d'exposition de la population générale dans les différentes bandes de fréquences, grâce à la mise au point de procédures de mesure et à l'amélioration des méthodes de calcul. Par la multiplication des points de mesure, l'estimation de l'élévation du niveau d'exposition est accessible. Du fait de la grande variabilité temporelle et spatiale des mesures, l'établissement d'un registre extensif d'exposition n'est pas soutenu par le BfS.

Des expositions proches des valeurs limites peuvent être atteintes au contact ou à proximité du téléphone, mais pas avec l'usage simultané de plusieurs appareils dans un espace restreint (transports en commun). Lors de l'usage de téléphones mobiles, une élévation locale de température de 3-5°C est possible au niveau de la p eau, mais elle n'excède pas 0,1°C dans les organes profonds de la tête ou du corps. L'étude DMF montre que la puissance maximale est atteinte durant 5 à 30 % du temps d'utilisation. La puissance est généralement moindre en zone urbaine.

Pour les autres types d'appareils, à usage domestique ou au bureau, l'exposition est généralement très faible (moins de 10 mW/kg pour WLAN ou *bluetooth* par exemple).

En terme de dosimétrie, des modèles complexes (animal, homme, enfant) ont été développés et, outre le DAS global, des notions de DAS *maximum* spatial, ou de DAS par organe sont à considérer.

En microdosimétrie, du fait de la conduction du cytoplasme, l'élévation de température au niveau des membranes semble insuffisante pour générer un effet sanitaire.

L'exposition individuelle est un point important pour les études épidémiologiques, c'est pourquoi des systèmes de dosimètres individuels doivent être développés.

Parmi les questions restées en suspens, on trouve les expositions partielles, en particulier professionnelles pour lesquelles des niveaux localement élevés peuvent exister, et la difficulté de prendre en compte les expositions multiples et complexes.

Communication du risque : Les connaissances du public relatives à la téléphonie mobile et l'absence d'identification des populations cibles ont conduit le DMF à mener des études dans le but d'assister les municipalités en termes de communication du risque lors de l'implantation d'antennes de téléphonie mobile.

En premier lieu, il s'agissait de constituer une base de données, régulièrement mise à jour, sur la perception du risque. L'analyse annuelle de ces données montre une constance dans l'implication du public, cette problématique arrivant derrière d'autres risques (UV, OGM, *etc*.), avec une attention plus marquée pour les antennes que pour les téléphones mobiles eux-mêmes.

La recherche montre l'importance de la qualité - plutôt que de la quantité - de l'information sur les mesures et sur les moyens possibles de réduire l'exposition, sans préjuger d'un lien de causalité entre exposition et effet sanitaire.

Au niveau des municipalités, le DMF a apporté une trame de coopération entre les différents acteurs, notamment à l'aide de sites internet à l'usage des collectivités (www.ratgeber-mobilfunk.de), ou de portail d'information et de réponses aux questions particulières (www.emf-portal.de)[89].

5.2.1.6 Rapport 2008 de la Commission de Radioprotection allemande (SSK : StrahlenschutzKommission)

A la demande du gouvernement fédéral, la SSK a procédé au début des années 2000 à une identification des problèmes non résolus à l'époque et fourni des pistes de recherches à développer. Entre 2002 et 2008, 54 projets ont été lancés en ce sens. L'évaluation actuelle de la SSK, portant sur 36 programmes déjà terminés, a abouti à ce rapport organisé en 4 axes principaux : biologie, épidémiologie, dosimétrie et communication du risque, avant d'identifier les avancées obtenues et les questions subsistantes.

Pour l'axe relatif à la biologie, les niveaux d'expositions ont été contrôlés et choisis de façon à se situer au-dessus ou au-dessous des restrictions de base pour le corps entier ou localement.

EHS : une étude cas-témoin utilisant des méthodes d'IRM fonctionnelle et de stimulation magnétique transcrânienne n'a montré qu'un défaut de traitement cortical de l'information, mais pas d'hypersensibilité. Les autres études, incluant des groupes de personnes se présentant elles mêmes comme EHS n'ont pas apporté de preuves concernant l'existence d'un lien de causalité entre exposition et problèmes de santé. La poursuite des études est suggérée.

Sommeil : des études de qualité de sommeil en comparaison avec des sujets témoins placés dans des cages de Faraday faradisés n'ont pas apporté d'élément convaincant. De même, aucun argument n'a été mis en évidence en faveur de la perturbation des fonctions cognitives ou de l'EEG, mais des études sont toujours en cours.

[89] Lors de l'audition, il est apparu que ce portail était très peu consulté.

Troubles sensitifs : *audition* : les expériences menées de façon chronique sur des rats après conditionnement par bruit fantôme en utilisant des signaux GSM 900, GMS 1800 et UMTS n'ont pas mis en évidence d'effet aux niveaux des valeurs limites d'exposition.
Vision : les expériences menées *in vitro* sur des rétines isolées de souris n'ont montré des effets que dans la mesure où les possibilités de thermorégulation étaient dépassées, mais sans liaison directe avec l'intensité du champ (action combinée de la lumière et du champ).

Interactions cellulaires : des effets divergents selon la puissance d'émission ont été obtenus sur la sécrétion de mélatonine par des glandes pinéales isolées de hamster, avec des possibilités d'effets thermiques. En revanche, l'étude n'a pas permis de conclure pour des effets sur la mélatonine. Des éléments en faveur de modifications *des communications cellulaires et de la fonction immunologique* ont été détectés, mais l'étude DMF n'étant pas close, aucune conclusion tranchée n'a été proposée en l'absence de réplication indépendante. Les résultats de Repacholi sur des lymphomes de rats n'ont pas été retrouvés, cette hypothèse a de fait été considérée comme fragilisée.
Aucun effet sur la reproduction ni sur le développement embryonnaire n'a été observé.

La question des enfants reste posée, et les prochaines études devront être couplées avec un contrôle prioritaire de la dosimétrie.

Pour l'axe relatif à l'épidémiologie, 9 études déjà achevées ont été analysées, incluant la (non) faisabilité d'une étude cohorte sur des personnes hautement exposées aux téléphones mobiles, une étude cas-témoin à long terme sur les mélanomes de la choroïde, une étude prospective de type cohorte (protocole COSMOS) sur l'utilisation du téléphone mobile, une extension de l'étude Interphone allemande, et une étude croisée sur les problèmes posés par l'utilisation du téléphone mobile et les stations de base. Il en ressort que la portée des études épidémiologiques sur les effets à long terme est limitée par le faible recul dans le temps par rapport à l'utilisation des téléphones. Du fait de l'explosion technologique, la variabilité des *scenarii* possibles d'exposition rend la classification dosimétrique et l'interprétation des résultats très délicate.

En termes de mesure d'exposition, les puissances émises, même au niveau *maximum*, n'excèdent que rarement quelques centièmes des niveaux de référence. Cependant, considérant le passage au DVB-T, la puissance d'émission n'est pas forcément diminuée et doit être surveillée[90].

Pour les utilisateurs de WLAN, DECT, veille-bébés ou *bluetooth*, il peut arriver que les niveaux de référence soient dépassés, sans toutefois que les restrictions de base ne soient pas respectées.

L'estimation de l'exposition pour les études épidémiologiques a fait l'objet de la mise au point d'un protocole tenant compte de données techniques, géographiques, de facteurs de transmission empiriques, etc. qui ne donnent pour le moment que des résultats limités, à confronter avec ceux du programme anglais.

Distribution du DAS dans le corps : l'alliance des simulations sur modèle inhomogène anatomique, par comparaison avec des mesures sur cadavres d'animaux, ont permis de préciser l'importance de facteurs (orientation, localisation, polarisation, *etc*) sur le DAS, entre 450 MHz et 5 GHz. Les études réalisées sur fantômes hétérogènes, en exposition locale, indiquent la possibilité de « points chauds ».

Dans tous les modèles intégrant la dissipation de la chaleur, aucune augmentation de température n'a excédé 0,8°C (WLAN, DECT, GSM, UMTS), atteignan t 2,5°C dans des modèles non dissipatifs non réalistes. De façon similaire, aucune élévation supérieure à 0,1°C n'a « été retrouvée dans les

[90] Lors de son audition R. Matthes a expliqué que le passage à la TV numérique allait diminuer le niveau d'exposition cependant, de façon transitoire pendant la période de coexistence des deux systèmes, une augmentation des niveaux d'exposition a été constatée.

différents systèmes, sauf pour un *talkie-walkie* de forte puissance (à 40 MHz) appliqué directement face à l'œil (1℃) ».

En termes de communication du risque, les mesures prises comprennent la création d'un portail ouvert associé à une banque de données, et la création d'un site d'aide à la décision destiné aux municipalités désireuses d'implanter une station.

Ce projet vise à maintenir l'information du public même en situation conflictuelle, en considérant que chaque situation est unique. A cet effet, des analyses de médias et de cas particuliers sont utilisés par l'association des opérateurs de téléphonie mobile – MOA - en s'appuyant sur la méthode dite des « feux de circulation »[91].

Les méthodes reposant sur le dialogue donnent des résultats intéressants mais encore difficilement exploitables.

Les sources de craintes sont plutôt les stations de base que les téléphones mobiles, et portent essentiellement sur les risques de cancer.

De l'approche multifactorielle incluant discussions, méta-analyses, connaissances empiriques, perception du message, il ressort que le message diffère selon la position initiale de l'interlocuteur, que ceux qui n'ont pas d'opinion préconstruite sont plus réceptifs aux messages complets, limpides et exhaustifs («*all clear* ») qu'aux avertissements, et qu'il existe bien des lacunes dans la connaissance du public vis à vis des stations de base et des téléphones mobiles.

Résultats marquants

Par rapport aux tâches initialement fixées, le groupe a ajouté l'exploitation de la perception du risque et l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques (EHS).

Quels que soient les résultats et le sérieux des études, des réplications sont à prévoir.

Biologie : un lien entre exposition et syndrome EHS n'a pas été retenu, du fait de l'imprécision du syndrome, de la difficulté d'obtenir des groupes exploitables, *etc*. Néanmoins, la recherche doit se poursuivre en ce sens en l'absence de réponse ferme[92].

Pas d'effet sur la vue, l'ouïe, le développement fœtal ni la durée de vie. Néanmoins, la recherche sur l'enfant doit être poursuivie, incluant notamment des modèles adaptés et une sélection par âge. Aucun résultat d'étude cellulaire ne soutient l'existence d'effet cancérogène ou génotoxique, ou la production de radicaux libres oxygénés. L'effort devrait porter sur la mise en évidence de points chauds ou d'effets spécifiques des émissions impulsionnelles.

Epidémiologie (contribution Interphone) : pas d'effet identifié sur les tumeurs cérébrales (téléphones mobiles) ni sur les cancers, en particulier pour les systèmes DECT, mais les études ne sont pas closes et le recul temporel est insuffisant.

Mesure d'exposition : la notion de distance n'est pas suffisante pour rendre compte du niveau d'exposition. Des méthodes tenant compte de l'orientation par rapport aux sources ont été mises au point. La non-obtention d'une mesure correcte est source d'erreurs, en particulier de catégorisation. Les niveaux sont généralement largement en deçà des valeurs limites, même en condition de blindage partiel (intérieur). Des valeurs excédant les valeurs limites peuvent être obtenues pour certains téléphones mobiles et veille-bébés au contact, ou face à une structure

[91] La méthode des « feux de circulation » est une méthode de gestion en 3 zones : le rouge est une interdiction ; l'orange une action et le vert une autorisation.

[92] Lors de son audition, R. Matthes (BfS, coordinateur du DMF) a indiqué que la position actuelle est qu'il n'est pas nécessaire de poursuivre les études sur le lien entre exposition et syndrome EHS. Des études pourraient par contre se pencher sur le suivi de personnes EHS afin de voir à quel moment ce syndrome se met en place, son évolution et quand et comment les signes disparaissent.

réfléchissante. Le passage de l'environnement TV analogique à la DVB-T devra être analysé. Des règles de dosimétrie ont *a priori* été envisagées.

Dans l'avenir, les budgets de recherche ne devront plus être totalement consacrés aux mesures des champs émis par les sources.

Communication du risque : malgré les efforts du programme DMF, la communication du risque n'a pas connu une grande amélioration, même avec l'aide à la décision en ligne, la communication de résultats, etc.

En termes de questions sans réponse et perspectives de recherche, les points soulignés sont :

- les effets non thermiques (génotoxicité), ou les effets à long terme ;
- la mesure de l'exposition pour les champs variables et/ou inhomogènes ;
- les effets sur le fœtus et l'enfant, la cognition[93] et le bien-être ;
- le manque de recul pour l'obtention et l'interprétation de certaines données épidémiologiques ;
- les travaux sur les tumeurs cérébrales devront être poursuivis en fonction des résultats définitifs d'Interphone.

Sont également à envisager :

- les nouvelles technologies (DECT, TETRA, 4G, RFID, *etc*.) ;
- des modèles plus spécifiques adaptés à la femme enceinte ou à l'enfant ;
- la position du sujet.

En termes de communication du risque, des questionnaires ou abords qualitatifs ne sont pas suffisants ; il faudra répondre aux questions suivantes :

- quels facteurs amènent à une perception accrue du risque ?
- Quels sont les effets de la communication sur les incertitudes ou les précautions ?
- Comment faire participer le public de façon utile ?
- Comment communiquer en présence d'informations et d'opinions contradictoires ?

Conclusions

Ce rapport ne présente pas de contradiction avec d'autres instances (OMS, Icnirp). Aucune conclusion définitive n'est établie à partir d'une étude prise isolément.

La SSK souligne le besoin d'envisager les nouvelles technologies et de constituer une synthèse détaillée fondée sur les résultats du programme DMF.

5.2.2 Rapports d'experts

5.2.2.1 Rapport irlandais 2007 du Groupe d'Experts sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques (*Expert Group on Health Effects of Electromagnetic Fields*)

Ce rapport est présenté sous forme de paragraphes traitant des questions particulières sortant du cadre des radiofréquences, c'est-à-dire couvrant des fréquences allant des champs statiques aux

[93] Par étude de la cognition, il faut entendre ici les études des grandes fonctions mentales que sont la mémoire, l'attention, le langage, la représentation de l'espace et du corps, les praxis, la résolution de problèmes et d'une manière générale, le traitement de l'information, de préférence en relation avec leurs substrats cérébraux.

lasers et ultra-violets. Chaque paragraphe est articulé sous forme de question / réponse / information générale, puis d'une revue scientifique par type d'exposition.

Concernant les radiofréquences, les bases thermiques des effets sont rappelées et rattachées aux effets biologiques observés. Cette partie résume les conclusions du rapport de l'Icnirp qui sert de référence.

Les experts ne retiennent pas l'existence d'un risque sanitaire des nouvelles technologies sans fil, (GSM, UMTS, TETRA).

Cependant, les niveaux d'émission *maximum* des bases TETRA peuvent dépasser les valeurs limites. Les systèmes WLAN, Wi-Fi, DECT et RFID sont de faible puissance et de courte portée. Ils bénéficient des connaissances acquises pour les GSM.

Le cadre nosologique proposé par l'OMS, sous le terme d'intolérance environnementale idiopathique (IEI, *idiopatic environmental intolerance*), est repris pour décrire l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques. Cette désignation regroupe un certain nombre de manifestations fonctionnelles réelles, qui ne sont pas directement rattachables aux champs électromagnétiques (OMS *workshop,* Prague, 2004). Le rapport recommande que ces signes soient traités en tant que tels, indépendamment de l'exposition aux champs.

De même, le groupe d'experts reprend les conclusions de l'OMS (Istanbul 2004) concernant l'exposition des enfants. Même en l'absence de risque avéré, elles sont en faveur de l'application du principe de précaution. Il existe un besoin essentiel de recherches relatif à l'importance relative du risque de surmorbidité dû aux leucémies de l'enfant.

Le rapport présente également les conclusions générales de l'OMS (2002) relatives à la communication sur le risque. De nombreux facteurs sont identifiés dans la perception du risque : le fait que l'exposition à la nuisance soit volontaire ou non, la nature (gravité) du risque et/ou sa probabilité d'occurrence, sa survenue en situation familière ou non, l'existence d'un contrôle possible sur ce risque, l'existence d'information fiable. Sur cette base, le rapport présente les conclusions de l'OMS (2002)

5.2.2.2 Rapport 2007 du Comité Scientifique des Risques Sanitaires Emergents et Nouveaux de la Commission Européenne : *Scientific committee on emerging and newly identified risks* (SCENHIR)

Trois comités indépendants sont à l'origine de ce document : le *Scientific Committee on Consumer Products* (SCCP), le *Scientific Committee on Health and Environmental Risks* (SCHER) et le *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks* (SCENIHR), en relation avec l'*European Food Safety Authority* (EFSA), l'*European Medicines Evaluation Agency* (EMEA), l'*European Centre for Disease Prevention and* Control (ECDC) et l'*European Chemicals Agency* (ECHA).

Dans ce cadre, le comité scientifique a établi une mise à jour des effets sanitaires possibles des champs électromagnétiques, à partir des publications scientifiques en langue anglaise parues dans des revues à comité de lecture. Le rapport a subdivisé l'étude selon les bandes de fréquences suivantes : radiofréquences (RF) (100 kHz < f ≤ 300 GHz), fréquences intermédiaires (FI) (300 Hz < f ≤ 100 kHz), très basses fréquences (TBF) (0 Hz < f ≤ 300 Hz), et champs statiques (0 Hz). Une section spéciale est dévolue aux aspects environnementaux.

Dans le domaine des radiofréquences (RF), aucun effet biologique n'a pu être mis en évidence pour des niveaux inférieurs aux limites fixées par l'Icnirp (CPRNI 1998), depuis le rapport précédent (2001), et ce malgré les recherches effectuées sur les effets sanitaires possibles (*in vivo*, *in vitro* et épidémiologiques). Mais la portée de ces conclusions est limitée par l'absence de recul sur les effets à long terme de l'exposition à ces rayonnements. Dans ce cadre se situent les possibles effets cancérigènes, élémentaires (*Heat shock proteins*-HSP - radicaux libres, *etc*.), les symptômes divers (EHS), les effets sur la reproduction et le développement, et les effets sur les

enfants. L'absence d'effet *infra* thermique identifié ne dispense pas la poursuite d'études, notamment à la recherche d'autres mécanismes élémentaires, physiques ou biologiques.

Les données actuelles sont insuffisantes, aussi bien pour qualifier la sensibilité des différentes espèces que pour déterminer si les limitations environnementales sont similaires à celles employées pour la protection humaine.

En conclusion, en-deçà des valeurs limites de l'Icnirp, aucun effet sanitaire des radiofréquences n'est démontré, mais des études sur des effets à long terme sont nécessaires.

Ce rapport propose des orientations de recherche : le développement d'études de cohorte à long terme, l'amélioration de l'évaluation de l'exposition des enfants ; l'évaluation de la répartition des niveaux d'exposition au sein des populations et la réalisation d'études de réplication.

Les auteurs notent l'importance de considérer les émissions multifréquences et/ou leurs associations avec d'autres sources potentielles de risque.

Dans la mise à jour 2009 de la rubrique radiofréquences, il est noté que, aussi bien de sources expérimentales animales et *in vitro* qu'épidémiologiques, il paraît peu probable que l'exposition aux radiofréquences puisse accroître le risque de cancers. Cependant, du fait du faible recul en matière de temps d'exposition aux téléphones mobiles et au vu du délai d'apparition de certains cancers, des études à long terme doivent être suivies.

Par ailleurs, il n'y a pas d'explication aux symptômes subjectifs rapportés par les personnes sensibles à l'exposition aux radiofréquences. Si des perturbations de l'EEG ou du sommeil chez certains patients ont été relevées, il n'y a pas, à l'heure actuelle, de support mécanistique identifié. En l'absence actuelle de preuve (fonctions sensitives, cognitives, structure, réponses cellulaires, *etc*.), il y a lieu de poursuivre les études.

Aucune étude récente ne montre d'effet sur la reproduction ou le développement fœtal.

En termes d'évaluation du risque, les connaissances sur l'enfant sont toujours très limitées ; il existe de plus un manque réel d'information.

5.2.2.3 Rapport 2008 de l'Administration de l'alimentation et des médicaments sur la sécurité des radiofréquences : *Foods and drugs administration / Federal communications commission* (FDA / FCC)

Ce rapport d'information américain public[94], mis à jour régulièrement par l'OET (*Office of engineering and technology*) traite, sous forme de paragraphes courts, des questions portant sur les radiofréquences (RF) au sens large, c'est-à-dire aussi bien les émissions TV-FM, les radios amateurs, les téléphones mobiles et les antennes-relais associées, le Wi-Fi, sous l'angle de possibles effets néfastes, que de métrologie, de compatibilité électromagnétique ou de réglementations et contrôles fédéraux. Il renvoie en référence aux sites internet internationaux (Icnirp, IEEE, OMS, NCRP, Bioelectromagnetics) d'où il tire ses conclusions.

Pour les téléphones mobiles, les conclusions sont les mêmes (mise à part la considération d'exposition partielle moyennée : l'évaluation du DAS portant sur une quantité de matière de 1 g (IEEE) ou 10 g (Icnirp)), à savoir que si risque il y a, il devrait être minime. L'utilisation de systèmes mains-libres supprime le risque, et les systèmes *bluetooth* (par exemple) sont peu susceptibles de produire des effets délétères, du fait du niveau de puissance émis très faible. Les niveaux de champ rencontrés au pied des stations de base sont négligeables sauf accident en proximité directe (toit de maison).

Pour la radio-FM et la TV, malgré l'étendue de la gamme de puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE), de quelques W à quelques centaines de kW, et la présence dans ces fréquences de résonances dimensionnelles individuelles, les niveaux relevés à proximité des

94 http//ftp.fcc.gov.oet/rfsafety/rf-faqs.html

stations sont inférieurs aux valeurs limites, notamment du fait de l'orientation des émetteurs « vers l'horizon ».

Les systèmes de communication mobiles professionnels (police, pompiers) opèrent dans la gamme 30 - 1 000 MHz. Les niveaux d'énergie sont dépendants des systèmes : stations de base (haute puissance, mais inaccessibles et en émission intermittente), appareils sur véhicules (de puissance inférieure, encore diminuée par le partage du temps entre questions et réponses contrairement aux téléphones mobiles), ou *talkie-walkie* de puissance minime et en émission intermittente, à distance de la tête. De ces considérations, résulte l'improbabilité de dépasser les limites de sécurité.

Les systèmes de réception (parabole TV) par satellite ou TNT opèrent avec une grande directivité, et uniquement en réception, et ne posent pas de problème d'exposition (sauf pour les bases d'émission dont l'accès est restreint aux professionnels, qui disposent de consignes de sécurité spécifiques).

Pour les radio amateurs, il existe des restrictions de puissance d'émissions. Les puissances réellement utilisées sont généralement faibles, intermittentes (partage du temps émission-réception), et les antennes inaccessibles. Le problème de surexposition n'est pas réel.

5.2.2.4 Rapport de l'Autorité Suédoise de Radio-Protection (SRPA) *Recent Research on EMF and Health Risks*

Le rapport, publié en 2008, examine les 4 domaines des champs électromagnétiques : champs statiques, extrêmement basses fréquences (TBF), fréquences intermédiaires (FI), et enfin les radiofréquences (RF) qui concernent la téléphonie mobile.

Sur ce dernier point, le rapport conclut que les études fondamentales récentes, effectuées dans de meilleures conditions de dosimétrie, ne permettent pas de répliquer les effets positifs observés dans les études plus anciennes :

- sur des cellules isolées : neurones, production de radicaux libres, effets génotoxiques ou apotpose, expression génique , immunité, fonctions cellulaires et taux d'ODC, *etc*.,
- sur des études animales : carcinogénèse, genotoxicité, système nerveux,
- sur l'homme : neurophysiologie, activité électrique cérébrale, sommeil, fonctions cognitives, syndromes subjectifs, paramètres cardiovasculaires, *etc*.

Peu d'éléments nouveaux sur l'association entre risque de tumeurs cérébrales et téléphonie mobile ont été publiés au cours de la dernière année. Le rapport (en suédois) est consultable sur le site http://www.ssi.se/ssi_rapporter/pdf/ssi_rapp_2008_12.pdf

5.2.2.5 Rapport 2008 de l'Académie Nationale des Sciences américaine sur l'identification des besoins de recherche liés aux éventuels effets biologiques ou sanitaires des appareils de communication sans fil : Conseil National de Recherche (*National Research Council*).

www.nap.edu/catalog/12036.html

Ce rapport s'intéresse surtout à l'identification des carences dans le domaine de la connaissance des risques et des orientations de recherches à développer. Les résultats présentés proviennent des conclusions du *workshop* organisé par l'académie des sciences, à la demande de la *Food and drug aministration* (FDA) et du Département de la santé : *health and human service* (HHS). Selon l'ordre d'apparition dans le compte–rendu, il s'agit de :

- caractériser l'exposition des enfants et des femmes enceintes par les communications sans fil et les stations de base ;
- caractériser l'exposition individuelle et les émissions provenant de stations de base multiservices ;

- caractériser la dosimétrie des nouvelles configurations d'antennes correspondant aux communications sans fil et aux messages-textes ;
- prévoir une étude épidémiologique de cohorte prospective sur les enfants et les femmes enceintes ;
- prévoir une étude épidémiologique cas-témoins sur les cancers de l'enfant, incluant les tumeurs cérébrales ;
- réaliser des études humaines de laboratoire portant notamment sur l'EEG et incluant un nombre suffisant de sujets, dans un but de réplication dans des conditions plus rigoureuses et avec des effectifs plus importants des études précédentes ;
- étudier l'impact des radiofréquences sur les réseaux neuronaux ;
- obtenir une dosimétrie au niveau microscopique, afin de pouvoir caractériser l'exposition au niveau cellulaire (études *in vitro*) ;
- poursuivre les recherches expérimentales axées sur les aspects biophysiques, biochimiques et moléculaires des effets des radiofréquences.

Toutes ces questions insuffisamment exploitées peuvent être regroupées en quatre domaines : i) dosimétrie-exposition, ii) épidémiologie, iii) études humaines iv) études expérimentales, humaines-animales-cellulaires et mécanistiques.

Dosimétrie exposition : il conviendrait de considérer le rôle de de la taille dans l'estimation du DAS, le rôle de la localisation et l'évaluation de DAS locaux possiblement élevés ;

Epidémiologie : il existe un besoin de réaliser des études de cohortes prospectives avec de larges effectifs, et d'autres portant sur l'exposition professionnelle à niveau moyen ou élevé. Des études extensives cas-témoins sur les tumeurs cérébrales infantiles sont à mener, en insistant sur l'importance de la connaissance de l'exposition. L'étude des pathologies rares et l'observation de signes subjectifs apparaissent d'un intérêt moindre. De nombreux biais et insuffisances ont été identifiés dans les études précédentes, et les résultats d'Interphone sont toujours en attente.

Etudes humaines : neurophysiologie (EEG) : les besoins de recherches identifiés concernent les performances cognitives et les effets possibles à long terme. Les interactions avec les implants cochléaires et les appareils auditifs pourraient être étudiées.

Aspects expérimentaux : les études doivent viser la compréhension des mécanismes : études de réseaux neuronaux et de connaissance de l'exposition au niveau microscopique ; développement de modèles non linéaires qui pourraient rendre compte d'effets de démodulation locale ; les aspects de transports transmembranaires, ioniques ou moléculaires (dénaturation de canaux, changement de conformation enzymatique par électrocouplage, création de pores temporaires, *etc*.), ou de stimulation à bas niveau d'exposition de thermorécepteur, restent mal connus.

In vivo / in vitro : les effets biophysiques, biochimiques et moléculaires des radiofréquences doivent être déterminés. En particulier, il existe un besoin de poursuivre les recherches sur l'oncogénicité, la toxicologie génétique, par exemple en utilisant des animaux génétiquement modifiés et en exploitant les bases de données existantes.

Cancer : différents axes sont à préciser, comme les effets sur le système immunitaire, l'endocrinologie, la prolifération cellulaire, l'expression génique, etc.

Autres : les connaissances manquent sur les effets sur le développement fœtal et néonatal, les rapports structure-fonction au sein du système immunitaire et le système nerveux (BHE).

5.2.2.6 *National Collaborating Center for Environmental Health* / Centre de Collaboration Nationale en Santé Environnementale (Canada)

Le NCCEH, un des centres de l'Agence de Santé Publique du Canada, a publié en septembre 2008 une étude des relations entre l'utilisation du téléphone mobile et le risque de tumeurs intracrâniennes : gliomes, méningiomes et neurinomes de l'acoustique. Ce rapport est basé sur 3 méta-analyses récentes (Lahkola *et al.*, 2006 ; Kan *et al.*, 2008 et Hardell *et al.*, 2008), et, pour les

gliomes et les neurinomes de l'acoustique, sur les résultats de l'étude conjointe cas-témoins Interphone dans 5 pays d'Europe du Nord (Lahkola *et al.*, 2007 ; Schoemaker *et al.*, 2005).

La conclusion de cette revue est qu'il n'existe pas de preuve suffisante pour indiquer une association causale entre l'utilisation du téléphone mobile et les tumeurs intracrâniennes. Il existe un faible niveau de preuve soutenant une augmentation de risque de gliome, de neurinome de l'acoustique et de méningiome chez les adultes associée à l'utilisation régulière ipsilatérale pendant 10 ans et plus. Les résultats existants sont suggestifs mais préliminaires, car basés sur peu d'études avec un petit nombre de cas et des biais potentiels.

Ce rapport mentionne qu'étant donné les taux d'incidence faibles et stables ou déclinants des cancers du cerveau au Canada, une éventuelle augmentation de risque attribuable à l'utilisation de téléphone mobile est très faible.

Dans le même ordre d'idées, l'incidence des gliomes est stable chez la femme et en diminution chez l'homme depuis le début des années 1980 en Suède (Engholm *et al.*, 2008)

5.3 Autres rapports

5.3.1 BioInitiative[95]

Le rapport BioInitiative a été analysé par le groupe de travail, en raison de son importante diffusion, mais aussi pour tenir comte des préoccupations de la société civile exprimées lors des auditions des associations (APE, Criirem, Priartém, RdT) et des récentes décisions judiciaires ayant fait référence à ce rapport.

Le rapport intitulé "*BioInitiative: A rationale for a biologically-based exposure standard for electromagnetic radiation*" et publié sur Internet fin août 2007 est un recueil d'articles indépendants, écrits par un ou plusieurs auteurs des Etats-unis, d'Europe (Suède, Danemark, Grande-Bretagne) et de Chine. Il n'est donc pas issu d'une expertise collective au sens du présent rapport.

Ce rapport est édité par David Carpenter, Directeur de l'*Institute for Health and the Environment* (Institut pour la Santé et l'Environnement) de l'Université d'Albany (New York) et par Cindy Sage, propriétaire de *Sage EMF Design*, une division de *Sage Associates*, entreprise de consultance, spécialisée dans l'étude des environnements électromagnétiques et qui propose des solutions commerciales pour atténuer ou protéger contre les champs électromagnétiques (www.sageassociates.net).

Plusieurs chapitres du rapport ont été rédigés par Cindy Sage, notamment le résumé grand public, ou en collaboration avec l'autre éditeur du rapport, le Dr. David Carpenter, comme pour les conclusions et recommandations de politiques de santé publique.

Ce volumineux rapport (environ 600 pages et 20 sections) porte à la fois sur les champs électromagnétiques de très basse fréquence (50-60 Hz) et sur ceux associés aux radiofréquences comme celles utilisées dans la téléphonie mobile. Alors qu'il s'agit de domaines d'exposition et de mécanismes d'action différents, les conclusions présentées sur les effets sanitaires possibles ne permettent pas de faire cette distinction.

Plusieurs contributions s'appuient sur des travaux publiés dans des revues à comité de lecture, lesquels ont fait l'objet d'une analyse soit dans le chapitre 4 du présent rapport consacré aux impacts sanitaires des radiofréquences, soit dans le précédent rapport de l'Afsset relatif à la téléphonie mobile.

[95] http://bioinitiative.org/

La principale conclusion du rapport BioInitiative est que les valeurs limites actuelles d'exposition aux rayonnements électromagnétiques, fondées sur les recommandations d'organisations internationales telles que l'*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (Icnirp : Commission Internationale pour la Protection Contre les Rayonnements Non-Ionisants), sont inadéquates et doivent être révisées à la baisse. Le rapport plaide pour le développement de nouvelles valeurs limites prenant en compte non plus les effets thermiques mais d'autres effets biologiques. Lors de son audition, Michael Kundi – l'un des auteurs de chapitres – a indiqué que « […] *le rapport propose une valeur limite, allant au-delà de ce que les scientifiques auteurs auraient eux-mêmes pu avancer* […] ».

Le rapport BioInitiative n'est pas une expertise collective au sens où l'Afsset, l'Inserm ou le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) pour ses Monographies et Rapports la pratiquent depuis des années. Dans ce modèle, un groupe d'experts rédige un rapport ou une évaluation et en adopte collectivement le texte avec mention des éventuelles positions minoritaires. Dans le rapport BioInitiative, chaque chapitre a été rédigé par un ou plusieurs auteurs et la préface mentionne clairement que l'information et les conclusions de chaque chapitre sont sous la responsabilité de ses auteurs. Par ailleurs, rien n'indique que la version finale du document, et notamment sa conclusion, aient été soumises pour approbation à l'ensemble des auteurs. Les auditions de Lennart Hardell, d'Olle Johansson et de Michael Kundi, respectivement les 7 mai, 27 mai et 8 juin 2009, confirment ce point, qui par ailleurs a été clarifié par Cindy Sage lors du symposium « champs électromagnétiques et santé » (Bruxelles, février 2009)[96]. Tout au plus relève-t-on dans les remerciements, la mention de « *International Conference calls for the BioInitiative Working Group*».

Les conclusions du rapport et le résumé pour le public sont donc à considérer comme le reflet des opinions des seuls éditeurs du rapport. Sur de nombreux points, ces conclusions sont plus affirmatives que celles de chacun des chapitres qui composent le rapport. Ainsi, dans sa conclusion sur les effets génotoxiques, le Dr. Henry Lai (chapitre 6) conclut que seulement 50 % des études ont montré des effets et que dans certaines conditions d'exposition, les radiofréquences sont génotoxiques. Il précise toutefois qu'à une exception près, ceci vaut pour l'exposition aux rayonnements émis par un téléphone mobile, et non pour les radiofréquences à des niveaux tels que ceux que l'on peut rencontrer au voisinage des stations de base et des relais de transmission radiofréquences. A l'inverse, la synthèse conclut que « l'exposition aux champs électromagnétiques basse fréquence et radiofréquences peut être considérée comme génotoxique (dommage de l'ADN) dans certaines conditions d'exposition, dont celles à des niveaux d'exposition inférieurs aux limites actuelles. »

> Electrophysiologie (39 références) : *« Les études sur l'EEG et les potentiels évoqués chez des humains exposés à des radiations de téléphone cellulaire ont surtout donné des effets positifs ».*
>
> Fonctions cognitives (23 références) *« une majorité d'études (13/23) a montré que l'exposition aux téléphones cellulaires pourrait affecter les fonctions cognitives et les performances dans différentes tâches comportementales. Il est intéressant de noter que la plupart des études ont montré une facilitation et une amélioration des performances. Seules les études de Cao et al. (2000), Maier et al. (2004) et Eliyaku et al. (2006) ont rapporté un déficit des performances. »*

96 Informations relatives au symposium sur le site de la Commission Européenne : http://ec.europa.eu/health/ph_risk/ev_20090211_en.htm

> Effets subjectifs chez l'homme (15 références) : *« Les symptômes qui ont été rapportés incluent : des interruptions du sommeil et des insomnies, de la fatigue, des maux de tête, des pertes de mémoire et de la confusion, des vertiges, de la désorientation spatiale et des malaises. Cependant, aucun de ces effets n'a été étudié dans des conditions de laboratoires contrôlées. Aussi, s'ils sont reliés causalement à l'exposition aux RF est inconnu. »*

Les différents chapitres du rapport sont de rédaction et de qualité inégales. Certains articles ne présentent pas les données scientifiques disponibles de manière équilibrée, n'analysent pas la qualité des articles cités ou reflètent les opinions ou convictions personnelles de leurs auteurs.

Ainsi, par exemple, le chapitre 13 qui traite de la « promotion » des cancers du sein par les champs électromagnétiques, n'est qu'une liste de références mélangeant des études expérimentales *in vitro* et *in vivo* et des études épidémiologiques (incidence et mortalité). Le rôle protecteur de la mélatonine, qui est pourtant l'objet de débats, y est considéré comme acquis, mais nombre des références indiquées sont soit des *abstracts* de congrès (et non des publications dans des revues à comité de lecture), soit incomplètes, soit même erronées.

Autre exemple, dans le chapitre 7 qui traite des réponses de stress, il est indiqué que le promoteur du gène de la protéine de stress hsp70 humaine comporte des séquences qui répondent aux champs électromagnétiques (nCTCTn) différentes des séquences nGAAn qui répondent aux *stimuli* thermiques. L'existence de ces deux éléments serait ainsi un marqueur moléculaire de voies de réponses différentes pour les *stimuli* thermiques et non-thermiques. Or, la lecture des publications originales indique que « l'élément de réponse au choc thermique […] est requis pour l'induction de l'expression du gène HSP70 par des champs magnétiques ». (Lin H, Blank M, Goodman R. J Cell Biochem. 1999;75:170-6). Il n'est pas fait mention des deux publications de Morehouse et Owen indiquant l'absence d'induction de HSP70 et de c-myc par des champs électromagnétiques, publications parues dans Radiation Research. Les auteurs mettent en doute l'impartialité de cette revue qui n'aurait publié presque que des études ne montrant pas d'effets des champs électromagnétiques.

Dans certains chapitres du rapport Bioinitiative, la revue de la littérature peut être orientée vers certains types de publications (résultats positifs) plutôt que d'autres. Par exemple, le chapitre 10, écrit par Lennart Hardell, Kjell Hansson Mild et Mikael Kundi, qui présente une revue de la littérature des études épidémiologiques portant sur l'utilisation de téléphone mobile et le risque de tumeur cérébrale ou de neurinome du nerf acoustique. La présentation des études est partielle et orientée vers les résultats montrant une augmentation de risque comme pour l'étude de Lönn (2004) où le résultat principal, absence de risque OR = 1,0 [IC 95 % : 0,6 - 1,5], n'est pas mentionné. Ainsi, la majorité des descriptions faites par Hardell *et al.* des études épidémiologiques concernent des analyses réalisées en sous-groupes. Les auteurs donnent également le même poids à des études individuelles comme aux ré-analyses ou aux mises à jour des études. Ceci tend à donner une présentation plus insistante des résultats de certaines études. Les auteurs ne citent pas non plus les deux autres méta-analyses déjà réalisées dans le domaine (Lahkola, Kan), même si aucune de ces méta-analyses, celle d'Hardell incluse, ne respecte les *minima* d'analyses statistiques pour ce type d'étude (*cf.* chapitre 4.1.3). Enfin, les auteurs ne présentent aucune discussion des biais potentiels des différentes études observationelles. Ils mentionnent que le fait que dans certaines études les OR sont inférieurs à 1 est un indicateur de sérieux problèmes méthodologiques : "*Furthermore, most ORs were < 1.0 indicating serious methodological problems in the studies*". Cette assertion constitue une manière erronée de déconsidérer toute étude présentant un résultat dont l'OR est inférieur à 1. Il s'agit d'une négation de l'aléa statistique inhérent à toute étude épidémiologique. Ne pas considérer qu'un OR puisse être inférieur à 1, revient à dire *a priori* que l'hypothèse d'effet protecteur n'est pas plausible. Par ailleurs, il est indispensable de considérer l'ensemble des résultats (OR < 1, OR < 1 ou OR = 1). Cet *a priori* faux que posent les auteurs, revient à ne s'intéresser qu'aux études positives, ce qui constitue un biais majeur dans une revue de littérature d'études épidémiologiques.

Le rapport BioInitiative doit donc être lu avec prudence : il revêt des conflits d'intérêts dans plusieurs chapitres, ne correspond pas à une expertise collective, est de qualité inégale selon les chapitres et est écrit sur un registre militant.

Plusieurs groupes d'experts indépendants ou organismes officiels ont publié récemment des analyses du rapport BioInitiative :

- *EMF-Net*

Le réseau EMF-Net, action de coordination financée par le 6ème Programme Cadre Européen pour l'étude des effets de l'exposition aux champs électromagnétiques, a publié dès octobre 2007 ses commentaires sur le rapport BioInitiative. Ses principales conclusions sont :

- « le résumé pour le public est écrit en termes alarmistes et émotionnels et ses arguments n'ont pas de support scientifique provenant d'une recherche bien conduite »,
- « il y a un manque d'équilibre dans le rapport, en fait aucune mention n'est faite des rapports qui ne concordent pas avec les déclarations et les conclusions des auteurs. Les résultats et les conclusions sont très différents de ceux de revues nationales et internationales sur ce sujet ».
- « si ce rapport devait être cru, les champs électromagnétiques seraient la cause de toute une série de maladies et d'effets subjectifs (…). Aucun de ces effets sur la santé n'a été considéré comme établi par aucune des revues nationales ou internationales qui ont évalué les effets biologiques et sur la santé des expositions au-dessous des limites de champs électromagnétiques internationalement acceptées lorsque l'ensemble de la littérature scientifique est évaluée selon les méthodes d'évaluation de risque et les critères internationaux bien acceptés »

- *Danish National Board of Health (4 octobre 2007)*

« Le rapport BioInitiative n'apporte aucune raison de changer l'évaluation actuelle du risque pour la santé de l'exposition aux champs électromagnétiques, ne comporte pas de nouvelles données, et n'a pas pris en considération de la manière habituelle la qualité scientifique des travaux cités ».

- *Office Fédéral Allemand de Radioprotection*

« Le rapport BioInitiative a des faiblesses scientifiques claires, y compris un biais de sélection dans plusieurs domaines de recherche. »

- *Health Council of the Netherlands* (2 septembre 2008)

En réponse à une demande du Ministre du Logement, de l'Aménagement et de l'Environnement, le Conseil de Santé des Pays Bas a rendu public un avis sur le rapport BioInitiative. Dans cet avis, en date du 2 septembre 2008, le Conseil exprime de très sérieuses réserves sur la méthode suivie pour la préparation de ce rapport qui ne correspond pas à une évaluation multidisciplinaire des données (« *weight of evidence method* ») conduisant à un jugement scientifiquement fondé aussi objectif que possible.

Le Conseil relève ensuite un certain nombre de défauts et d'inexactitudes dans le rapport, et plus particulièrement dans la section 1 (résumé pour le public). Notamment la notion inexacte que ce serait l' «information» transportée par les champs électromagnétiques (et non la chaleur) qui serait à l'origine des effets biologiques. Dans cette même section, le Conseil relève la mention « le développement des nouveaux téléphones sans fil de 3ème génération (et des émissions radiofréquences des antennes correspondantes aux Pays Bas) a causé presque immédiatement des plaintes de maladies de la part du public » faisant référence à une étude connue comme

« étude TNO » (N.B. cette étude n'a jamais été publiée dans une revue à comité de lecture). Le Conseil écrit que cette déclaration et la référence à l'étude TNO sont incorrectes : longtemps avant la mise en service des réseaux UMTS, certaines personnes attribuaient déjà divers problèmes de santé à l'exposition aux champs électromagnétiques émis par les stations de base GSM. Le Conseil ajoute que 4 études indépendantes (dont 2 ont, il est vrai, été publiées postérieurement au rapport BioInitiative) n'ont pas confirmé l'étude TNO.

En conclusion, le Conseil, considérant la manière dont le rapport BioInitiative a été compilé, l'utilisation sélective de données scientifiques, et les défauts relevés, déclare que le rapport BioInitiative n'est pas un reflet objectif et équilibré de l'état actuel des connaissances scientifiques, et qu'il n'apporte donc aucune base pour réviser les points de vue actuels sur les risques de l'exposition aux champs électromagnétiques.

- *Australian Centre for Radiofrequency Bioeffects Research (ACRBR)*

L'*Australian Centre for Radiofrequency Bioeffects Research*, un centre d'excellence du *National Health and Medical Research Council* (Australie), associant trois Universités et deux Instituts de Recherche, a pour objectif de développer une meilleure compréhension des effets biologiques et des effets possibles sur la santé de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques. Il publie régulièrement des rapports et communiqués (« *statements* »), et a ainsi publié récemment une analyse du rapport BioInitiative.

En exergue à son analyse, l'ACRBR remarque que le rapport BioInitiative est une collection d'opinions sur le débat sanitaire à propos des rayonnements non-ionisants, réunies par un groupe d'individus ayant un intérêt (« *interested individuals*»).

L'ACRBR note ensuite que les auteurs du rapport BioInitiative ne représentent pas un groupe international qui fasse autorité, mais que ce rapport est le résultat d'un groupe d'individus auto-sélectionnés ayant chacun une croyance forte qui n'est pas en accord avec le consensus scientifique actuel.

L'ACRBR indique que le rapport BioInitiative n'a pas été soumis à une revue indépendante par des pairs, et que ses conclusions devraient être considérées plus comme les opinions de certains des auteurs que comme de fortes contributions à la science. Ceci est particulièrement important car de nombreuses déclarations et conclusions dans le rapport sont contraires au consensus scientifique.

L'ACRBR note en particulier que le rapport n'applique pas les principes de manière constante, ce qui biaise ses conclusions. Par exemple, en plaidant pour un lien entre les lignes haute tension 50/60 Hz et le cancer du sein, le rapport ne prend pas en considération certaines des preuves qui plaident contre une telle association. Il donne aussi un argument pour exclure d'autre preuves (mauvaise évaluation de l'exposition), argument qui n'est pas employé pour les études plaidant en faveur d'une association entre les lignes à haute tension 50/60 Hz et les leucémies de l'enfant, alors que ces études sont soumises aux mêmes limitations d'évaluation de l'exposition.

Enfin, le rapport contient des prises de position qui ne sont pas en accord avec l'opinion scientifique standard, mais le rapport ne fournit pas de raisons de rejeter l'opinion scientifique standard pour adopter les vues épousées dans le Rapport.

Au total, l'ACRBR pense que le rapport BioInitiative ne fait pas avancer la science et est d'accord avec le Conseil de Santé des Pays Bas pour affirmer que « le rapport BioInitiative n'est pas un reflet objectif et équilibré de l'état actuel des connaissances scientifiques ». Pour l'ACRBR, le rapport BioInitiative apporte une série d'opinions qui ne sont pas cohérentes avec le consensus scientifique, et ne produit pas une analyse suffisamment rigoureuse pour soulever des doutes sur le consensus scientifique.

6 Réglementations relatives aux valeurs limites d'exposition

6.1 Valeurs limites d'exposition

De nombreux pays ont adopté des valeurs limites d'exposition pour la protection des travailleurs et du public contre les effets nocifs des champs électromagnétiques.

Au cours des années, ces valeurs ont évolué, depuis la simple recommandation d'une limite unique et indépendante de la fréquence pour l'exposition des travailleurs aux micro-ondes (formulée dès 1953), jusqu'à un système complet de protection, qui se fonde sur des bases scientifiques solides et qui peut être adapté à toute condition d'exposition, soit des travailleurs, soit du public en général.

Jusqu'en 1984, en l'absence d'une référence internationale, les institutions de différents pays (par exemple, aux Etats-Unis l'Institut National Américain de Standardisation (ANSI) et la Conférence Américaine des Hygiénistes Industriels (ACGIH), au Royaume Uni l'Agence Nationale de Radioprotection (NRPB), en Allemagne l'Institut de Normalisation (DIN)) ont produit des règles indépendamment les unes des autres. Plusieurs de ces règles, développées au niveau national, ont longtemps constitué des références importantes pour les pays sans réglementations propres.

En 1984, le Comité International pour les Rayonnements non Ionisants de l'Association Internationale de Radioprotection (INIRC/IRPA) publia ses premières recommandations. Elles ont depuis été révisées en 1988 et en 1998.

Il est important de noter que, dès le début, toutes les règles produites dans le monde occidental étaient fondées sur la même approche et étaient semblables sur le plan des aspects scientifiques fondamentaux.

Dans presque toute l'Europe centrale, les limites d'exposition étaient bien plus restrictives que celles d'Europe occidentale. La différence entre les limites était typiquement de trois ordres de grandeur en termes de densité de puissance (ou un facteur de 30 environ en termes de champ électrique). Ceci était dû à une approche idéologique différente de la protection, qui visait à prévenir non seulement les effets nocifs avérés, mais aussi toute réponse biologique aux champs électromagnétiques extérieurs.

Aujourd'hui, le cadre a beaucoup évolué, et la Commission Internationale pour la Protection contre les Rayonnements Non Ionisants (Icnirp), qui a remplacé en 1992 l'INIRC/IRPA, est de plus en plus reconnue comme la référence au niveau mondial. (Voir Tableau 25).

Ainsi, en Europe Centrale, la République Tchèque, la Slovaquie et la Hongrie ont abandonné leurs anciennes valeurs limites pour adopter celles recommandées par l'Icnirp. D'autres pays comme la Bulgarie et la Roumanie semblent vouloir faire de même. En Russie, l'opportunité de passer à un système de protection basé sur le DAS est actuellement discutée.

Grâce aux efforts de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et d'autres institutions supranationales comme la Commission Européenne, la tendance est à l'harmonisation progressive des valeurs limites, qui sont adoptées par un nombre croissant de pays.

6.1.1 Méthodologie de développement des valeurs limites d'exposition internationales

L'approche générale de l'Icnirp pour la protection des rayonnements non ionisants fait l'objet d'un article scientifique publié par la Commission en 2003[97]. L'Icnirp examine dans cette publication l'ensemble des effets sur la santé documentés dans la littérature, mais ne considère que ceux réputés avérés au cours de cet exercice d'analyse (selon des critères généralement acceptés) pour établir des limites d'exposition. Le jugement dépend de la qualité, de la reproductibilité et de la cohérence des études.

Suivant le niveau d'exposition considéré, plusieurs effets peuvent être identifiés. L'Icnirp définit comme *effet critique* l'effet qui se révèle au niveau le plus bas. Les limites d'exposition sont définies de façon à prévenir l'effet critique et donc, à plus forte raison, tout effet nuisible pour la santé.

L'Icnirp, comme la grande majorité de la communauté scientifique, considère que les seuls effets sanitaires avérés des champs électromagnétiques radiofréquences sont les effets thermiques dus à l'absorption d'énergie électromagnétique par les tissus vivants.

En effet, l'Icnirp considère qu'il n'y a aujourd'hui pas de preuves scientifiques convaincantes, dans les domaines de l'épidémiologie et de la biologie, permettant de conclure à l'existence d'effets sanitaires à long terme comme le cancer ou des pathologies dégénératives.

Les recommandations de l'Icnirp pour les champs électromagnétiques radiofréquences visent donc à limiter l'augmentation de la température dans le corps humain ou dans ses organes, par une limitation de l'absorption de puissance électromagnétique. Par conséquent, les limites d'exposition sont exprimées en termes de débit d'absorption spécifique (DAS).

Chez les animaux, les premiers effets apparaissent à partir d'un seuil de 4 W/kg [98], un facteur de sécurité de 10 a été choisi pour obtenir la limite de 0,4 W/kg pour les travailleurs et, avec un facteur de réduction supplémentaire de 5, on aboutit à la restriction de base de 0,08 W/kg pour le public.

Il faut souligner que les facteurs de réduction sont introduits pour prendre en compte les incertitudes scientifiques, liées par exemple aux modèles dosimétriques, à l'extrapolation de l'animal à l'homme, à des erreurs expérimentales etc. et non pas pour réduire ou prévenir des effets non avérés.

6.1.2 Structure des lignes directrices Icnirp

Les règles directrices de l'Icnirp - ainsi que celles de l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) et les recommandations des autres organismes reconnus au niveau international – définissent des restrictions de base et des niveaux de référence.

Les recommandations de l'Icnirp couvrent les gammes de fréquences de 0 à 300 GHz incluant les radiofréquences.

Les restrictions de base constituent les limites qui garantissent l'absence d'effets sanitaires connus, lorsqu'une personne est exposée à un champ électromagnétique. Elles incluent des facteurs de sécurité importants et se situent donc bien au-dessous des seuils pour lesquels des effets nocifs sont connus. Les restrictions de base sont définies en termes de quantités physiques directement reliées aux phénomènes observés sur le corps, appelées quantités dosimétriques ou, plus exactement, quantités biologiquement effectives. Pour les champs électromagnétiques radiofréquences, la quantité appropriée est le débit d'absorption spécifique (DAS) – *cf.* chapitre 3.2.

---

[97] Icnirp (2003). General Approach to Protection Against Non-Ionizing Radiation. *Health Phys* 82:540-548. Disponible sur http://www.icnirp.org/documents/philosophy.pdf

[98] DAS pour le corps entier de l'animal.

En général, il est compliqué de quantifier les restrictions de base, qui font appel à des quantités liées à l'interaction entre les champs électromagnétiques et les tissus biologiques et qui devraient donc être mesurées à l'intérieur du corps. Par conséquent, il est souvent plus aisé de raisonner en termes de niveaux de référence pour contrôler l'exposition des personnes au champ électromagnétique. Les niveaux de référence sont des valeurs environnementales de quantités aisément mesurables sous certaines conditions, à savoir le champ électrique, le champ magnétique, et la densité de puissance (*cf.* chapitre 3.2).

Ces niveaux de référence sont calculés à partir des restrictions de base, par des procédures très conservatives. On considère les conditions de type « pire cas » pour tous les nombreux paramètres caractérisant l'exposition (polarisation du champ, profil du signal, taille du sujet, posture du sujet, caractéristiques électriques des tissus *etc*.). Dans les faits, la probabilité que toutes ces conditions défavorables se présentent en même temps est extrêmement faible.

Par conséquent, le respect des niveaux de référence garantit celui des restrictions de base. En revanche, si les niveaux de référence ne sont pas respectés, il convient de faire une évaluation des restrictions de base, celles-ci n'étant pas forcément dépassées.

6.1.3 Valeurs limites recommandées par l'Icnirp

Comme évoqué précédemment, les restrictions de base en matière de DAS moyenné dans le corps entier sont de **0,4 W/kg** pour l'exposition des travailleurs et de **0,08 W/kg** pour l'exposition du public.

L'Icnirp recommande aussi une limite sur le DAS local, pour les situations où l'exposition est très inhomogène. Cette limite est de 4 W/kg pour les travailleurs et 2 W/kg pour le public. Il s'agit d'une valeur moyenne pour toute masse de 10 g de tissu exposé. Les cas dans lesquels la limite locale est importante comprennent la téléphonie mobile et différentes situations de travail où les opérateurs se trouvent près des sources.

Les restrictions de base sont des valeurs moyennes obtenues sur un intervalle de 6 minutes. Cette valeur de 6 minutes permet de tenir compte du temps de réponse de l'organisme à un effet thermique.

Les niveaux de référence, pour les plages de fréquences d'intérêt pour ce rapport, sont reportés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 24 : Niveaux de référence pour l'exposition des travailleurs et du public en général

Plage de fréquence (MHz)	Intensité du champ électrique(V/m)		Intensité du champ magnétique (A/m)		Densité de puissance (W/m^2)	
	Travailleurs	Public	Travailleurs	Public	Travailleurs	Public
10-400	61	28	0,16	0,073	10	2
400-2 000	$3f^{1/2}$	$1{,}375f^{1/2}$	$0{,}008f^{1/2}$	$0{,}0037f^{1/2}$	f/40	*f*/200
2 000-300 000	137	61	0,36	0,16	50	10

6.1.4 Harmonisation des valeurs limites d'exposition

Un effort important d'harmonisation des valeurs limites d'exposition entre les différents pays est en cours. Environ 30 pays ont adopté les recommandations de l'Icnirp, intégralement ou avec des modifications mineures. Parmi les évolutions les plus récentes, on peut citer l'Inde qui a adopté les recommandations de l'Icnirp en 2007 pour les champs radiofréquences et le Brésil en mai 2009 pour l'ensemble de la gamme de fréquences de 0 Hz à 300 GHz.

Les Etats-Unis, le Canada et quelques autres pays suivent les recommandations fournies par l'IEEE[99], qui présentent quelques différences en termes de niveaux de référence, mais qui se fondent sur la même approche, la même base de données scientifiques et la même évaluation de risque. Dans le domaine des radiofréquences, les différences entre les recommandations de l'IEEE et de l'Icnirp sont liées au choix de la courbe de connexion entre les limites à basse et haute fréquence. Dans la gamme 10 MHz – 300 GHz les divergences sont limitées à l'intervalle 10 - 30 MHz, avec l'écart le plus important à 10 MHz, où les niveaux de référence de l'IEEE pour le public sont de 82,4 V/m pour le champ électrique et de 1,63 A/m pour le champ magnétique.

De façon similaire aux lignes directrices internationales, des réglementations nationales convergent également vers une approche commune. Des actions pour favoriser une harmonisation future ont été entreprises, particulièrement par l'OMS et l'UE. L'OMS a organisé plusieurs tables-rondes et ateliers afin de fournir une aide aux gouvernements nationaux pour le développement d'un cadre commun de protection.

Un pas important a été fait par l'Union Européenne, qui a publié en 1999 une recommandation[100] et en 2004 une directive[101], respectivement pour la protection du public et des travailleurs. La nécessité d'harmonisation entre les pays de l'Union figure clairement dans la recommandation. Dans le préambule, il est indiqué que : « des mesures concernant les champs électromagnétiques devraient offrir à tous les citoyens de la Communauté un niveau élevé de protection; les dispositions prises par les États membres dans ce domaine devraient être fondées sur un cadre convenu d'un commun accord de manière à contribuer à garantir la cohérence de la protection dans l'ensemble de la Communauté ».

Une autre indication en ce sens peut être lue dans le mémoire explicatif annexé à cette proposition présentée par la commission au Conseil européen : « les variations et les manques dans les dispositions et les lignes directrices [dans quelques Etats membres] contribuent à une forme de confusion et une insécurité ressentie par beaucoup de citoyens de la Communauté et diminue la confiance dans les autorités sanitaires ».

Le Conseil recommande que les lignes directrices de l'Icnirp soient adoptées dans toute l'Union. La reconnaissance de la validité de l'approche fondamentale et de la base de données scientifiques de l'Icnirp et des autres lignes directrices est explicite : « Le cadre communautaire, qui est construit sur une vaste base documentaire déjà existante, doit être fondé sur les meilleures données scientifiques possibles et devrait comprendre les restrictions de base et les niveaux de

---

[99] ICES (2005). IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. IEEE Std C95.1. New York, IEEE

[100] EU (1999). Council Recommendation on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields 0 Hz - 300 GHz. (Official Journal of European Communities L 199/59 of 30 July 1999) et donner les valeurs en DAS comme indicateur et renvoyer au tableau en annexe

[101] EU (2004). Corrigendum to Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (Official Journal of the European Union L 159 of 30 April 2004).

référence pour l'exposition aux champs électromagnétiques, en rappelant que seuls des effets établis ont été pris en compte comme base des limitations d'exposition ; une recommandation en ce sens ayant été donnée par l'Icnirp et approuvée par le comité directeur scientifique de la commission ».

La recommandation a été votée avec le seul vote *contre* de l'Italie.

6.1.5 Validité actuelle des recommandations de l'Icnirp

La révision la plus récente des recommandations de l'Icnirp a été publiée en 1998. De nombreuses recherches ont été conduites après cette date et les limites de l'Icnirp ont souvent été qualifiées d'obsolètes, ou ne tenant pas compte des données plus récentes.

En réalité, l'Icnirp suit continuellement les nouvelles études et modifie ses évaluations lorsque les données le justifient, mais cette commission considère que les résultats des dernières années ont confirmé la validité des limites actuelles. L'Icnirp note toutefois que le manque d'indications explicites peut avoir créé l'impression d'un manque d'attention et a récemment décidé de publier un avis[102] (août 2009) pour confirmer la validité de ses limites d'exposition.

Dans ce document, l'Icnirp stipule que la littérature scientifique publiée après 1998 n'a fourni la preuve d'aucun effet nocif en-dessous des limites d'exposition et de fait, l'Icnirp ne recommande pas de révision immédiate des recommandations concernant l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences : « It is the opinion of Icnirp that the scientific literature published since the 1998 guidelines has provided no evidence of any adverse effects below the basic restrictions and does not necessitate an immediate revision of its guidance on limiting exposure to high frequency electromagnetic fields. […] With regard to non-thermal interactions, it is in principle impossible to disprove their possible existence but the plausibility of the various non-thermal mechanisms that have been proposed is very low. In addition, the recent *in vitro* and animal genotoxicity and carcinogenicity studies are rather consistent overall and indicate that such effects are unlikely at low levels of exposure. Therefore, Icnirp reconfirms the 1998 basic restrictions in the frequency range 100 kHz–300 GHz until further notice. »

L'Icnirp a également publié en juillet 2009 son « livre bleu » sur l'exposition aux radiofréquences[103]. Ce document est une revue des connaissances scientifiques en dosimétrie, sur les effets biologiques, les observations épidémiologiques et les conséquences sanitaires de l'exposition aux champs électromagnétiques hautes fréquences (100 kHz – 300 GHz). En raison de sa publication proche du terme de ses travaux, le groupe de travail n'a pu prendre en considération ce document. Une analyse de la bibliographie du livre bleu de l'Icnirp a néanmoins permis de s'assurer que la quasi-totalité des références citées avaient été prises en compte dans le présent rapport.

Un jugement indépendant a été formulé à plusieurs reprises de la part de comités scientifiques de la Commission Européenne, notamment le CSTEE (Comité Scientifique sur la Toxicité, l'Ecotoxicité et l'Environnement) en 2001 et le Scenihr (Comité Scientifique pour l'Evaluation de Risques Sanitaires Emergents et Nouveaux) en 2007 et 2009. Les conclusions du dernier rapport, en ce qui concerne les radiofréquences, sont presque identiques à l'avis de l'Icnirp.

---

[102] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2009). Icnirp Statement on the "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 Ghz)". http://www.icnirp.de/documents/StatementEMF.pdf

[103] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2009). Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz) - Review of the Scientific Evidence and Health Consequences. http://www.icnirp.de/documents/RFReview.pdf

Le Parlement européen, dans une résolution de 2009[104], « prie instamment la Commission de procéder à la révision de la base scientifique et du bien-fondé des limites fixées pour les champs électromagnétiques dans la recommandation 1999/519/CE et de faire rapport au Parlement; demande que la révision soit menée par le comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux », ce que, comme déjà évoqué, le Scenihr a déjà fait.

6.2 Panorama des réglementations internationales

Une base de données sur les législations et les réglementations en vigueur dans le monde est disponible sur le site du « projet champs électromagnétiques » de l'OMS[105].

Le panorama n'est pas complet, puisque l'archivage des données résulte d'informations fournies volontairement par les pays participants au projet.

Une analyse plus détaillée pour chaque pays, en comparaison avec la situation française, a été réalisée par l'Afsset. Le groupe de travail a complété ces informations avec des données fournies par d'autres sources. De plus, à titre d'exemple, la Suisse et l'Italie font l'objet d'une analyse plus complète, les bases documentaires étant plus riches.

Le Tableau 25 synthétise le cadre général des réglementations dans plusieurs pays.

6.2.1 Références aux valeurs limites

Tableau 25 : Réglementations dans différents pays

Pays	règles adoptées			
	Icnirp	Icnirp avec réduction	IEEE	Autres
Afrique du sud	X			
Allemagne	X			
Argentine	X			
Australie	X			
Autriche	X			
Bolivie			X	
Brésil	X			
Canada			X	
Chili	X			
Chine				X
Colombie	X			
Corée du sud	X[b]			X

[104] Résolution 2008/2211(INI) du 2 avril 2009 relatives aux préoccupations quant aux effets pour la santé des champs électromagnétiques

[105] http://www.who.int/docstore/peh-emf/EMFStandards/who-0102/Worldmap5.htm

Costa Rica		X		
Croatie	X			
Danemark	X[a]			
Equateur	X			
Espagne	X			
Estonie	X			
Etats-Unis			X	
Finlande	X			
France	X			
Grèce	X	X		
Hongrie	X			
Inde	X			
Irlande	X			
Israël	X[a]			
Italie	X			
Japon	X			
Lettonie	X			
Lituanie	X			
Luxembourg	X			
Malaisie	X			
Mexique				X[c]
Nouvelle-Zélande	X			
Panama			X	
Paraguay	X			
Pays-bas	X[a]			
Perou	X			
Philippines	X			
Pologne			X	
Portugal	X			
République tchèque	X			
Roumanie				
Royaume–Uni	X[a]			
Russie			X	

Singapour	X			
Suisse	X			
Vénézuela	X			

Notes:

a) Application volontaire
b) Niveau de référence
c) Pour travailleurs seulement

Principales sources d'information:

1) Site Internet du « projet champs électromagnétiques » de l'OMS
2) Skvarka J, Aguirre A. Normas y estándares aplicables a los campos electromagnéticos de radiofrecuencias en América Latina: guía para los límites de exposición y los protocolos de medición. Rev Panam Salud Publica/Pan Am J Public Health 20(2/3), 2006 (En Espagnol)
3) Brazilian Federal Law 5 May 2009, No. 11.934
4) http://www.indiaenvironmentportal.org
5) Rapport national au Projet International CEM de l'OMS 2007
6) Latin America Science Review (LASR)

6.2.2 Réglementation française

La réglementation française visant à limiter l'exposition du public aux champs électromagnétiques est conforme au cadre communautaire, notamment à la recommandation européenne 1999/519/CE du 12 juillet 1999 et à la directive 1999/05/CE du 9 mars 1999 dite « R&TTE ». Elle couvre à la fois les équipements terminaux radioélectriques et les stations de base radioélectriques.

Les champs électromagnétiques émis par les stations radioélectriques et les équipements terminaux radioélectriques ne doivent pas dépasser les valeurs limites qui résultent respectivement du décret n°2002-775 du 3 mai 2002 et de l'arrêté du 8 octobre 2003, fixant les spécifications techniques applicables aux équipements terminaux radioélectriques. Ces réglementations réellement contraignantes sont les premières à avoir été mises en place en France, pour la population générale. Il existait auparavant des réglementations spécifiques pour certaines catégories de professionnels (par exemple les personnes amenées à travailler à proximité de radars).

6.2.2.1 Dispositions particulières pour les antennes de stations radioélectriques

L'implantation ou la modification des antennes-relais et des sites qui les hébergent est soumise à différentes réglementations, qui concernent :

- l'urbanisme et la construction ;
- la compatibilité électromagnétique et la meilleure utilisation des sites disponibles ;
- l'exposition du public aux champs électromagnétiques.

La circulaire du 16 octobre 2001 relative à l'implantation des antennes-relais de radiotéléphonie mobile rappelle les recommandations en vigueur et propose notamment d'utiliser les travaux du CSTB pour définir le périmètre de sécurité autour des antennes-relais. Elle préconise également la mise en place de structures de concertation autour de la mise en place des antennes, et rappelle les conditions de contrôle des obligations des opérateurs.

L'installation d'un périmètre de sécurité permet d'interdire l'accès au public des zones à l'intérieur desquelles les niveaux de référence sont dépassés ou susceptibles de l'être. Le public est défini

comme l'ensemble des personnes, particuliers ou professionnels, appelées à intervenir à proximité d'antennes, autres que ceux mandatés par l'opérateur. Un guide technique sur la *Modélisation des sites radioélectriques et des périmètres de sécurité pour le public*[106] est annexé à cette circulaire. La dernière édition de ce guide a été publiée début 2008 sur le site internet de l'Agence nationale des fréquences (ANFR). Elle étend le dimensionnement des périmètres de sécurité à l'ensemble des catégories d'émetteurs radiofréquences.

Les valeurs limites qui sont définies sont relatives à l'exposition du public en un endroit donné, et il n'y a donc pas de limitation au niveau des sources proprement dites : il n'y a pas de valeur limite sur la puissance des émetteurs. Le gestionnaire du site doit s'assurer (avec par exemple la matérialisation d'un périmètre de sécurité) qu'en toute zone accessible par le public, le champ électromagnétique rayonné par l'émetteur ne conduit pas à un dépassement des valeurs limites d'exposition.

Il n'existe pas de réglementation contraignante visant à faire respecter une distance minimale d'implantation par rapport à des habitations ou des lieux publics. L'article 5 du décret 2002-775 demande cependant aux opérateurs ou exploitants, lorsqu'une antenne est située dans un rayon de 100 m autour d'établissements scolaires, de crèches ou d'établissements de soins, d'indiquer les actions prises pour assurer une exposition aussi faible que possible tout en préservant la qualité du service rendu.

L'Agence nationale des fréquences veille au respect des valeurs limites lors de la délivrance de l'accord ou de l'avis pour l'implantation des stations radioélectriques obligatoirement soumises à la procédure (dite « COMSIS ») prévue par les articles L 43 et R 20-44-11 5° du code des postes et des communications électroniques. Tout émetteur de puissance supérieure à 5 Watts est soumis à l'accord de l'ANFR pour son implantation ou sa modification[107], à l'exception des stations audiovisuelles soumises à avis. Cependant, cet avis doit être suivi lorsqu'il est fondé sur un motif tiré du respect des valeurs limites d'exposition.

Par ailleurs, l'article L 34-9-1 alinéa 2 du même code (loi 2004-669 du 9 juillet 2004) prévoit que le respect des valeurs limites puisse être vérifié sur site par des organismes qualifiés en appliquant le protocole de mesure établi par l'ANFR dont les références ont été publiées au *Journal Officiel* par deux arrêtés des 3 novembre 2003 et 12 décembre 2005 (*cf*. chapitre 3.5.2). Ces organismes doivent répondre aux critères de qualité définis par les articles D100 et D101 du code des postes et des communications électroniques, créés par le décret 2006-61 du 18 janvier 2006. Ils doivent par exemple avoir été accrédités à cet effet par le *Comité français d'accréditation* (Cofrac) ou par un organisme européen équivalent, afin de garantir l'indépendance et la fiabilité des mesures de champs électromagnétiques effectuées. Le fait pour un équipement de ne pas respecter les valeurs limites constitue une infraction pénale punie de la peine d'amende prévue pour les contraventions de la cinquième classe conformément à l'article R 20-25 du code des postes et des communications électroniques.

La loi n°2004-806 du 9 août 2004 relative à la politique de santé publique crée dans le code de la santé publique et dans le code des postes et des communications électroniques des articles qui complètent le dispositif lié à la protection du public contre l'exposition aux champs électromagnétiques afin de favoriser une concertation plus large des intéressés :

- L'article 1333-21 du code de la santé publique prévoit ainsi que le préfet peut prescrire des mesures de champs électromagnétiques à la charge des opérateurs dans des conditions définies par l'arrêté du 4 août 2006 (les opérateurs ne sont pas prévenus de la date de ces mesures ; le paiement se fait *a posteriori*).

---

106 Disponible à l'adresse suivante : http://www.anfr.fr/pages/sante/guide_champ.pdf

107 Arrêté du 17 décembre 2007 pris en application de l'article R. 20-44-11 du code des postes et des communications électroniques et relatif aux conditions d'implantation de certaines installations et stations radioélectriques.

- L'article L 96-1 du code des postes et des communications électroniques prévoit que les maires peuvent demander aux exploitants des stations radioélectriques un état des lieux des installations radioélectriques présentes sur leur commune. Le contenu et les modalités de transmission de ce dossier sont précisés dans un arrêté du 4 août 2006.

6.2.2.2 Cas particulier d'initiatives locales : exemple de la charte de Paris.

Quelques initiatives locales en France ont instauré des objectifs de limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques différents des valeurs limites réglementaires. Ces objectifs ne sont, en général, appliqués qu'aux technologies de téléphonie mobile. Ces initiatives, comme à Paris par exemple, n'ont pas de valeur réglementaire[108] (le cadre national reste la référence réglementaire), mais sont négociées par les différentes parties prenantes, dans le but affiché de prendre en compte les préoccupations des citoyens. La charte signée entre la Ville de Paris et les opérateurs de téléphonie mobile[109] prévoit, en complément des valeurs limites d'exposition du public définies par le décret du 3 mai 2002, un certain nombre de dispositions particulières, dont la limitation du champ électrique à 2 V/m, exprimé en champ moyen « équivalent 900 MHz » sur 24 heures, dans les *lieux de vie fermés* (une pièce d'habitation, fenêtre fermée, par exemple) et les établissements particuliers au sens de l'article 5 du décret du 3 mai 2002, à l'exception des lieux de simple passage des établissements de soins, et cela pour les gammes de fréquences de la téléphonie mobile.

La définition des *lieux de vie* est pratiquement équivalente à celle des *lieux à utilisation sensible* de certaines réglementations étrangères, comme celle de la Suisse. La mesure se fait sur trois points dans un *lieu de vie*, le point où le niveau est *maximum* comme le prescrit le protocole de mesure *in situ*, et deux autres points choisis par le prescripteur de la mesure en fonction de l'utilisation du lieu de vie considéré. Un coefficient de 0,432, correspondant à des estimations statistiques de trafic moyen, permet de passer du niveau *maximum* de champ au niveau moyen sur 24 heures. Après application de ce coefficient, on peut substituer au chiffre unique de 2 V/m du champ moyen « équivalent 900 MHz » sur 24 h de la charte, le jeu des valeurs limites pour chaque fréquence utilisée par la téléphonie mobile, ce qui conduit aux valeurs de champ maximales suivantes qui s'appliqueraient s'il n'y avait qu'une seule fréquence :

- 4,6 V/m pour la fréquence 900 MHz ;
- 6,5 V/m pour la fréquence 1 800 MHz ;
- et 6,9 V/m pour la fréquence 2 100 MHz et au-delà.

Ces chiffres sont très voisins des *valeurs limites d'installation* prévues dans l'ordonnance suisse (4 V/m pour les installations qui émettent exclusivement dans la bande 900 MHz, 6 V/m pour les installations qui émettent exclusivement dans la bande 1 800 Hz ou dans une bande de fréquences plus élevées, 5 V/m dès lors qu'il y a à la fois émission dans les bandes de fréquence 900 MHz et 1 800 MHz ou au-delà). Le fait qu'il s'agisse, pour la réglementation de la Suisse, du champ émis par une seule installation (plusieurs émetteurs de téléphonie mobile « proches »), et, pour la charte de la ville de Paris, du champ produit par l'ensemble des émetteurs de téléphonie mobile existants, n'introduit pas un biais important. En effet, seuls les émetteurs « proches » apportent une contribution significative au niveau de champ en un point donné.

[108] Certaines initiatives locales ou régionales en Belgique ou en Espagne peuvent elles être de type réglementaire, mais elles sont liées à un contexte de répartition des autorités administratives différent de la France. En tout état de cause, ces règles locales sont à appréhender à la lumière du cadre national.

[109] http://www.paris.fr/portail/Environnement/Portal.lut?page_id=103&document_type_id=4&document_id=13357&portlet_id=11101

6.2.2.3 Dispositions particulières pour les terminaux mobiles

L'article R9 du code des postes et des communications électroniques définit un certain nombre de notions relatives aux équipements terminaux radioélectriques (DAS, norme harmonisée, mise sur le marché *etc*.). La vérification de la conformité des équipements terminaux radioélectriques par rapport aux exigences essentielles de la directive européenne 1999/05/CE dite R&TTE a été transposée par le décret n° 2003-961 du 8 octobre 2 003 qui a institué les articles R 20-1 à R 20-28 du code des postes et des communications électroniques.

L'arrêté du 8 octobre 2003 fixant des spécifications techniques applicables aux équipements terminaux radioélectriques précise les valeurs limites d'exposition des personnes (valeurs de DAS).

L'arrêté de 8 octobre 2003 relatif à l'information des consommateurs sur les équipements terminaux radioélectriques pris en application de l'article R. 20-10 du code des postes et télécommunications précise les informations devant figurer dans la notice d'emploi des terminaux. Ainsi, pour ces équipements, le DAS local dans la tête doit être indiqué de façon lisible et visible dans cette notice d'emploi.

Par ailleurs, il est précisé dans cet arrêté que des précautions d'usages de l'appareil doivent être jointes, dont la formulation est laissée à l'appréciation du fabricant ou de la personne responsable de la mise sur le marché[110].

Des sanctions pénales pour la mise sur le marché ou la vente d'équipements non conformes sont prévues dans le code des postes et des communications électroniques (article R20-25).

6.2.2.4 Perspectives d'évolution de la réglementation

6.2.2.4.1 Table-ronde « radiofréquences, santé environnement »

Dans le but de répondre aux inquiétudes exprimées par une partie de la population face aux installations d'antennes-relais de téléphonie mobile, et après un certain nombre de décisions de justices favorables à des riverains réclamant le démantèlement d'antennes, il a été décidé au printemps 2009 par les pouvoirs publics de tenir une table-ronde sur le sujet. Le 25 mai 2009 s'est donc ouverte la table-ronde intitulée « radiofréquences, santé environnement », également connue médiatiquement sous le terme « Grenelle des ondes ». La plupart des acteurs concernés par le volet politique du dossier étaient présents, et notamment les ministres en charge de la santé, de l'économie numérique et de l'environnement, des représentants des agences et instituts qui travaillent sur ce dossier, des opérateurs et radiodiffuseurs, des associations, des syndicats et des sociologues.

Plusieurs réunions de travail ont été organisées, sur les différents thèmes retenus, avant la restitution du rapport final le 25 mai 2009[111]. La synthèse de ce rapport dégage des principes

---

[110] Exemple de formulations :

A. - Mesures touchant à la sécurité des personnes utilisatrices ou non du téléphone mobile dans certaines situations (en conduisant) et certains lieux (les avions, les hôpitaux, les stations-service et les garages professionnels). Précautions à prendre par les porteurs d'implants électroniques (stimulateurs cardiaques, pompes à insuline, neurostimulateurs ...) concernant notamment la distance entre le téléphone mobile et l'implant (15 centimètres) et la position du téléphone, lors de l'appel, sur le côté opposé à l'implant.

B. - Conseils d'utilisation pour réduire le niveau d'exposition du consommateur aux rayonnements (il sera précisé que ces conseils sont donnés par simple mesure de prudence, aucun danger lié à l'utilisation d'un téléphone mobile n'ayant été constaté). Recommandation de l'utilisation du téléphone mobile dans de bonnes conditions de réception, pour diminuer la quantité de rayonnements reçus (notamment dans un parking souterrain, lors de déplacements en train ou en voiture ...). Indication des paramètres de bonne réception (ex. : affichage sur l'écran du téléphone de quatre ou cinq barrettes). Recommandation d'utilisation d'un kit mains libres et, dans cette situation, précautions à prendre lors d'une communication : éloignement du téléphone du ventre pour les femmes enceintes ou du bas ventre pour les adolescents.

[111] http://www.sante-sports.gouv.fr/actualite-presse/presse-sante/communiques/table-ronde-radiofrequences.html?

d'actions, et des orientations :

Principes :

- Transparence (information des parties prenantes, dispositifs de contrôle et de recherche) ;
- Attention (aux plaintes et craintes, notamment pour les antennes-relais) ;
- Précaution (restriction d'usage du téléphone mobile, en particulier pour les enfants) ;
- Concertation (solution dans le débat, pouvoir de négociation pour les élus dans la gestion des installations).

Orientations :

1. Une information accessible pour le grand public ;
2. Une information ciblée en direction des élus locaux et des professionnels de santé ;
3. Une prise en charge adaptée pour les personnes hypersensibles ;
4. Une démarche de précaution pour les citoyens ;
5. Un suivi raisonné des seuils d'exposition ;
6. Un dispositif de contrôle des expositions rénové ;
7. Une possibilité de contrôle individuel des expositions ;
8. Une triple expérimentation sera mise en place d'ici l'automne sur la concertation et l'information locale ;
9. Un financement de la recherche rénové ;
10. Un prolongement de la table ronde.

6.2.2.4.2 Projet de Loi Grenelle.

Le « Grenelle Environnement », organisé entre les mois de mai et octobre 2007, visait à proposer un plan d'action afin de faire face aux défis du changement climatique, de la préservation de la biodiversité et de la prévention des effets de la pollution sur la santé.

L'article 42 de la loi 2009-967 du 3 août 2009 de programmation de la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (dit « Grenelle 1 »), adopté par l'assemblée nationale le 21 octobre 2008 précise :

« L'Etat mettra en place un dispositif de surveillance et de mesure des ondes électromagnétiques menées par des organismes indépendants accrédités. Ces dispositifs seront financés par un fonds indépendant alimenté par la contribution des opérateurs de réseau émettant des ondes électromagnétiques. Le résultat de ces mesures sera transmis à l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail et à l'Agence nationale des fréquences qui le rendront public. Un décret en Conseil d'Etat définira les modalités de fonctionnement de ces dispositifs ainsi que la liste des personnes morales pouvant solliciter des mesures et les conditions dans lesquelles elles peuvent les solliciter. Les communes seront associées aux décisions d'implantation d'antennes des opérateurs dans le cadre de la mise en place de chartes locales ou de nouvelles procédures de concertation communales ou intercommunales. Une synthèse des études scientifiques relatives aux effets des champs électromagnétiques sur la santé sera présentée par le Gouvernement au Parlement avant fin 2009.»

Par ailleurs, les dispositions d'ores-et-déjà prévues par le projet de loi portant engagement national pour l'environnement dit « *Grenelle 2* » concernant les champs électromagnétiques sont présentées dans l'article 72 :

- Les terminaux radioélectriques destinés à être connectés à un réseau ouvert au public pour la fourniture du service de téléphonie ne peuvent être commercialisés sans un accessoire permettant de limiter l'exposition de la tête aux émissions radioélectriques lors des communications.

- Toute communication, quel qu'en soit le moyen ou le support, ayant pour but direct ou indirect de promouvoir la vente, la mise à disposition, l'utilisation ou l'usage d'un téléphone mobile par des enfants de moins de 12 ans est interdite.
- La distribution à titre onéreux ou gratuit d'objets contenant un équipement radioélectrique dont l'usage est spécifiquement dédié aux enfants de moins de 6 ans peut être interdite par arrêté du ministre chargé de la santé, afin de limiter l'exposition excessive des enfants.

6.2.3 Autres pays (Union européenne, Suisse et Liechtenstein)

Présentation synthétique résumée

<table>
<tr><td rowspan="5">Concepts et valeurs limites communauté européenne et Icnirp</td><td>Sans modification des valeurs limites, ou avec modifications mineures *</td><td colspan="2">Autriche ; Finlande ; Malte ; Royaume-Uni ; Allemagne ; République tchèque ; France ; Portugal ; Suède ; Danemark ; Estonie ; Hongrie ; Pays-Bas ; Slovaquie ; Chypre ; Espagne**; Lettonie ; Roumanie ; Irlande, soit 19 pays</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Avec limitations supplémentaires dans des « lieux de vie »</td><td>Par « installation »</td><td>Suisse
Liechtenstein</td></tr>
<tr><td>Par antenne</td><td>Luxembourg</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Avec une réduction générale des valeurs limites</td><td>Et/ou dans des « lieux de vie »</td><td>Grèce
Slovénie</td></tr>
<tr><td>En tous lieux</td><td>Belgique***</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Autres référentiels</td><td colspan="3">Italie</td></tr>
<tr><td colspan="3">Bulgarie ; Pologne ; Lituanie</td></tr>
</table>

* Exemple : les limites légales sont les restrictions de base (majorité des pays), les niveaux de référence (minorité des pays), ou seulement des limites recommandées (un pays)

** Variations locales sur des bases légales pour certaines communautés autonomes (exemple : Catalogne ; Navarre ; Castille-La Manche)

*** La compétence régionale vient d'être reconnue

Cas particuliers, présentation synthétique résumée

<table>
<tr><td rowspan="2">Concepts et limites CE et Icnirp</td><td rowspan="2">Avec limitations supplémentaires dans des « lieux de vie »</td><td>Par « installation »</td><td>Suisse, 10 % (en V/m) des niveaux Icnirp ;
Liechtenstein, Suisse, et objectif 2012 de 0,6 V/m « moyenne » tél. mobile</td></tr>
<tr><td>Par antenne</td><td>Luxembourg, uniquement pour téléphonie mobile : 3 V/m</td></tr>
</table>

	Avec une réduction générale des valeurs limites	Et/ou dans des « lieux de vie »	Grèce, 84 % des niveaux Icnirp (en V/m), 77 % à moins de 300 m « d'établissements particuliers » ; Slovénie, 30% des niveaux Icnirp (en V/m) à proximité d'établissements particuliers, dans zones résidentielles, zones touristiques, etc.
		En tous lieux	Belgique*, 50 % (en V/m) des niveaux Icnirp en tous lieux
Autres référentiels	Italie, systèmes de radiodiffusion et de radiocommunication (hors sécurité) : 20 V/m jusqu'à 3 GHz, 40 V/m au dessus ; 6 V/m dans des « lieux de vie » ; Idem CE pour ∑ sources et pour autres systèmes ;		
	Bulgarie : référentiel d'origine commun à certains pays d'Europe de l'Est (exemple : à 900 MHz, 6 V/m « lieux de vie ») ; protocole de mesure ? Pologne : idem; Lituanie : idem		

* Bruxelles-capitale : réduction générale à environ 10 % des valeurs limites de l'Icnirp ; en attente des arrêtés d'application ; Wallonie : 3 V/m *maximum* par antenne – par bande - dans des lieux de séjour.

6.2.3.1 Autriche

Au niveau national, une norme (ÖNorm E8850) reprennant les niveaux donnés par l'Icnirp est appliquée. Localement, des disparités concernant les valeurs limites réglementaires peuvent exister. Cependant, l'utilisation de référentiels imprécis rend leur application complexe à vérifier. Ainsi, 0,6 V/m est une valeur limite revendiquée par le canton de Salzbourg, non contraignante puisque le canton ne dispose pas de compétence en matière de santé publique. Cependant, les mesures réalisées par la Suisse ([OFCOM 2002[112]]) montrent que cette valeur ne correspond pas à une valeur maximale par installation. La carte de l'implantation des antennes en Autriche[113] montre également une bonne similitude entre ce qui existe à Salzbourg et ce qui existe dans des villes autrichiennes d'importance voisine.

Les origines de la « valeur limite » de 0,6 V/m

La valeur de 0,6 V/m est souvent évoquée comme proposition de valeur limite d'exposition en termes de niveaux de champ électrique.

Cette valeur de 0,6 V/m a été proposée initialement en 1998 par G. Oberfeld du Département santé de la ville de Salzbourg (Autriche). Il s'appuyait sur les résultats de l'étude de Mann et Röschke [Mann, 1996] publiée en 1996. Cette étude montrait un effet sur l'électroencéphalogramme pendant le sommeil d'un champ électromagnétique à la fréquence de 900 MHz avec une modulation de type GSM, pour une densité de puissance appliquée de 0,5 W/m². A partir de ce résultat, G. Oberfeld a pris en compte un facteur de sécurité de 500,

112 http://www.bakom.ch/dokumentation/zahlen/00545/00547/00548/index.html?lang=fr&download=NHzLpZeg7t,lnp6I0NTU042l2Z6ln1ae2IZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCDdH17f2ym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--

113 http://www.senderkataster.at/

atteignant alors une densité de puissance de 1 mW/m². Cela correspond à un niveau de champ électrique de 0,6 V/m[114].

Toutefois, en 1998 et 2000, les mêmes auteurs ont publié deux nouveaux articles expliquant qu'ils ne retrouvaient pas les effets de la première étude [Mann, 1998] [Wagner, 2000], et ce, en appliquant des niveaux d'exposition très supérieurs à ceux de la première étude (jusqu'à 50 W/m² au lieu de 0,5 W/m²).

Ces études ont été ignorées et la valeur de 0,6 V/m a continué d'être utilisée malgré l'absence de justification scientifique.

En 2000, une des résolutions adoptée à la majorité des voix à l'issue d'une conférence internationale à Salzbourg, a concerné l'introduction d'une valeur limite de 100 mW/m² (6,2 V/m) pour l'ensemble des applications radiofréquences et d'une valeur limite de 1 mW/m² (0,6 V/m) pour les émetteurs de téléphonie mobile.

Cette valeur de 0,6 V/m (0,1 µW/cm² ou 1 mW/m²) a été reprise par R. Santini en 2001 [Santini, 2001] et elle est depuis souvent citée par de nombreuses associations, comme la valeur limite « acceptable » pour les émetteurs de téléphonie mobile.

Au-delà de l'absence de justification scientifique, il persiste de nombreuses questions sur la définition et sur ce que représente la valeur de 0,6 V/m : est-ce un niveau instantané ou un niveau moyen (et sur quelle durée d'exposition), quelles bandes de fréquences sont concernées, comment est-elle calculée ou mesurée, *etc*. ?

6.2.3.2 Espagne

Au niveau national (*REAL DECRETO 1066/2001, de 28 de septiembre*)[115], la situation est similaire à celle de la France (reprise des niveaux de l'Icnirp).

Certaines communautés autonomes ont une réglementation spécifique. Par exemple, la généralité de Catalogne (*decret 148/2001, de 29 de maig*)[116] a fixé des valeurs limites plus faibles pour les systèmes de communications électroniques (*cf*. Tableau 26) :

Tableau 26 : Comparatif des réglementations en Espagne, Europe et Catalogne

Fréquence	Espagne et Europe	Catalogne
900 MHz	41,19 V/m	27,46 V/m
1 800 MHz	58,25 V/m	38,83 V/m
2 - 300 GHz	61,40 V/m	41,19 V/m

L'exemple parfois cité de la Région de Valence, en Espagne, qui disposerait d'une valeur limite de 0,6 V/m, est contredit par le site internet « téléphonie mobile et santé publique[117] de la généralité de Valence, avec une valeur moyenne pour Valence des résultats de mesures pour les seules stations de base de la téléphonie mobile (station par station) supérieure à 1,1 µW/cm² (2 V/m) (*cf*. Figure 25):

[114] 0,614 V/m, pour être encore plus précis…

[115] http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/rd1066-2001.html

[116] http://mediambient.gencat.cat/Images/43_2234.pdf

[117] http://moviles.gva.es/index.php?option=com_content&task=view&id=19&Itemid=72

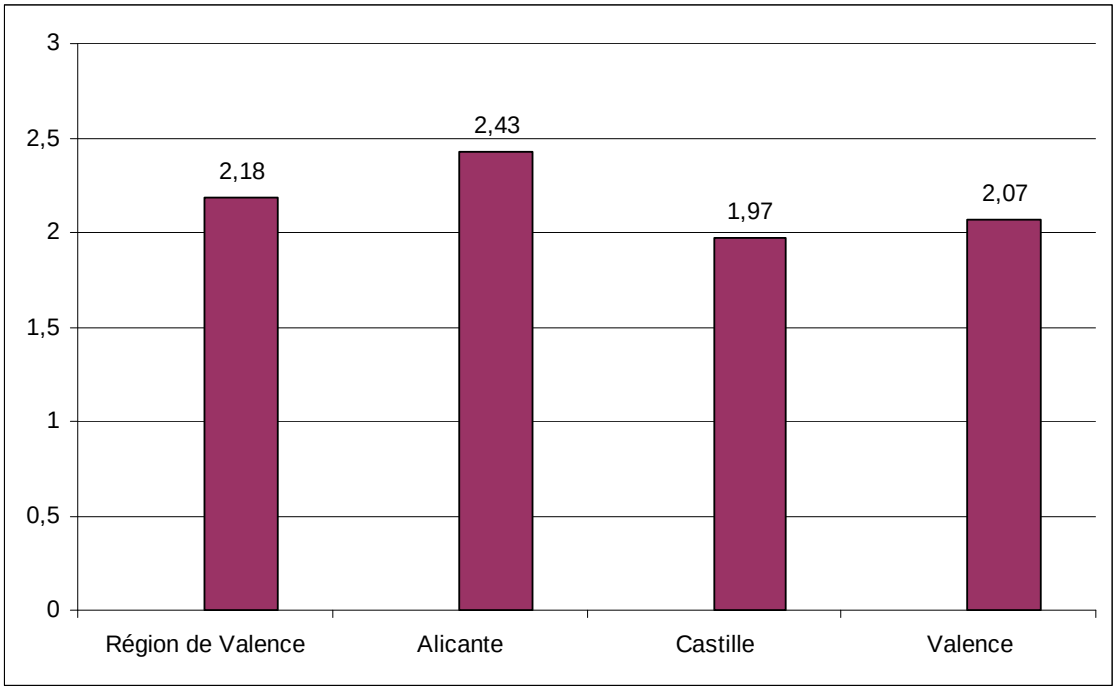


Figure 25 : Moyenne des mesures obtenues dans la région de Valence, Espagne (en V/m)

6.2.3.3 Belgique

La situation en Belgique est en transition, depuis un arrêt de la Cour constitutionnelle de Belgique du 15 janvier 2009 qui indique que la fixation du niveau d'immission (c'est-à-dire le niveau de champ mesuré *in situ*) des antennes de réseaux de communications électroniques relève de la compétence des Régions[118] :

- La réglementation en vigueur[119] jusqu'à la publication de cet arrêt, établie au niveau fédéral, fixe des restrictions de base par antenne (ou par l'installation d'un même opérateur) réduites d'un facteur 4 par rapport à celles données par l'Icnirp. Cela conduit, pour une antenne ou une installation d'un même opérateur, à des valeurs limites d'exposition en termes de niveaux de références réduites de 50 % par rapport à celles de l'Icnirp. La règle classique de cumul est appliquée en cas d'exposition à des champs multiples ($\sum(E^2/E_{lim}^2)<1$).
- *L'ordonnance relative à la protection de l'environnement contre les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les radiations non ionisantes* du gouvernement de la Région de Bruxelles-capitale du 1er mars 2007[120], à l'origine du recours devant la Cour constitutionnelle, est donc reconnue comme valable. Cette ordonnance devait entrer en vigueur au 1er mars 2009. Cette entrée en vigueur a été repoussée au troisième trimestre 2009, pour laisser le temps d'élaborer les arrêtés nécessaires, non encore publiés à la date de rédaction de ce rapport.
- Pour la région wallonne, un *décret relatif à la protection contre les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les rayonnements non ionisants générés par les antennes émettrices stationnaires*[121] a été publié le 6 mai 2009.
- Pour la région flamande, le débat a été repoussé au-delà des élections régionales de juin 2009. Aucun projet n'est disponible à la date de rédaction de ce rapport.

118 http://staatsbladclip.zita.be/moniteur/lois/2009/02/09/loi-2009200219.html

119 http://reflex.raadvst-consetat.be/reflex/pdf/Mbbs/2005/09/22/93219.pdf

120 http://www.juridat.be/cgi_loi/loi_F.pl?cn=2007030138

121 http://environnement.wallonie.be/LEGIS/pe/pe009.htm

Les deux textes actuellement disponibles, l'ordonnance pour la région de Bruxelles-capitale, et le décret pour la région wallonne diffèrent sur des points majeurs, et notamment sur deux aspects : définition des lieux de séjour ou lieux accessibles au public et du type d'exposition (niveau rayonné par une seule antenne ou niveau cumulé) – *cf.*

- Tableau 27.

Tableau 27 : Comparatif entre l'ordonnance de la région de Bruxelles et le projet de décret Wallon

Projet de décret Wallon	**Ordonnance de la région de Bruxelles**
Concerne les stations relais de télécommunications (PIRE > 4W)	Concerne tous les rayonnements non ionisants (0,1 MHz – 300 GHz), sauf radiodiffusion et équipements des particuliers (GSM, Wi-Fi, DECT, *etc*.)
La limitation ne concerne que les « lieux de séjours » (locaux d'un bâtiment : habitation, école, crèche, hôpital, etc., et espaces dévolus au sport ou jeux de manière régulière) à l'exclusion des voiries, trottoirs, parking, garages, pars, jardins, balcons, ou terrasses.	La limitation concerne tous les lieux accessibles au public.
Valeur limite : le niveau maximal de champ rayonné par une seule antenne (ou installation d'un même opérateur) mesuré dans un lieu de séjour doit être inférieur à 3 V/m. Une antenne multi-bande est considérée comme plusieurs antennes distinctes.	Valeur limite : - S = 0,01 W/m² (2 V/m) pour les fréquences inférieures à 400 MHz - S = *f* / 40 000 entre 400 MHz et 2 GHz (soit 3 V/m à la fréquence de 900 MHz) - S = 0,05 W/m² (4,3 V/m) au-delà de 2 GHz. En cas d'expositions multiples, la relation sur le cumul doit être respectée ($\sum(S_i / S_{ilim}) < 1$)

6.2.3.4 Grèce

Les valeurs limites (restriction de base et niveaux de référence exprimés en puissance) sont fixées à 70 % des niveaux de l'Icnirp, et à 60 % à moins de 300 m d'établissements particuliers (écoles, jardins d'enfants, hôpitaux, maisons de retraite)[122]. En niveau de champ, cela conduit à des valeurs limites réduites respectivement de 84 % et 77 % par rapport aux valeurs données par l'Icnirp. La règle classique de cumul est appliquée en cas d'exposition à des champs multiples ($\sum(E^2 / E_{lim}^2) < 1$).

Il est également interdit d'implanter des antennes de téléphonie mobile sur ces établissements particuliers.

6.2.3.5 Slovénie

La réglementation slovène[123] distingue les zones de niveau I (à proximité d'hôpitaux, d'établissements de soin, maisons de repos, zones résidentielles, zones touristiques, parcs

[122] http://www.who.int/peh-emf/project/mapnatreps/Greece_2007_EMF_activity_report.pdf

[123] http://www.uradni-list.si/1/content?id=13017&part=&highlight=uredba+o+elektromagnetnem

publics, terrains de jeux, *etc*.) et les zones de niveau II (le reste, zone industrielle, transport, entrepôts, activités de service, *etc*.). Les espaces affectés aux routes ou au trafic ferroviaire inclus dans les zones de niveau I sont de niveau II).

Dans les zones de niveau I, les valeurs limites exprimées en champ, sont fixées à 30 % des niveaux de l'Icnirp.

6.2.3.6 Liechtenstein

Jusqu'au 29 mai 2008, le Liechtenstein appliquait une réglementation calquée sur la réglementation suisse[124]. La seule nouveauté substantielle de la loi sur la protection de l'environnement du 29 mai 2008[125], et donc aussi la seule divergence par rapport à la réglementation suisse, concerne la seule téléphonie mobile : « *Les propriétaires d'une installation sont tenus de prendre toutes dispositions appropriées pour réduire la valeur efficace de l'intensité de champ électrique à la valeur la plus basse techniquement réalisable, et à atteindre en moyenne une valeur efficace de l'intensité de champ électrique de 0,6 V/m d'ici fin 2012* ».

Cet « objectif 2012 » est relatif à des *valeurs moyennes*. En l'absence de précisions sur la définition de ce qui est entendu par *valeurs moyennes*, il est difficile, à ce stade, de tirer des conclusions définitives sur ce que sera la réalité de l'exposition en 2012.

6.2.3.7 Luxembourg

Dans le Grand-Duché de Luxembourg, et pour la téléphonie mobile, l'intensité maximale du champ électrique en tout lieu où peuvent séjourner des personnes (cette notion est plus restrictive que celle de lieux accessibles au public) est de 3 V/m par élément rayonnant[126]. Dans le cas où plusieurs éléments rayonnent dans une même direction, la valeur maximale autorisée du champ électrique de l'ensemble des éléments orientés dans le même sens se calcule par la formule $E_{max} = 3\sqrt{n}$ (en V/m).

Cette limitation, pour la seule téléphonie mobile, n'est donc pas exprimée en niveau de champ *in situ* tous émetteurs confondus, mais en niveau de champ *in situ* dans les lieux où séjourne le public et résultant de la seule émission d'un élément rayonnant, sans application avec ces limites de la règle classique d'exposition à des sources multiples.

Pour les autres stations émettrices (TV, FM, etc.), les niveaux de l'Icnirp s'appliquent.

6.2.4 Deux exemples particuliers : la Suisse et l'Italie

Des efforts ont été entrepris au niveau international pour harmoniser les réglementations sur l'exposition aux champs électromagnétiques. Cependant, en Italie, une loi cadre radicalement différente des lignes directrices a été promulguée en 2001. En 2000, une ordonnance qui s'écarte du consensus international a également été adoptée en Suisse.

6.2.4.1 Cadre de la réglementation italienne

L'idée principale est d'avoir une "loi cadre" posant les principes de base de la protection, la distribution des responsabilités (par exemple au gouvernement central et aux autorités locales), les procédures de contrôle, les pénalités, *etc*. Au final, des décrets devaient être pris pour réglementer séparément les différentes sortes de champs électromagnétiques, ou les différentes sources. Une

---

124 http://www.admin.ch/ch/f/rs/8/814.710.fr.pdf

125 http://www.llv.li/pdf-llv-rdr-2008199.doc.pdf

126 http://www.itm.lu/securite-sante-ss/conditions_types/conditions-types/conditions_types_old/cl179-4.pdf et http://www.environnement.public.lu/guichet_virtuel/etabl_classes/index_formulaires/EXP-302.pdf

telle structure devait assurer en principe une certaine flexibilité. Les lois sont votées par le parlement, et requièrent plusieurs années pour être rédigées et discutées. Les décrets sont promulgués directement par le gouvernement, ou de manière plus fréquente par des ministres. Ils peuvent ainsi facilement être mis à jour pour prendre en compte des changements rapides dans les technologies ou de nouvelles découvertes scientifiques.

La loi cadre a été votée par le parlement le 14 février et entérinée le 22 février 2001.

6.2.4.2 Principales caractéristiques des réglementations italiennes

L'approche italienne de la protection sanitaire contre les effets des champs électromagnétiques diffère grandement des lignes directrices internationales. Les quantités dosimétriques (courants induits, DAS, etc.) ne sont pas mentionnées, et aucune restriction de base ou niveau de référence n'est considéré. Au lieu de cela, trois niveaux d'exposition sont introduits, appelés respectivement "limites d'exposition", "valeurs d'attention" et "objectifs de qualité". Ils sont définis comme suit :

- les limites d'exposition sont des "niveaux d'immission[127]" de champ électromagnétique qui ne peuvent être dépassés en aucune circonstance ;
- les valeurs d'attention sont des valeurs de champs électrique et magnétique qui ne peuvent être dépassées en environnement résidentiel (maisons, écoles, hôpitaux, cours de récréation). Elles sont explicitement définies comme des valeurs de précaution contre les effets à long terme ;
- les objectifs de qualité ont été conçus comme des "niveaux d'émission" de sources, dans un objectif de précaution. Plus tard, la définition a été modifiée par le parlement. D'un côté des critères pour l'utilisation de la meilleure technologie possible sont donnés, de l'autre des valeurs de champs électromagnétiques sont définies par l'Etat pour minimiser l'exposition.

Ces définitions indiquent l'importance particulière donnée aux effets à long terme. Le gouvernement italien pensait que les recommandations européennes sous-estimaient ces effets, ce qui a motivé le vote *contre* de l'Italie sur la recommandation de l'Icnirp. Cet argument était clairement indiqué dans un courrier officiel des ministres de l'environnement, de la santé et des communications au président du conseil de l'Union Européenne.

6.2.4.3 Le décret italien sur l'exposition aux champs électromagnétiques

Le décret relatif à l'exposition du public aux champs radiofréquences a été émis le 8 juillet 2003, et publié au journal officiel de la république italienne n°199 du 28 août 2003. Il concerne uniquement l'exposition de la population générale aux champs électromagnétiques émis par des sources fixes de télécommunications, dans la bande de fréquence 100 kHz – 300 GHz.

Les limites d'exposition (telles que présentées dans le projet de loi cadre) ont été définies pour les champs électrique, magnétique et la densité de puissance, respectivement :

- 60 V/m, et 0,2 A/m dans la bande de fréquence 100 kHz – 3 MHz ;
- 20 V/m, 0,05 A/m, et 1 W/m^2 dans la bande de fréquence 3 MHz – 3 GHz ;
- 40 V/m, 0,1 A/m, et 4 W/m^2 dans la bande de fréquence 3 GHz – 300 GHz.

Les valeurs d'attention et les objectifs de qualité sont les suivantes, quelle que soit la fréquence :

- 6 V/m pour le champ électrique ;
- 0,016 A/m pour le champ magnétique ;

[127] Dans le domaine réglementaire italien et suisse, le terme "d'immission" correspond au niveau d'exposition d'un individu.

- 0,1 W/m^2 pour la densité de puissance.

Les limites d'exposition dans la réglementation italienne correspondent aux niveaux de référence de l'Icnirp, même si la dépendance en fonction de la fréquence est particulière. La courbe qui relie les valeurs limites aux fréquences correspond en fait à une ancienne proposition (1981) d'un groupe de travail *ad hoc* pour le développement de la réglementation, mais qui n'a jamais abouti.

Les valeurs d'attention n'ont pas de base scientifique, comme le prouve la non prise en compte de la dépendance fréquentielle des effets. Une référence générale est faite aux possibles effets à long terme, mais aucune justification n'est donnée pour les valeurs numériques, ni dans le décret, ni dans les documents reliés.

En pratique, les valeurs d'attention applicables aux sites dits « sensibles » se substituent généralement aux valeurs limites d'exposition réglementaires, quelle que soit la situation d'exposition.

6.2.4.4 L'ordonnance suisse

Le 23 décembre 1999, le Conseil fédéral a approuvé une ordonnance pour la protection de la population générale contre les rayonnements non ionisants. L'ordonnance est rentrée en application le 2 février 2000[128].

Le titre de l'ordonnance est quelque peu trompeur, puisque la réglementation n'inclut que les champs électromagnétiques dans la gamme de fréquences 0 Hz – 300 GHz, sans considération des autres sortes de rayonnements non ionisants comme les rayonnements optiques non cohérents (IR, visible, UV) ou les rayonnements laser.

L'ordonnance suisse est en général considérée proche du décret italien sur les radiofréquences – et des autres réglementations développées en Italie, à la fois dans l'approche et dans le choix des limites - en contraste avec les normes internationales, comme les lignes directrices de l'Icnirp. Cependant, des différences de fond existent entre les approches suisse et italienne.

6.2.4.5 Caractéristiques principales de l'ordonnance suisse

L'ordonnance suisse ne prend pas en compte les quantités dosimétriques classiques (courants induits, DAS, *etc*.). Elle fixe uniquement des limites en termes d'intensités de champ électrique et magnétique.

Deux sortes de limites sont proposées :

- les niveaux d'immission sont des limites qui ne doivent être dépassées dans aucun lieu accessible,
- les niveaux d'*émission* sont des limites qui ne doivent pas être dépassées, en considérant les contributions de chaque source, dans des zones « sensibles », c'est-à-dire où l'on s'attend à des séjours prolongés de personnes (écoles, hôpitaux, maisons, cours d'écoles, *etc*.). Ces limites sont aussi appelées (dans l'ordonnance) : limites d'*installation*.

L'ordonnance s'applique uniquement aux installations fixes. Elle est aussi limitée à l'exposition uniforme du corps entier, c'est-à-dire essentiellement à l'exposition en champ lointain dans le cas des radiofréquences. Cela explique certainement pourquoi la densité de puissance n'est jamais mentionnée dans le document.

Alors que le respect des limites d'immission est requis strictement, les limites d'installation peuvent être dépassées dans certaines circonstances.

[128] Le texte est disponible à l'adresse internet suivante : www.admin.ch/buwal.

Les limites d'installation sont définies pour des sources individuelles. Les valeurs numériques sont résumées dans le paragraphe suivant. Les nouvelles installations doivent toujours respecter ces valeurs limites d'installation. Pour les anciennes, des actions de correction sont généralement requises dans le cas d'un non respect. Le délai accordé pour de telles actions ainsi que les exceptions possibles sont spécifiés pour chaque source ou technologie.

Les sources radiofréquences qui font l'objet de valeurs limites d'installation sont les suivantes :

- Stations de base de téléphonie mobile (PIRE ≥ 6 W) :
    - Stations à 900 MHz : E ≤ 4 V/m.
    - Stations à 1 800 MHz : E ≤ 6 V/m.
    - Stations bi-bandes : E ≤ 5 V/m.
- Stations de diffusion (PIRE ≥ 6 W) :
    - Emetteurs grandes ondes et ondes moyennes : E ≤ 8,5 V/m.
    - Autres émetteurs : E ≤ 3 V/m.
- Radars (PIRE ≥ 6 W):
    - Champ électrique : E ≤ 5,5 V/m.

6.2.4.6 Comparaison des réglementations suisse et italienne

Les similitudes entre les réglementations suisse et italienne (en application ou en cours de discussion) sont moins nombreuses qu'il est communément admis. Les limites d'installation (clairement définies comme « valeurs de précaution ») dans l'ordonnance suisse sont généralement considérées comme correspondant aux valeurs d'attention du décret italien sur l'exposition aux radiofréquences. En effet, la valeur d'attention italienne pour l'intensité du champ électrique (6 V/m sur toute la bande de fréquence 100 kHz – 300 GHz) est du même ordre de grandeur que la limite d'émission suisse. Cependant, leur signification n'est pas la même.

Les valeurs d'attention italiennes (en dépit de leur nom) sont de vraies limites, qui doivent être respectées dans des zones spécifiques, sans exception. Elles sont indépendantes des sources, et peuvent ainsi être facilement interprétées comme étant liées au risque des champs électromagnétiques eux-mêmes.

Par contraste, les valeurs suisses (en dépit également de leur nom) sont des objectifs de qualité : elles correspondent en fait à ce qu'il est possible d'obtenir pour des sources individuelles, à des coûts raisonnables, plutôt qu'à une contrainte stricte. A la différence des limites italiennes, elles peuvent être dépassées à condition de montrer que des alternatives sont techniquement inenvisageables, ou à des coûts déraisonnables.

Les limites d'installation sont, en d'autres termes, une norme technique et non des valeurs fondées sur la santé ou la science.

6.2.4.7 Les réglementations italienne et suisse et le principe de précaution

Dans la mesure où le principe de précaution est le moteur des réglementations italienne et suisse, et qu'il a été envisagé de le prendre en compte pour de possibles amendements dans des réglementations nationales dans d'autres pays, un rappel de sa définition semble approprié.

Le besoin de précaution lorsqu'une technologie engendre de possibles risques – même non prouvés – pour la santé ou l'environnement a été largement reconnu ces dernières années. Des recommandations de mesures fondées sur le principe de précaution sont introduites dans de nombreux traités internationaux. Cependant, le principe n'est formellement défini dans aucun de ces traités, pas plus que ses règles d'application pratique.

Des textes importants ont été délivrés par la commission européenne. Des lignes directrices pour l'utilisation du principe de précaution ont été publiées en octobre 1998 par la Direction Générale de la Santé et des Consommateurs. Le principe de précaution est défini comme « une approche à la

gestion de risque qui s'applique dans des circonstances d'incertitude scientifique, marquant le besoin de prendre des mesures pour faire face à un risque potentiellement grave sans attendre les résultats de la recherche scientifique ».

Une telle définition pourrait conduire à un usage arbitraire du principe de précaution, puisque toute donnée de risque est caractérisée par une incertitude. Les lignes directrices de l'UE sont définies de manière à prévenir cela. Une communication publiée le 2 février 2000 par la commission européenne indique clairement que : « le recours au principe de précaution présuppose que les effets potentiellement dangereux d'un phénomène, d'un produit ou d'un procédé ont été identifiés et que l'évaluation scientifique ne permet pas de déterminer le risque avec suffisamment de certitude. »

Le principe de précaution n'est jamais mentionné explicitement dans les réglementations suisse et italienne, la réglementation suisse étant fondée sur un principe plus général (la loi de protection environnementale). Cependant, on peut remarquer plusieurs fois le caractère prudent de certaines limites, ainsi que certaines justifications de précaution données dans des documents d'accompagnement. Il est alors intéressant de regarder les deux réglementations à la lumière du principe de précaution tel que défini par l'UE.

La loi cadre italienne et l'ordonnance suisse – qui couvrent l'ensemble du spectre fréquentiel – sont, au moins en partie, en accord avec le principe de précaution au regard des champs magnétiques liés aux lignes de transport électrique. Pour ceux-ci, le risque potentiel – la leucémie infantile - est identifié par la recherche scientifique, bien qu'avec de grandes incertitudes et des incohérences. Cependant, l'absence d'une relation claire entre la dose et l'effet empêche de réaliser des analyses coûts bénéfices, et rend difficile le choix de mesures de protection proportionnées au risque, et harmonisées avec des actions prises dans d'autres secteurs.

Pour les champs hautes fréquences, au contraire, l'OMS remarque que, « compte tenu des très faibles niveaux d'exposition et des résultats des travaux de recherche obtenus à ce jour, il n'existe aucun élément scientifique probant confirmant d'éventuels effets nocifs des stations de base et des réseaux sans fil pour la santé[129] ». Ainsi, aucun risque nécessitant une précaution n'a été identifié. Selon les principes directeurs de la commission européenne, le recours au principe de précaution serait arbitraire.

6.2.4.8 L'ordonnance Suisse et la loi de protection environnementale

Le recours à la précaution par le conseil fédéral suisse est d'un autre côté justifié par le besoin de respecter une loi générale suisse, la loi de protection environnementale (LPE), entérinée en 1983. Plus précisément, en accord avec les prescriptions de cette loi, l'ordonnance devrait être vue comme l'une des multiples réglementations issues de l'application de la LPE elle-même.

Tel que mentionné dans le rapport explicatif qui l'accompagne, la loi « demande que les rayonnements non ionisants [comme tout autre agent - NdR] dans l'environnement soient maintenus à un niveau qui ne soit ni préjudiciable ni indésirable pour les humains. Egalement, en accord avec cette législation, les effets qui *pourraient* [en italique dans le texte - NdR] induire des dommages ou être indésirables doivent être limités le plus tôt possible, dans un objectif de prévention ».

Les articles de la LPE qui sont d'intérêt pour l'ordonnance sont listés dans le rapport explicatif :

Art. 1 But

1 La présente loi a pour but de protéger les hommes, les animaux et les plantes, leurs biocénoses et leurs biotopes contre les atteintes nuisibles ou incommodantes, et de conserver durablement les ressources naturelles, en particulier la diversité biologique et la fertilité du sol.

---

[129] Aide mémoire n°304 "Champs electromagnétiques et s anté publique", disponible sur le site Internet de l'OMS : http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs304/fr/index.html

2 Les atteintes qui pourraient devenir nuisibles ou incommodantes seront réduites à titre préventif et assez tôt.

Art. 11 Principe

1 Les pollutions atmosphériques, le bruit, les vibrations et les rayons sont limités par des mesures prises à la source (limitation des émissions).

2 Indépendamment des nuisances existantes, il importe, à titre préventif, de limiter les émissions dans la mesure que permettent l'état de la technique et les conditions d'exploitation et pour autant que cela soit économiquement supportable.

3 Les émissions seront limitées plus sévèrement s'il appert ou s'il y a lieu de présumer que les atteintes, eu égard à la charge actuelle de l'environnement, seront nuisibles ou incommodantes.

Art. 13 Valeurs limites d'immissions

1 Le Conseil fédéral édicte par voie d'ordonnance des valeurs limites d'immissions applicables à l'évaluation des atteintes nuisibles ou incommodantes.

2 Ce faisant, il tient compte également de l'effet des immissions sur des catégories de personnes particulièrement sensibles, telles que les enfants, les malades, les personnes âgées et les femmes enceintes.

Bien que reliée à la loi, l'ordonnance possède une étendue plus large que les lignes directrices internationales en matière de protection sanitaire. Le rapport explicatif explique que l'attention est portée sur la protection des humains, mais note également que « sur la base des connaissances actuelles, il est possible de faire l'hypothèse que le reste de l'environnement n'est pas plus sensible aux rayonnements non ionisants que les humains, et se trouve donc également protégé de manière adéquate ».

6.2.4.9 Logique scientifique des réglementations

Comme cela a été souligné dans le paragraphe précédent, l'ordonnance suisse trouve sa justification dans une loi générale qui ne requiert pas de preuve scientifique d'un dommage. La loi de protection de l'environnement précise en fait que même des effets, qui ne le sont pas, mais qui pourraient devenir gênants ou indésirables, doivent être évités. Dans tous les cas, les émissions doivent être limitées dans la mesure où cela est technologiquement et opérationnellement possible, ainsi que faisable économiquement « sans tenir compte du poids sur l'environnement ».

Ainsi, toute restriction qui permet d'atteindre raisonnablement le niveau d'exposition le plus faible est requis par la LPE, sans autre justification. Cependant, le rapport explicatif propose des arguments pour la précaution, fondés sur une critique sévère de l'Icnirp.

Les phrases importantes de ce rapport sont les suivantes :

*« Les limites d'immission [*de l'ordonnance*] sont les valeurs limites publiées en avril 1998 pour la population (générale) par la commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp). Pour l'établissement de ces valeurs, la commission a axé son travail sur les effets biologiques obtenus de manière répétée et reproductible dans des études expérimentales, et représentant un risque pour l'homme. Les effets pour lesquels un risque n'a pas être clairement identifié, obtenus de façon unique ou non répétable, et en particulier, les études épidémiologiques, n'ont pas été pris en compte dans l'établissement des valeurs limites par l'Icnirp. L'Icnirp a, cependant, inclus un facteur de sécurité pour la construction de ces valeurs limites. Celui-ci considère des effets préjudiciables pris en compte par l'Icnirp et prouvés sans conteste. Les valeurs limites de l'Icnirp sont ainsi des valeurs liées au risque, et non de prévention.*

En termes concrets, cela signifie :

Dans le domaine des basses fréquences (lignes de transport d'électricité, transports ferroviaires) :

Les valeurs limites de l'Icnirp protègent les muscles (y compris le myocarde) contre des contractions indésirables et les nerfs (y compris le cerveau) contre des déclenchements intempestifs d'impulsions.

*Les valeurs limites de l'Icnirp ne tiennent pas [*souligné dans le texte*] compte des effets biologiques qui ont été établis dans les expérimentations animales et cellulaires et dans des cas individuels chez l'homme. Par exemple, dans les cellules, le métabolisme cellulaire est influencé (par exemple le transport et la fixation du calcium). Chez les rats, la sécrétion de mélatonine est réduite, des désordres neurovégétatifs chez les humains (fatigue chronique par exemple) et un affaiblissement du système immunitaire ont été établis. De tels effets ont été prouvés expérimentalement dans la gamme 1 – 10 µT. Dans des cas individuels, des effets ont été également observés dans le cas des faibles densités de flux magnétique. Les valeurs limites de l'Icnirp ne prennent pas également en compte les indications épidémiologiques d'un accroissement du risque de leucémie pour des expositions à long terme au-dessus de 0,1 – 0,3 µT.*

Dans le domaine des hautes fréquences (stations d'émission) :

Les valeurs limites de l'Icnirp protègent le corps humain d'un échauffement.

*Les valeurs limites de l'Icnirp ne tiennent pas [*souligné dans le texte*] compte des effets non-thermiques. Par exemple, des expérimentations ont montré qu'il existe chez les humains une influence sur le sommeil à 14 V/m. Des souris ont développé de façon significative des cancers des glandes lymphatiques lorsqu'elles étaient exposées au rayonnement de téléphones mobiles avec une intensité dans la plage des valeurs limites de l'Icnirp. Les résultats de l'étude épidémiologique de l'émetteur ondes courtes de Schwarzenburg, qui montrait que des désordres du sommeil étaient plus fréquents que lors d'une nuit d'exposition moyenne à 0,4 V/m, n'ont pas été pris en compte.*

Les valeurs limites de l'Icnirp sont certainement capables de prévenir certains effets préjudiciables démontrés. Cependant, elles ne sont pas capables de remplir les critères plus complets de la loi de protection environnementale, étant donné que la LPE demande que les valeurs d'immission soient établies non seulement sur la base des derniers résultats scientifiques, mais aussi sur la base des expériences réelles. De plus, les effets sur la population générale ne sont pas les seuls à devoir être pris en compte, mais également ceux sur les groupes de personnes de sensibilité plus développée, comme les enfants, les malades, les personnes âgées, et les femmes enceintes. »

On peut s'interroger sur une telle critique des lignes directrices de l'Icnirp. Elle a considéré des études épidémiologiques, mais a jugé leurs résultats inadéquats pour poser des limites d'exposition. L'Icnirp a considéré des études biologiques, mais a fondé ses lignes directrices à partir de l'ensemble des résultats des études *in vivo* et *in vitro*, plutôt que sur des recherches individuelles, ainsi que le rapport suisse semble le recommander. L'Icnirp – comme les autres instances scientifiques importantes – exclut de façon intentionnelle les articles qui ne sont pas revus par des comités de lecture, comme le rapport sur l'émetteur de Schwarzenburg, par exemple.

Les politiques sanitaires traitant des champs électromagnétiques semblent fondées sur une critique de plus en plus sévère de l'Icnirp et d'instances internationales comme l'OMS. Ces critiques ont été exprimées ouvertement, par exemple, pour justifier le vote de l'Italie contre les recommandations de l'Union européenne, mais elles ne sont pas reportées dans la loi cadre, ni dans les documents liés, ni dans le décret.

6.2.4.10 Conclusions

L'ordonnance suisse sur les champs électromagnétiques est fondée sur une approche générale qui demande la limitation de l'exposition à tout agent ayant un impact sur l'environnement. En réalité, cette approche n'est pas issue d'un débat avec les organisations internationales comme l'Icnirp ou l'IEEE. En ce sens, elle diffère de l'attitude politique de l'Italie, qui a critiqué et s'est fortement opposée à la recommandation européenne de 1999 en raison d'une sous-estimation des effets à long terme.

Si elle est correctement interprétée, l'ordonnance suisse ne devrait pas être un obstacle majeur dans le processus actuel d'harmonisation des normes et réglementations, conduit par l'OMS et

l'UE. Cependant, certaines critiques des bases scientifiques de l'Icnirp et d'autres instances internationales méritent une clarification.

A contrario, la position de gestion italienne, notamment de part la prise en compte de critères non fondés sur des éléments scientifiques semble difficile à réconcilier avec les tendances de la communauté scientifique internationale.

7 Radiofréquences et société

Dans cette partie sont considérés les éléments se rapportant à la dimension sociale des objets utilisant des technologies radiofréquences, et plus particulièrement la téléphonie mobile. Un premier positionnement porte sur les controverses liées aux technologies : celles-ci ne paraissent pas être un phénomène nouveau et plusieurs cas ont été documentés. La diffusion massive et rapide de la téléphonie mobile constitue un fait marquant demandant à être analysé, en lien avec l'évolution des pratiques et usages, et pour chercher à mieux comprendre les effets de l'information sur les risques. Des études de perception des risques portant spécifiquement sur la téléphonie ont été conduites en France et dans d'autres pays et nous en présentons les principaux résultats. L'approche sociale du risque est complétée par quelques résultats portant sur les coûts et bénéfices et par un examen du traitement judiciaire des plaintes concernant les antennes-relais.

7.1 Risques et controverses

On notera que « les périls du sans fil » sont évoqués dès 1914 dans un article du New York Times faisant état d'articles de presse français portant sur la capacité des courants hertziens (dont le développement technologique était alors récent) de faire exploser un stock de poudre ou une mine de charbon – théories vigoureusement réfutées par les scientifiques de l'époque.

Cet exemple, qui partage quelques similitudes avec les technologies utilisant des radiofréquences, nous renvoie à un historique qui montre que le développement d'une technologie s'accompagne de dimensions sociales imprévues – et depuis près d'un siècle apparemment. Il ne s'agit donc pas d'un phénomène essentiellement nouveau ni forcément déterminé par les cas plus récents de mobilisations sociales autour d'enjeux comprenant des risques (nucléaire, sang contaminé, ESB, canicule, *etc*.).

Chaque risque, dès lors qu'il atteint une forme de reconnaissance de statut social, ce qui n'est pas le cas de tous les risques, permet à des pans entiers de la population de découvrir des enjeux scientifiques et sociaux se rapportant à la gouvernance des risques, avec les dynamiques de l'argumentation et du débat propres aux sociétés démocratiques. Le premier corollaire de cet effet de « découverte » - stimulé par le recours parfois abusif à la notion de « risque émergent » - est que les expériences et savoirs générés lors de confrontations antérieures avec des objets ou situations à risques, demeurent largement ignorés. En plus des caractéristiques propres aux radiofréquences, il s'agit donc de mobiliser aussi les savoirs développés par la recherche dans les différents domaines de l'évaluation des risques pour mieux caractériser la problématique actuelle des radiofréquences dans ses dimensions physique, biologique et sociale.

La question du cadrage de l'évaluation des risques et de leur gestion apparaît en effet à presque tous les niveaux de l'expertise, qu'il s'agisse des protocoles expérimentaux en sciences de la matière et de la vie (SMV) ou des méthodologies en sciences humaines et sociales (SHS) du risque. Dans une présentation de synthèse, Slovic (2007) a rappelé que les questions de compréhension de la science et l'éducation du public sont importantes mais qu'elles ne sont pas centrales aux controverses sur les risques ; et le public n'est pas davantage irrationnel dans son cadrage du risque, avec des enjeux de politique, d'affect et de confiance. Borraz (audition du 1er avril 2009, *cf.* annexe 3.4) insiste également sur la notion de cadrage. Cette notion renvoit aux « filtres perceptuels, visions du monde ou présupposés qui guident la définition et l'interprétation collectives d'enjeux particuliers » (Miller, 2000), autant d'éléments existant *avant* cette saisine.

Au-delà de son acception commune, la notion de controverse est précocement associée à l'évaluation et la gestion des risques, dont elle paraît indissociable dans certains cas au sein des

sociétés démocratiques. Par exemple, von Winterfeldt et Edwards (1984) identifient dès cette date 162 cas de controverses liées aux risques technologiques.

On notera toutefois que la controverse n'est pas spécifique au domaine des risques et qu'elle s'applique pratiquement à tous les enjeux présentant des points de vue divergents, des conflits d'intérêts ou autres différends. Elle constitue également un ancrage traditionnel pour les récits journalistiques et paraît capter l'attention du public.

Comme le montrent les recherches conduites dans le domaine de l'amplification sociale des risques (Pidgeon et al., 2005), le développement d'une controverse ne signifie pas forcément l'existence d'un risque grave , tel qu'il peut être mesuré par les conséquences en mortalité et morbidité. De plus, et sans doute plus important, l'absence de controverse ne signifie pas l'absence de risques ni l'absence d'impacts graves en termes de santé publique (*cf*. le cas de la canicule en France en 1976, rappelé au paragraphe 7.2.3).

Dans le contexte de l'expertise, la place de la controverse demande donc à être précisée. Par exemple, Rip (1986) introduit la notion de controverse comme constituant une forme d'évaluation informelle des technologies.

De plus, il convient de distinguer l'expertise concernant les risques liés à des projets à venir, de celle s'appliquant à des aménagements déjà réalisés, comme dans le cas des radiofréquences et de la téléphonie mobile. Dans le premier cas, l'expertise peut inclure des formes de concertation, idéalement en amont de l'engagement des projets pour traiter les questions de risque acceptable et de choix (de technologie comme de société). Dans le deuxième cas, les populations peuvent se trouver confrontées à un risque sans qu'elles aient été impliquées dans des concertations préalables.

Dans le contexte français, et pour un agent physique autre que les radiofréquences, l'analyse du cas de Moirans-en-Montagne (Poumadère et Mays, 2005) montre que l'expertise en situation de controverse aiguë (portant sur une ligne à haute tension alors récemment enfouie) récapitule les étapes qui auraient pu ou dû avoir lieu en amont de l'aménagement, en répondant notamment aux questionnements nombreux de la population locale. Dans ce cas, cette ouverture à un questionnement et la prise en compte d'hypothèses variées sert une double rationalité instrumentale et sociale. Le cas de Moirans en Montagne montre que la frontière entre ces rationalités est incertaine, et l'acceptation locale de cette caractéristique s'est révélée utile en situation de controverse. On relèvera que la population locale a joué un rôle particulièrement actif, tant par ses questionnements conduisant à la convocation sur le terrain d'expertises diverses (électricité, nucléaire, radiofréquences, géosciences) que par le recours aux légendes et à l'imaginaire locaux, l'ensemble permettant de donner sens à une expérience collective inédite et éprouvante.

En plus de ce cas, l'implication des populations locales en France est également au centre d'une réflexion portant sur les « éléments permettant de construire une relation avec les populations dans l'évaluation des risques liés à une exposition environnementale » (Legout *et al.*, BEH Thématique 47-48, 9 décembre 2008), s'appuyant sur le fait que plusieurs expertises en santé environnementale s'étaient accompagnées de controverses avec les populations. L'adaptation de la démarche américaine de *Community Involvement* dans l'évaluation en santé publique a notamment permis « l'intégration de cette dimension importante qu'est l'écoute des personnes à l'origine du signal ».

7.2 Synthèse des enquêtes d'opinion

Cette partie s'appuie sur les études conduites par des institutions (INPES, IRSN, UE) avec le cadrage propre à la mission de chacune : éducation pour la santé, sûreté nucléaire, gouvernance des risques pour 25 ou 27 membres (selon les études) de l'UE. Une étude spécifique de perception des risques associés aux radiofréquences et conduite en Suisse, est également prise en compte.

7.2.1 Baromètre santé environnement 2007

Le Baromètre santé environnement reprend le modèle des baromètres santé, réalisés par l'INPES depuis 1992. Il a été élaboré dans le cadre du Plan National Santé Environnement (2004-2008). Un échantillon aléatoire de 6 007 personnes sélectionnées sur la base d'un fichier issu de l'annuaire téléphonique, incluant des listes rouges, a été interrogé par téléphone. L'enquête s'est déroulée du 22 Janvier au 21 Mai 2007.

A travers une approche centrée sur le cadre de vie et l'habitat de la population, l'objectif de cette étude a été d'appréhender les *attitudes, opinions, et comportements des Français de 18 à 75 ans face à un certain nombre de risques environnementaux* dont la téléphonie mobile au sujet de laquelle nous donnerons ici les principaux résultats trouvés.

- Les utilisateurs de téléphone mobile : une population jeune, urbaine et diplômée

Sur l'ensemble des 18 - 75 ans, 81,5 % des personnes déclarent posséder un téléphone mobile (82,5 % d'hommes *vs* 80 % de femmes, $p < 0,01$). La proportion d'utilisateurs diminue avec l'âge, $p < 0,001$) passant de 97,5 % chez les 18 - 25 ans à 67,7 % chez les 67 - 75 ans. Cet usage est également plus fort chez les plus diplômés ($p < 0,001$) et les revenus les plus élevés ($p < 0,001$).

-Les stations de base de téléphonie mobile ne représentent pas un risque majeur par rapport aux autres risques environnementaux (Voir Tableau 28)

Dans cette enquête, la perception des risques associés aux stations de base de téléphonie mobile (ou antennes de téléphonie mobile) se situe en 11ème position sur les 13 risques présentés dans l'enquête, avec 51,5 % seulement de personnes inquiètes (dont 14 % déclarant un risque très élevé et 37,5 % déclarant un risque assez élevé).

10,7 % de l'échantillon des personnes sondées ne se prononce pas sur le risque lié aux stations de base de téléphonie mobile. Cette thématique est ainsi celle pour laquelle on trouve le moins de personnes ayant une opinion arrêtée.

- Un sentiment d'être bien informé sur l'utilisation des téléphones mobiles et ses éventuels effets sur la santé (Voir Tableau 29)

Une majorité de personnes s'estiment plutôt bien informées sur les risques liés à l'utilisation des téléphones mobiles : 60,7 % des personnes déclarant être plutôt bien informées et 36 % plutôt mal informées. Parmi les 10 thèmes environnementaux étudiés, l'utilisation de téléphones mobiles apparait en 6ème position des risques pour lesquels les personnes se sentent bien informées.

Des avis partagés sur le risque de tumeur du cerveau lié au téléphone portable

Sur l'ensemble des individus, 10,2 % sont tout à fait d'accord et 30,4 % plutôt d'accord avec l'hypothèse selon laquelle l'utilisation du téléphone mobile favorise le développement de tumeur au cerveau.

Ces réponses sont liées à l'âge (ce sont les plus jeunes qui ont le plus de craintes), au niveau de revenu (les personnes à bas revenus sont plus inquiètes que les autres), à la sensibilité à l'environnement (les plus sensibles perçoivent plus le risque), et au risque perçu vis-à-vis des stations de base de téléphonie mobile. Par ailleurs, les détenteurs de téléphones mobiles sont les plus nombreux à rejeter ce risque. Ces relations ont été confirmées par l'application d'un modèle d'analyse logistique de régression.

L'oreillette est peu utilisée

L'oreillette est peu utilisée puisque chez les détenteurs de téléphone mobile, seuls 30 % déclarent s'en servir. De plus, cette proportion diminue avec l'âge, allant de 45,6 % chez les 18 - 25 ans, à 9,7 % chez les 65 - 75 ans ($p < 0,001$). Le port de l'oreillette est également lié au statut

socioprofessionnel, au diplôme et au risque perçu de tumeur au cerveau (33,8 % *vs* 28,1 %) ($p < 0,001$). Ces associations ont été confirmées par l'utilisation d'un modèle de régression logistique.

Les raisons évoquées de l'utilisation d'une oreillette sont essentiellement pratiques : la sécurité en voiture (51 %) et la liberté de mouvements (39 %) sont citées prioritairement, puis protéger sa santé (17 %) et se protéger des ondes (17 %) et enfin éviter une contravention en voiture (16 %).

Le débit d'absorption spécifique (DAS) est peu connu

Les personnnes interrogées méconnaissent la notion de DAS puisque 13 % seulement déclarent en avoir entendu parler. Invités à choisir dans une liste de définitions, 71 % répondent « quantité d'ondes reçue par l'usager quand il téléphone » et seuls 10 % en donnent une bonne définition « quantité d'énergie absorbée par le corps lors de l'exposition aux champs électromagnétiques ». Les personnes les mieux informées sont les 26 - 34 ans (12,6 %) et la connaissance du DAS diminue progressivement avec l'âge (seulement 4,9 % parmi les 65 - 75 ans).

Le manque de confiance en l'expertise scientifique (voir Tableau 30)

Le nombre de personnes qui se déclarent « très ou plutôt confiants » dans l'expertise scientifique relative aux stations de base de téléphonie mobile est seulement de 49,5 %. La téléphonie mobile se situe ainsi en dernière position derrière 6 autres risques présentés, dont l'amiante (73,6 %) et la pollution extérieure (72,7 %), qui suscitent la plus grande confiance.

Le niveau de satisfaction vis-à-vis des actions menées par les pouvoirs publics en matière de téléphonie mobile esst assez faible

Seules 3,3 % des personnes interrogées se disent très satisfaites et 33,6 % plutôt satisfaites de l'action conduite par les pouvoirs publics.

Les plus bas niveaux de satisfaction sont retrouvés chez les personnes ayant les revenus les plus élevés et chez les 26 - 34 ans.

Tableau 28 : Perception des risques environnementaux pour la santé des Français (en pourcentage ; n = 6 007 ; pour monoxyde n = 5 758 ; pour légionelle n = 5 590)

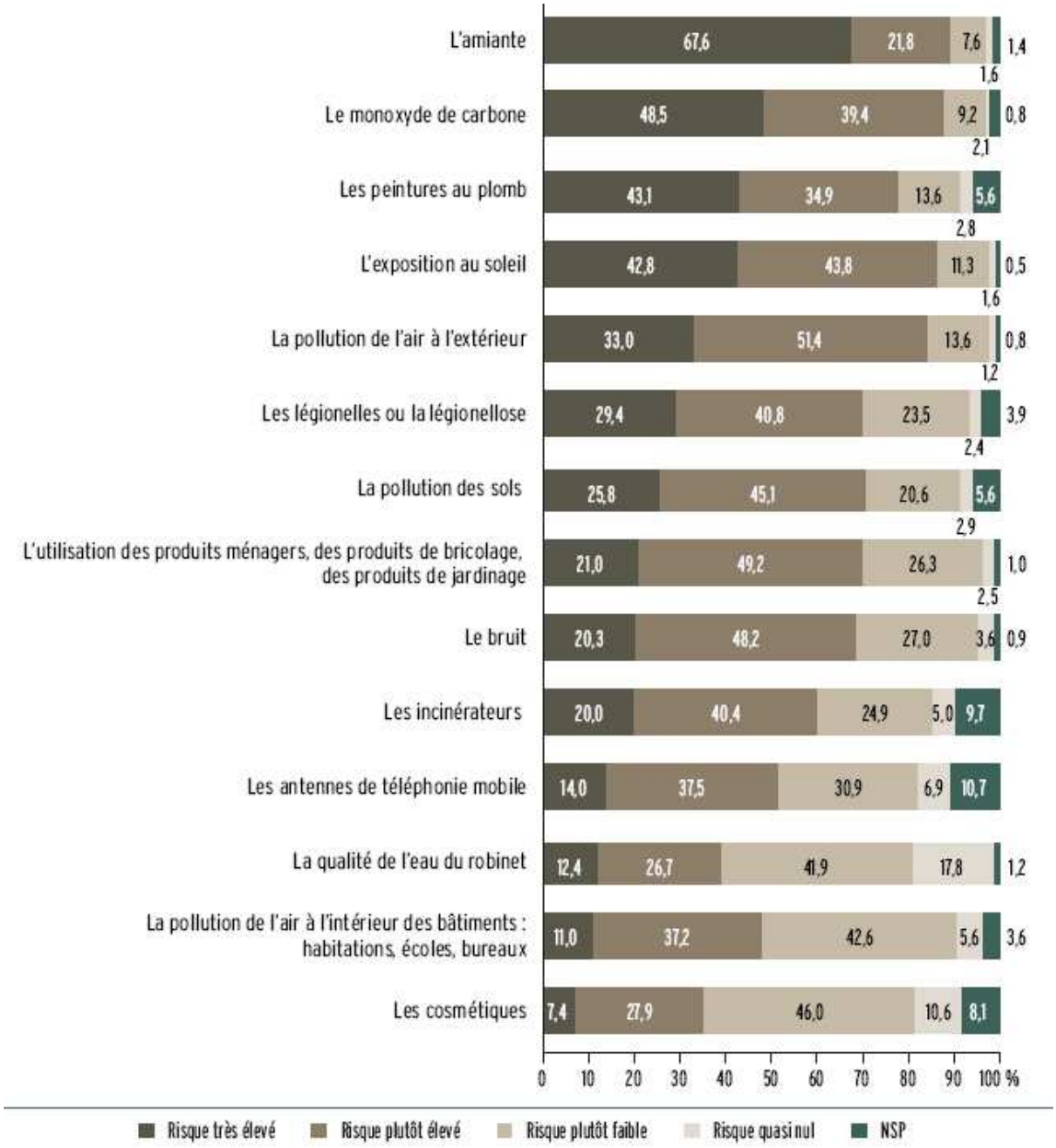


Tableau 29 : Sentiment d'information sur les thèmes environnementaux et leurs éventuels effets sur la santé (en pourcentage ; n = 6 007)

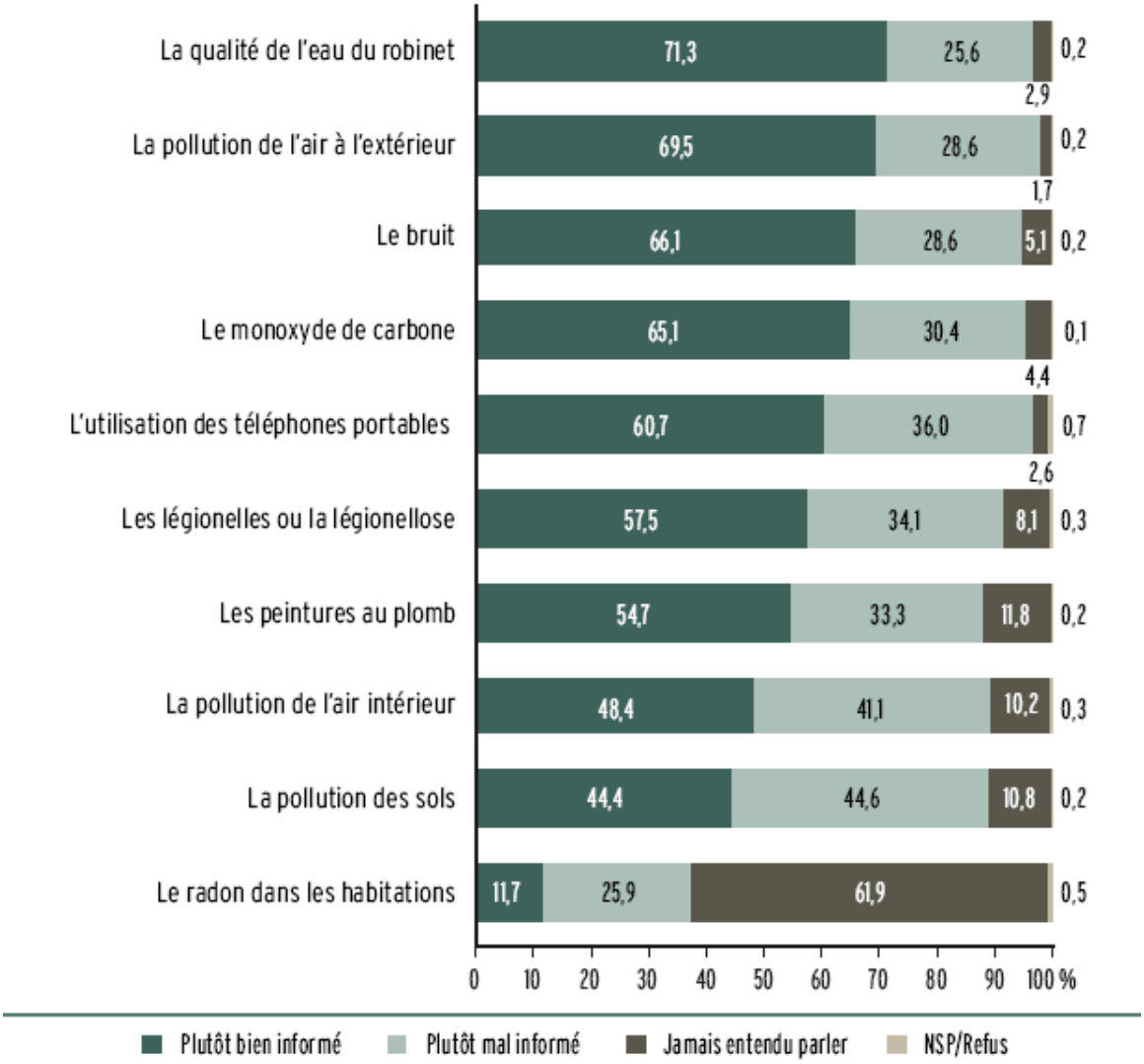


Tableau 30 : Confiance dans l'expertise scientifique sur les différents thèmes environnementaux. Personnes se déclarant « très ou plutôt confiants » (en pourcentage)

	Pollution de l'air extérieur	Pollution de l'air à l'intérieur des bâtiments	Pollution des sols	Pesticides	Substances chimiques	Antennes de téléphonie mobile	Amiante
Total	72,7	71,6	63,3	61,5	62,5	49,5	73,6
Sexe							
Hommes	72,7	71,2	64,6	63,1	65,7	46,8	75,3
Femmes	72,7	72,0	62,1	59,9*	59,4***	52,2***	72,0*
Âge							
18-25 ans	75,7	70,9	69,0	65,3	71,9	56,2	74,8
26-34 ans	73,6	74,5	66,7	65,0	64,1	45,5	78,2
35-44 ans	72,6	73,1	62,0	61,7	61,8	47,0	74,4
45-54 ans	72,6	69,5	61,6	60,4	61,3	49,1	73,3
55-64 ans	70,3	70,1	58,3	56,1	56,2	48,6	70,4
65-75 ans	71,3	71,4	63,4***	60,5**	60,2***	52,6***	69,7**
Diplôme							
Aucun diplôme	53,0	55,0	46,2	48,0	45,5	45,8	52,1
Inférieur au bac	67,3	68,3	59,3	56,8	56,8	52,4	67,2
Bac	77,0	73,9	65,0	64,2	65,3	49,6	76,2
Bac +2	78,7	72,9	67,5	66,0	68,3	48,1	82,1
Bac +3 +4	79,0	79,7	68,4	65,7	69,4	44,0	84,4
Bac +5 et plus, grandes écoles	85,2***	81,3***	77,6***	73,3***	77,3***	49,3*	86,9***
Profession et catégorie socioprofessionnelle							
Agriculteurs	65,4	66,2	57,1	61,2	58,4	49,1	69,2
Artisans	70,0	71,6	62,0	57,2	62,6	44,8	73,0
Cadres	81,1	78,0	71,0	69,2	70,4	45,8	83,4
Professions intermédiaires	74,8	73,2	63,6	61,6	65,1	46,0	78,7
Employés	71,6	70,4	62,3	60,1	59,5	53,3	72,1
Ouvriers	65,6	65,6	56,4	56,6	54,7	48,9	63,8
Autres personnes sans activité professionnelle	73,9***	73,3***	67,5***	63,8***	66,5***	55,7***	70,5***

* : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001.

7.2.2 Enquête INPES 2009

Une étude quantitative appelée « ondes électromagnétiques et risques pour la santé : connaissances, perceptions et comportements des français », a été menée par téléphone par l'institut Ipsos pour l'INPES, auprès d'un échantillon représentatif de la population française. Cette enquête a été construite selon la méthode des *quotas*, sur 1 505 personnes de 15 à 75 ans, du 14 au 22 avril 2009. Elle a repris en partie le questionnaire concernant les champs électromagnétiques du baromètre santé environnement 2007.

Les premiers résultats disponibles laissent apparaître que :

- en 2009, 85 % des personnes interrogées utilisent un téléphone mobile contre 81,5 % en 2007. 87 % des personnes interrogées l'estiment utile (dont : 50 % assez utile, 28 % très utile et 9 % in dispensable).
- comme en 2007, près de six personnes sur 10 se sentent plutôt bien informées sur les téléphones mobiles et ses éventuels risques sur la santé et seulement quatre personnes sur 10 se sentent plutôt bien informées sur les antennes-relais et leurs éventuels effets sur la santé. Parmi ceux qui se disent mal informés sur le téléphone mobile, 91 % évoquent

comme raison le fait que les informations sont insuffisantes, 78 % qu'elles sont incohérentes voire contradictoires, 64 % le fait quelles ne proviennent pas de sources officielle.

- 61 % des personnes interrogées en 2009 considèrent que les antennes-relais présentent un risque pour la santé contre 51 % seulement en 2007.
- le risque perçu lié à l'utilisation du téléphone mobile s'est également accru entre 2007 et 2009 puisque 40 % des personnes interrogées en 2007 contre 59 % en 2009 estiment qu'utiliser un téléphone mobile peut favoriser une tumeur au cerveau.
- le DAS (débit d'absorption spécifique) est toujours aussi mal connu ; seulement 11 % de la population en connaît la signification précise.
- néanmoins la proportion de personnes utilisant une oreillette a progressé puisqu'elle est passée de 30 % en 2007 à 41 % en 2009.
- 26 % des personnes interrogées déclarent avoir changé d'habitude depuis qu'ils ont entendu parler des risques liés à la téléphonie mobile. Par exemple : éloigner le téléphone du corps pour 41 %, limiter les appels 39 %, l'éteindre ou l'éloigner la nuit 38 % ou utiliser une oreillette ou un kit main libres (27 %).
- comme en 2007, à peine plus d'un tiers des français a confiance en la parole publique sur ce sujet. Cependant, plus de huit personnes sur 10 pensent que l'état ne s'exprime pas assez sur ce sujet.
- Les français estiment que les personnalités les plus légitimes à prendre la parole seraient les scientifiques, les pouvoirs publics (notamment le ministère de la santé), les professionnels de santé et les opérateurs.

On constate donc dans ces données très récentes une inquiétude accrue vis-à-vis de la téléphonie mobile (téléphones mobiles et antennes-relais) qui entraîne une attente d'information claire et officielle sur le sujet.

7.2.3 Baromètre IRSN 2008

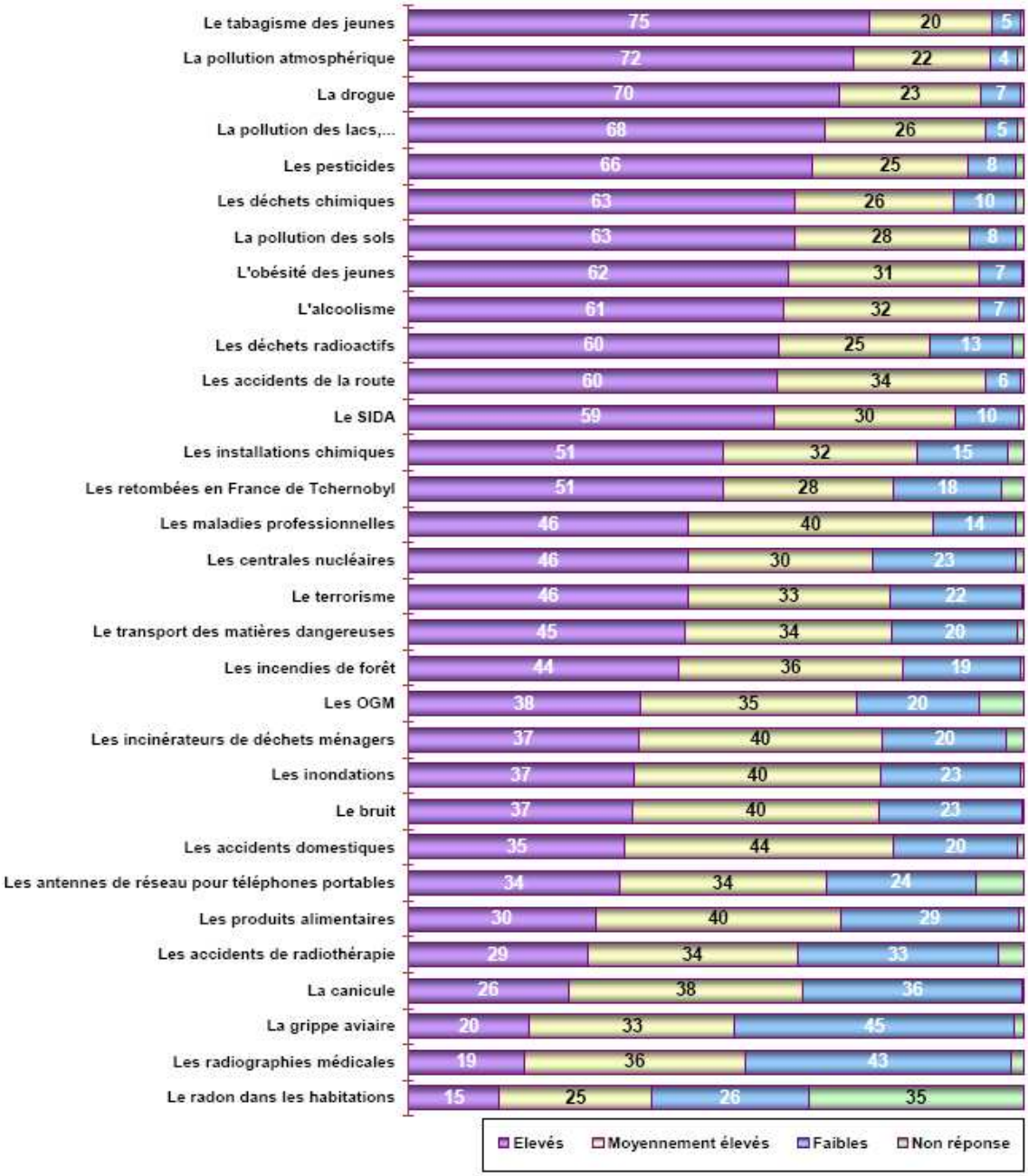
Mis en place depuis 1988, le baromètre IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) s'attache à suivre l'évolution au cours des années des préoccupations des français vis-à-vis *de divers risques environnementaux, leurs jugements sur les dangers associés à ces risques, leur opinion sur l'expertise scientifique, la confiance accordée aux autorités et la crédibilité de l'information donnée*.

Pour l'édition 2008, 1 002 personnes ont été interrogées entre le 20 novembre et le 12 décembre 2007, en face à face, par la méthode des quotas, par l'institut de sondage BVA.

Les stations de base de téléphonie mobile ne représentent pas un risque majeur pour les français

Sur 31 situations à risque proposées dans le questionnaire, le risque lié aux stations de base de téléphonie mobile est en 21ème position avec 34 % de personnes estimant un risque élevé et 34 % moyennement élevé. Ce risque est estimé faible pour 24 % de la population. 5 % des personnes interrogées n'ont pas répondu à cette question.

Tableau 31 : Les risques auxquels les français se sentent exposés (« Dans chacun des domaines suivants, considérez-vous que les risques pour les Français en général sont »)



L'évolution depuis les années 2002 montre une inversion des tendances :

- en 2002, 27% des personnes interrogées percevaient le risque lié aux stations de bases de téléphonie mobile comme élevé contre 34% en 2007 ;
- 38% des des personnes interrogées percevaient le risque lié aux stations de bases de téléphonie mobile comme faible en 2002 contre 24% en 2007.

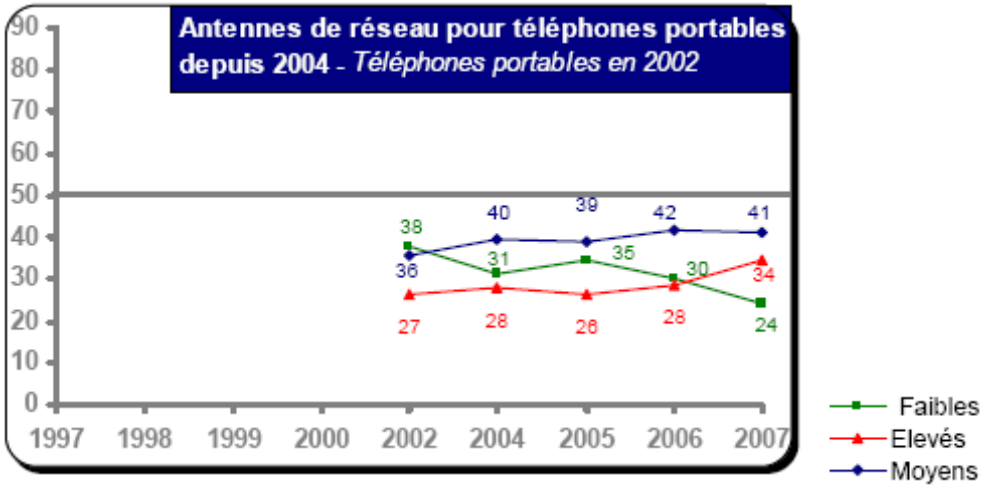
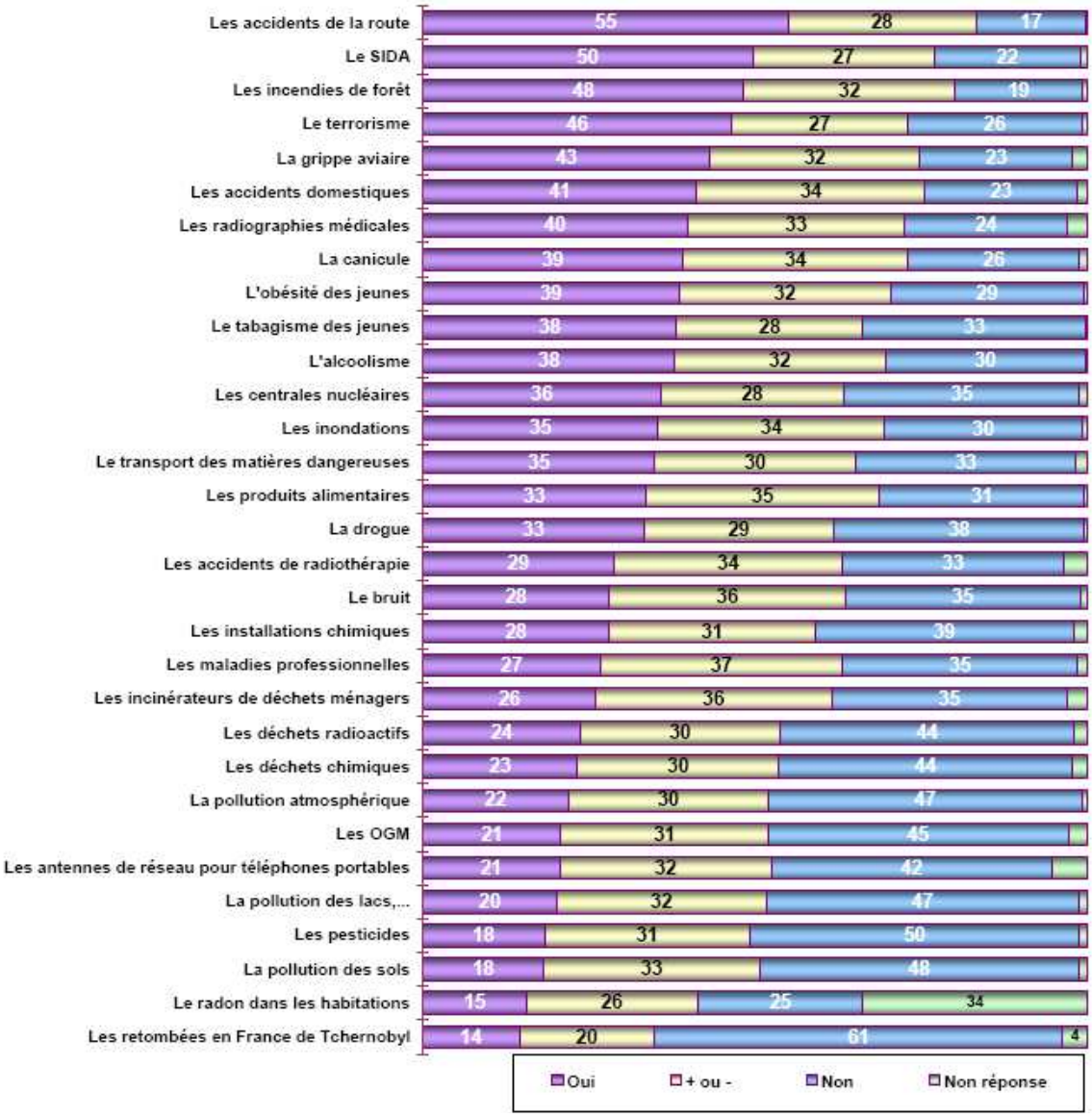


Figure 26: Evolution de la perception des risques liés aux stations de base de téléphonie mobile

La confiance dans les autorités françaises pour les protéger des risques associés aux stations de base de téléphonie mobile est assez faible

La confiance accordée aux autorités pour protéger les français des risques liés aux stations de base de téléphonie mobile est faible : seules 21 % de personnes déclarent avoir confiance, 32 % avoir plus ou moins confiance, et 42 % ne pas avoir confiance. Ce sujet est un de ceux pour lesquels les français sont les plus méfiants vis-à-vis des autorités publiques : il arrive en 26ème position sur les 31 situations de risques environnementaux proposées.

Tableau 32 : La confiance accordée aux autorités par les français pour les protéger (« Avez-vous confiance dans les autorités françaises pour leurs actions de protection des personnes dans les domaines suivants ? »)



Le jugement est relativement stable depuis les années 2004 bien qu'en constante dégradation (36 % des personnes interrogées déclaraient ne pas avoir confiance dans les autorités pour les protéger des stations de bases de téléphonie mobile en 2002 contre 42 % en 2007)..

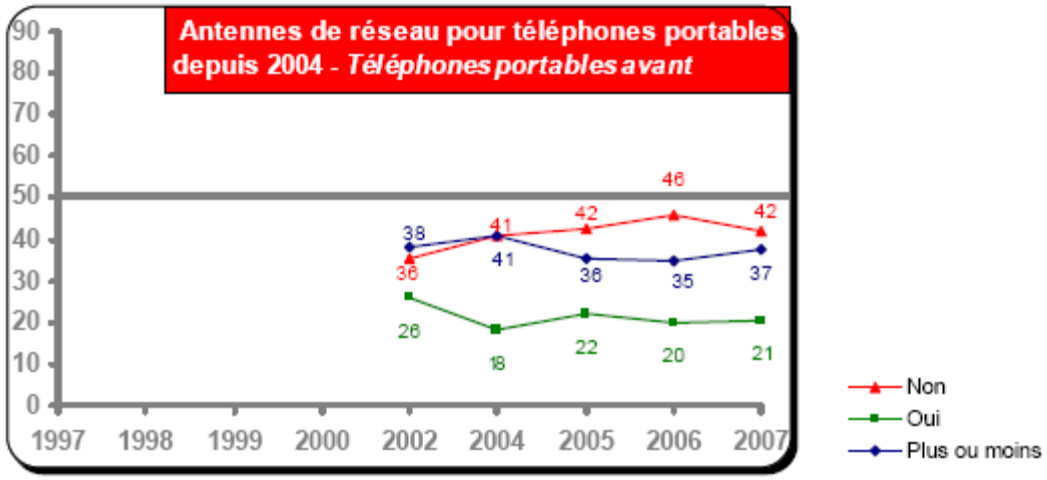
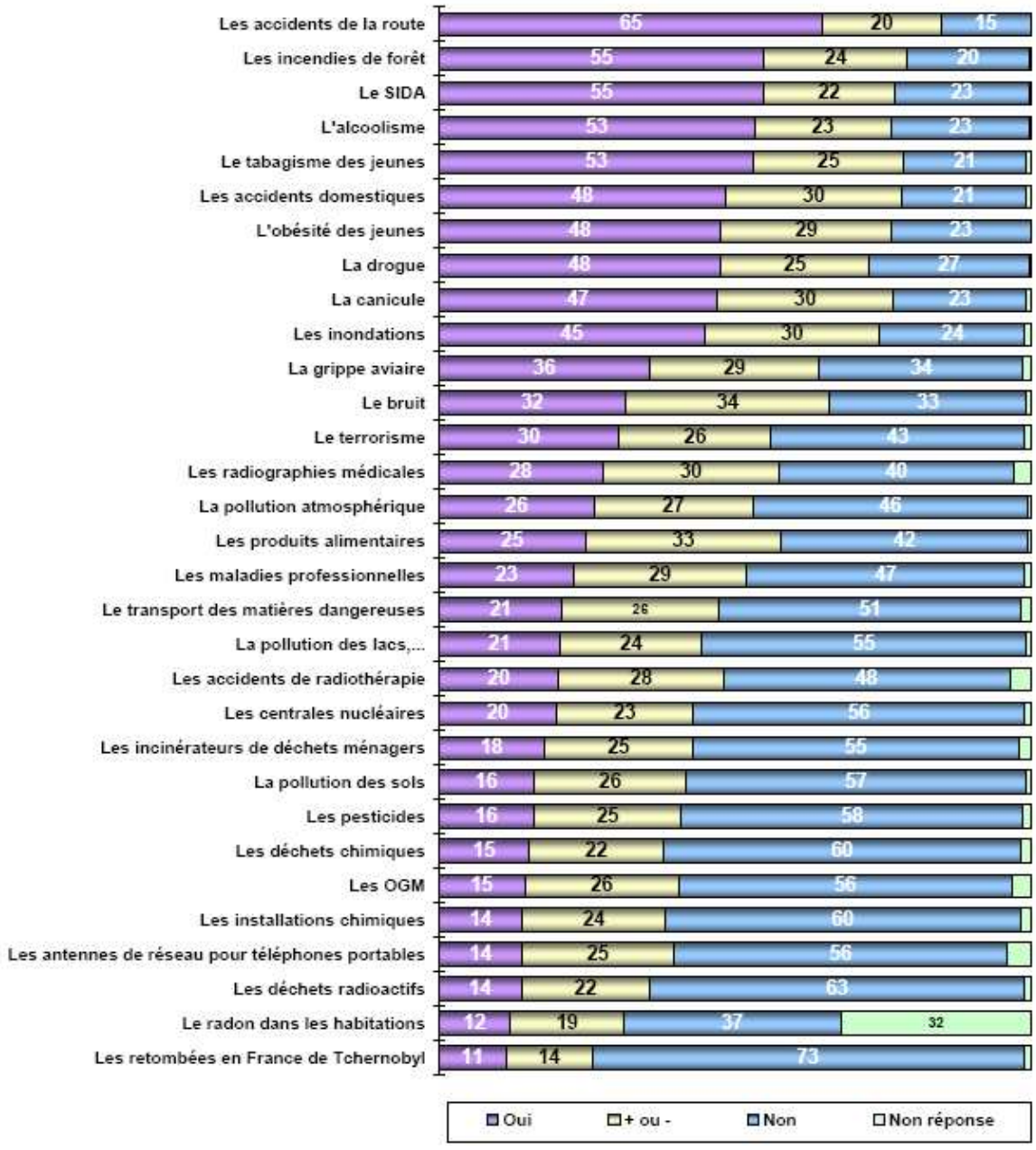


Figure 27 : Evolution de la confiance accordée aux autorités par les français pour les protéger des stations de bases de téléphonie mobile depuis 2004

Les informations diffusées sur les dangers associés aux stations de base de téléphonie mobile sont jugées assez peu crédibles.

En effet, à la question « pour chacun des domaines suivants estimez vous que l'on dit la vérité sur les dangers qu'il représente pour la population », les réponses positives viennent en 26ème position par rapport aux 31 autres risques environnementaux avec seulement 14 % de oui, 25 % de plus ou moins d'accord, et 56 % de non.

Tableau 33 : La vérité des informations sur les dangers (« Pour chacun des domaines suivants, estimez-vous que l'on dit la vérité sur les dangers qu'il représente pour la population ? »)



Les avis sont assez stables depuis 2004 mais on constate une augmentation de réponses négatives quand on passe de l'interrogation sur les téléphones mobiles faite en 2002 et 2003 à celle portant sur les stations de base de téléphonie mobile en 2004, les pourcentages passent de 42 % à 54 % en 2002 pour atteindre 56 % en 2007.

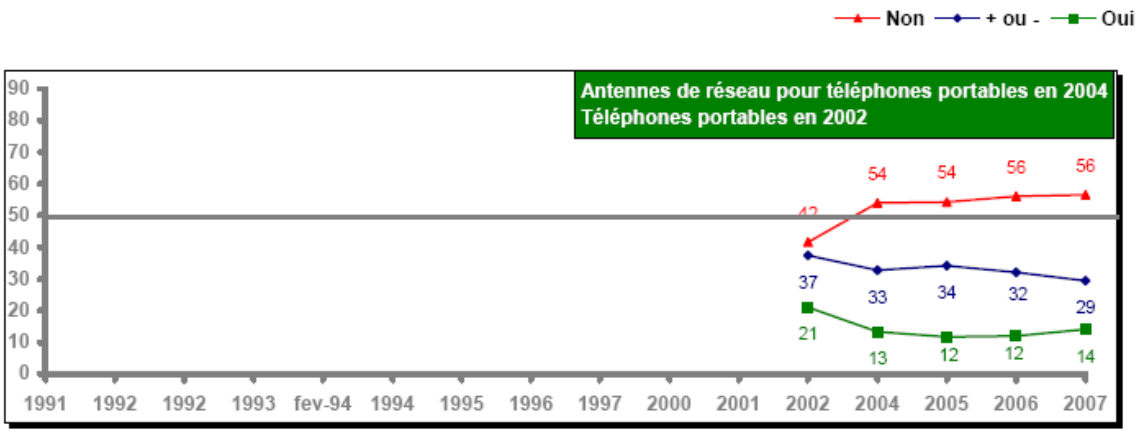


Figure 28 : Evolutions de la confiance dans les informations diffusées sur les dangers liés aux stations de base de téléphonie mobile depuis 2002

Les stations de base de téléphonie mobile viennent en tête des « installations à risque » où les personnes interrogées accepteraient éventuellement de vivre

En effet, 33 % de personnes accepterait de vivre près d'une antenne contre 64 % qui ne l'accepteraient pas. Ces résultats viennent en dernière position des réponses négatives.

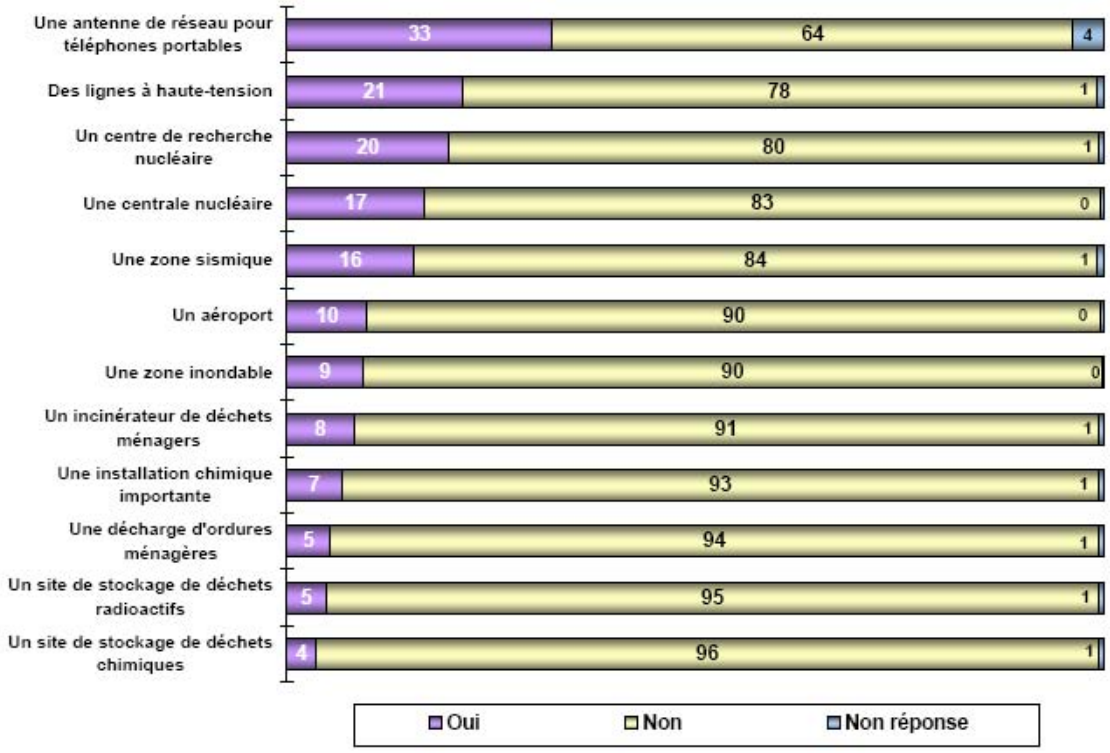


Figure 29 : Acceptabilité des installations à risques (« Accepteriez-vous de vivre près de »)

Le chiffre de refus de vivre prés d'une station de base de téléphonie mobile a tendance à augmenter car il passe de 50 % en 2004 à 64 % en 2007.

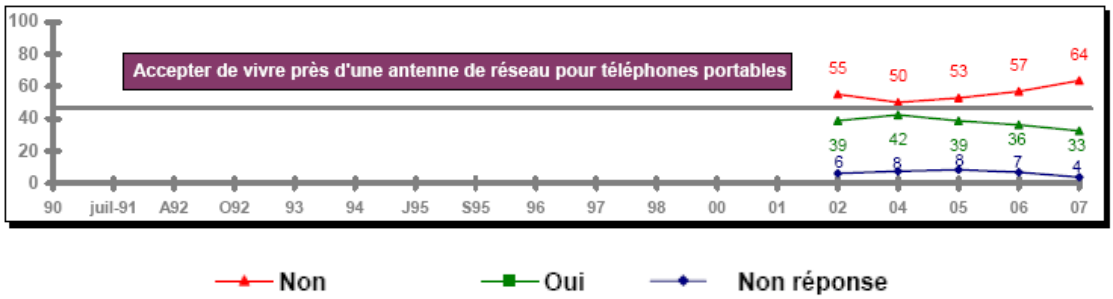


Figure 30 : Evolution de l'acceptabilité des installations à risques

7.2.4 Eurobaromètre spécial sur les champs électromagnétiques 2007

L'enquête s'est déroulée du 6 au 8 octobre 2006, sur un échantillon tiré au sort (méthode probabiliste) en face à face, au domicile des personnes sur 28 584 personnes des 25 pays de l'Union Européenne dont 1 022 personnes interrogées en France.

Les antennes relais de téléphonie mobile ainsi que les téléphones mobiles ne viennent pas en tête des facteurs environnementaux perçus comme affectant la santé

En effet, sur une liste de 15 facteurs, les antennes-relais et les téléphones mobiles viennent respectivement en 11^{e} et 13^{e} position. 36 % des personnes interrogées pensent que les antennes-relais affectent beaucoup leur santé, et 28 % que les téléphones mobiles affectent beaucoup leur santé.

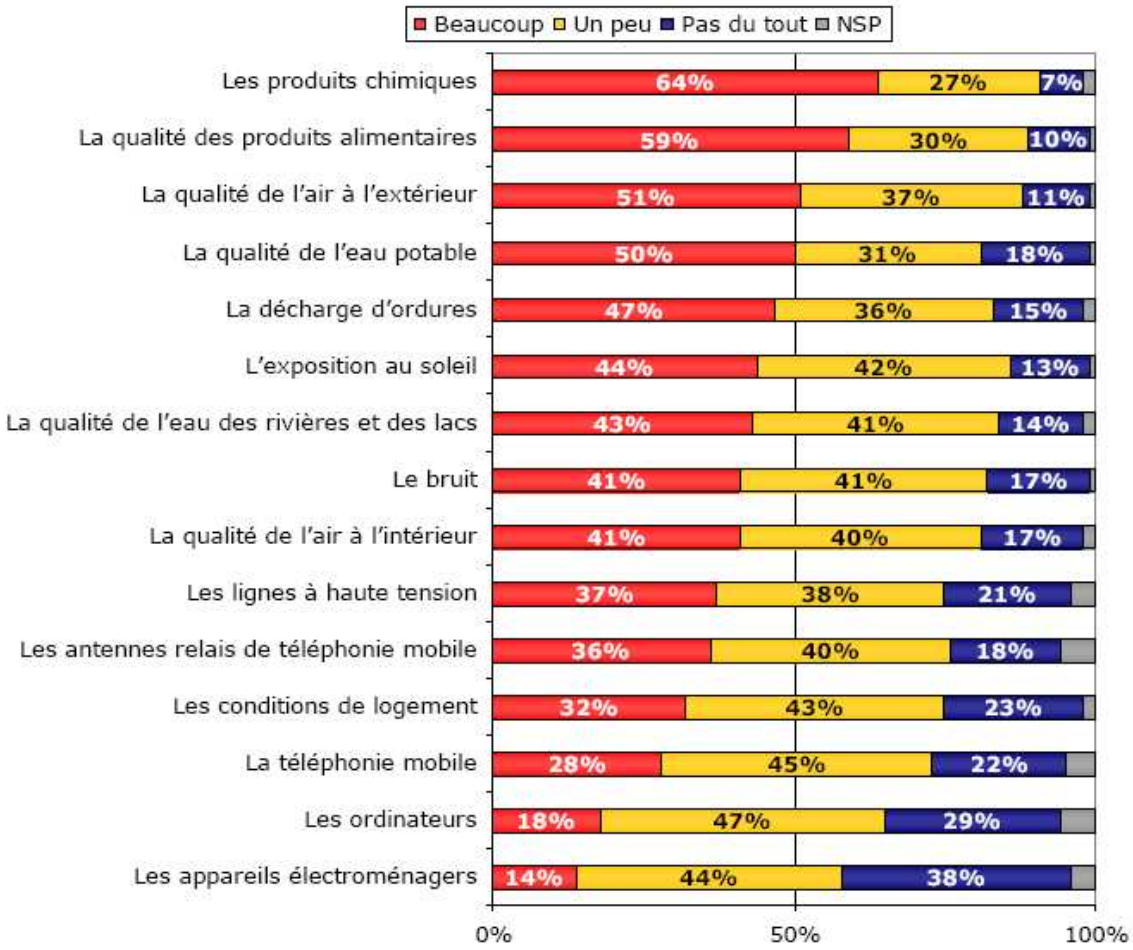


Figure 31 : Pour chacun des facteurs suivants, pouvez-vous me dire dans quelle mesure vous pensez qu'ils affectent votre santé - % UE25

Entre 2002 et 2006, le pourcentage de personnes qui estiment que le facteur « téléphonie mobile » affecte la santé a augmenté, passant de 55 % à 73 % (en regroupant les réponses « un peu » et « beaucoup ») De même, alors que 58 % des personnes estimaient en 2002 que les stations de base de téléphonie mobile étaient susceptibles d'affecter (un peu ou beaucoup) leur santé, ils étaient 76 % de cet avis en 2006.

L'eurobaromètre estime que les européens ont une certaine connaissance des sources de champs électromagnétiques : en tête les téléphones mobiles puis les antennes. Interrogées sur les objets pouvant émettre des champs électromagnétiques, les personnes citent les téléphones mobiles et les antennes-relais en première position.

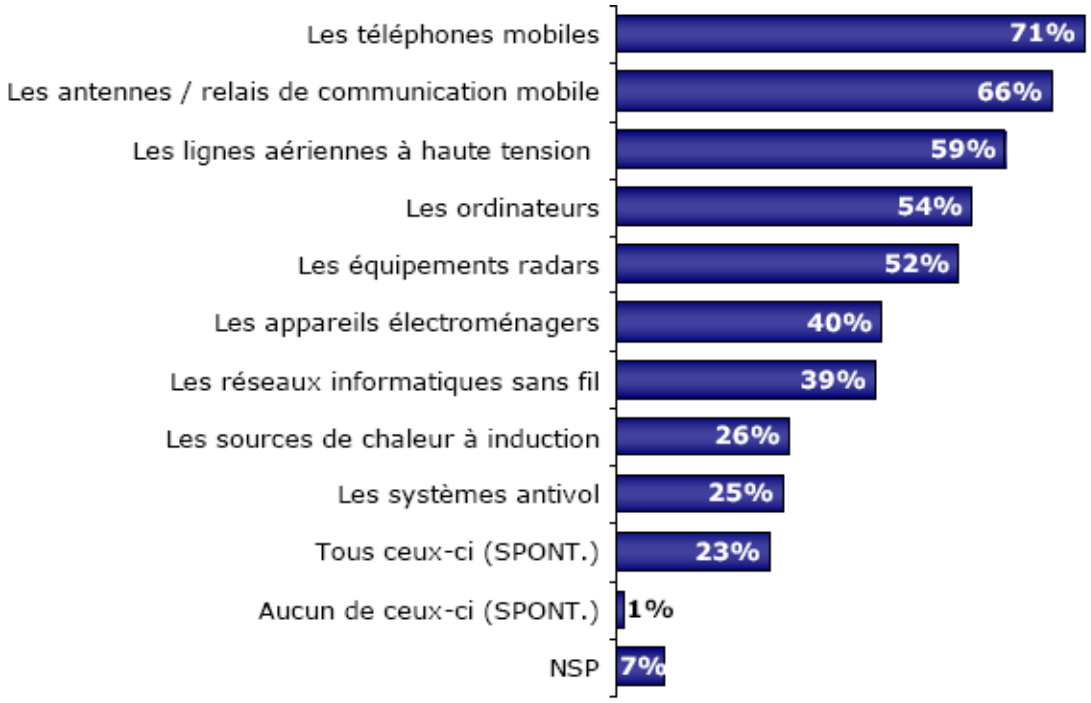


Figure 32 : D'après ce que vous savez, parmi les objets suivants lesquels peuvent émettre des champs électromagnétiques ? - UE25 (Plusieurs réponses possibles)

On observe une certaine disparité dans les réponses entre les pays ; ainsi, en Grèce, 96 % des personnes interrogées pensent que les téléphones mobiles constituent une source de champs EM, 92 % en Suède et à l'autre extrémité de l'échelle, 45 % à Malte et 53 % en Irlande. Les Français ont une position médiane : ils sont 78 % à déclarer que les téléphones mobiles peuvent émettre des champs électromagnétiques. Par ailleurs, 69 % des français pensent que les stations de base de téléphonie mobile émettent des champs électromagnétiques.

La préoccupation concernant les risques pour la santé des champs électromagnétiques divise la population en deux parties sensiblement égales.

Les personnes qui se disent très et plutôt préoccupées par les risques potentiels pour la santé des champs électromagnétiques représentent 48 % des personnes interrogées dans l'Eurobaromètre, tandis que 49 % de la population déclare n'être pas ou pas du tout préoccupée par ce risque.

Une forte disparité règne dans l'Union européenne : ainsi 27 % des Suédois, 28 % des Finlandais, 30 % des Danois et 31 % des Tchèques, Estoniens Hongrois, Néerlandais se montrent préoccupés par le sujet, alors que 69 % des Italiens, 82 % des Chypriotes, et 86 % des Grecs le sont. La France se situe en position médiane avec 52 % de la population préoccupée par ce risque.

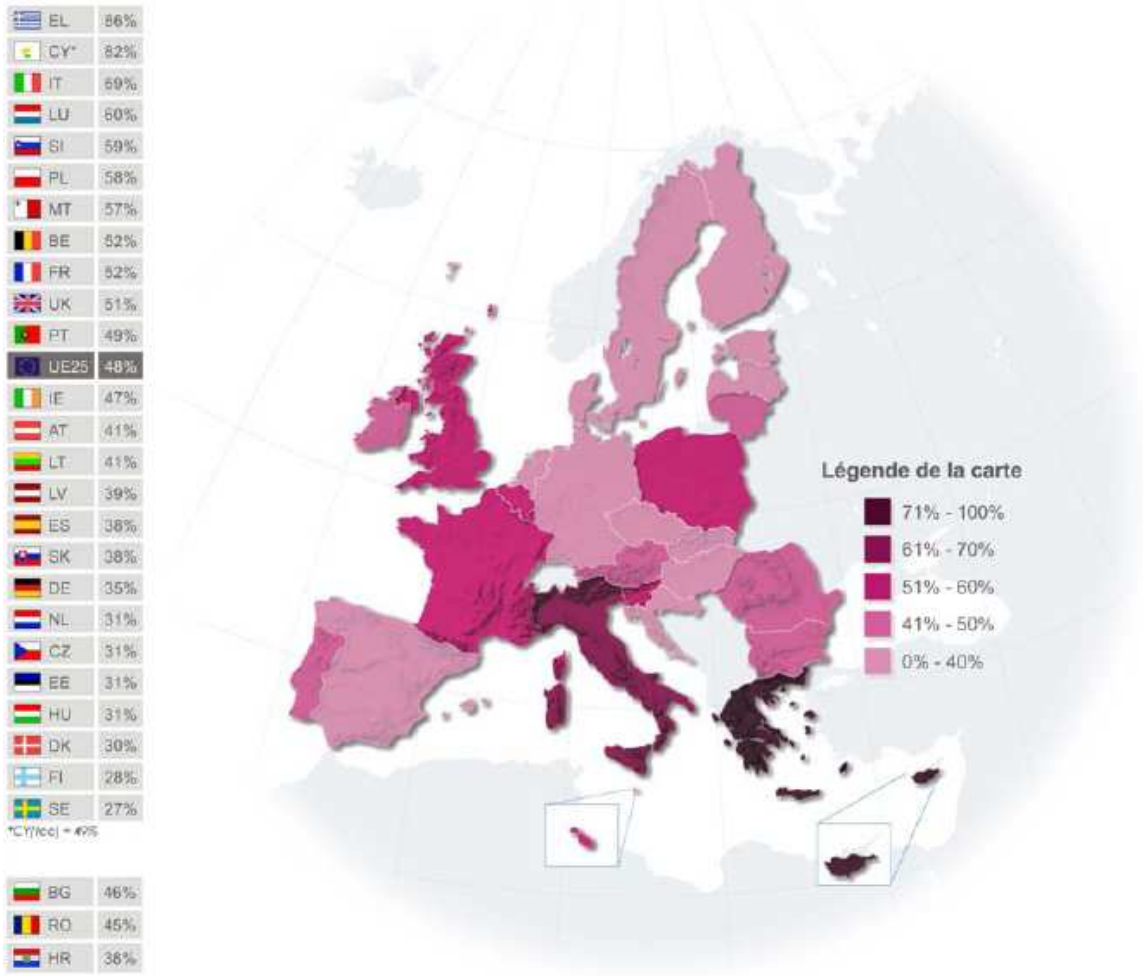


Figure 33: Etes vous préoccupé(e) par les possibles risques pour la santé liés aux champs électromagnétiques ? (Réponses : Très préoccupé(e) + plutôt préoccupé(e))

Toujours selon l'Eurobaromètre, les Européens sont assez insatisfaits de l'information reçue au sujet des risques possibles sur la santé liés aux champs électromagnétiques:

Deux tiers (65 %) des citoyens de l'UE ne sont pas satisfaits des informations qu'ils reçoivent au sujet des risques possibles sur la santé liés aux champs électromagnétiques. Cette proportion atteint 81 % au Portugal, 83 % à Chypre et 87 % en Grèce. En France, 70 % des personnes interrogées ne se déclarent pas satisfaites de l'information reçue sur ce sujet.

Les citoyens les plus préoccupés par les risques sur la santé sont aussi ceux qui se sentent les moins bien informés.

Parmi les 48 % des citoyens de l'Union européenne préoccupés par les champs électromagnétiques, on trouve des taux très importants d'insatisfaction à l'égard des informations sur les risques possibles pour la santé. Trois quarts des personnes qui font partie de ce groupe, ne sont pas satisfaites de l'information.

De plus, dans 14 des 28 pays étudiés, la majorité des personnes interrogées sont à la fois insatisfaites des informations reçues et préoccupées par les risques possibles, c'est tout particulièrement vrai en Grèce et à Chypre.

Par contre, plus d'un tiers des répondants en Suède, en Finlande et au Danemark déclarent être satisfaits des informations reçues et ne pas être inquiets des risques possibles liés aux champs électromagnétiques.

Les résultats de ce baromètre indiquent que le niveau d'études des répondants ne semble pas influencer les résultats.

Le manque d'information constitue le principal motif d'insatisfaction

Dans les motifs d'insatisfaction quant aux informations reçues sur les risques possibles pour la santé des champs électromagnétiques, nous trouvons dans l'ordre décroissant : l'information est insuffisante 50 %, l'information n'est pas objective 11 %, l'information n'est pas communiquée de manière objective 10 % ; l'information n'est pas fiable 9 %, l'information est compliquée 8 %, *etc*.

La source d'information préférée des européens est la télévision

La source d'information sur les risques possibles pour la santé des champs électromagnétiques préférée des personnes interrogées est la télévision avec 68 %, suivie des journaux et magazines (36 %), puis de la radio (17 %), des publications officielles (12 %) et spécialisées (11 %), d'Internet (11 %) et d'une correspondance spécialisée (8 %). Les autres sources ont des scores inférieurs à 5 %.

Globalement, la télévision est la source d'information la plus souvent mentionnée dans tous les pays. Au Portugal et en Lituanie ce média atteint les plus hauts scores qui sont respectivement de 80 % et 78 %.

Le choix de ce *media* est particulièrement populaire chez les personnes âgées de 55 ans et plus (72 %), ceux qui ont étudié jusqu'à 15 ans au moins 76 %, pour les personnes au foyer 76 %, pour les retraités 74 % et les chômeurs 73 %.

Le rôle des autorités publiques en ce qui concerne l'information donnée et l'efficacité des actions menées concernant les champs électromagnétiques n'est pas évalué de manière très positive.

Une forte majorité de citoyens de l'Union européenne (80 %) ne se sent pas correctement informée (47 % plutôt mal et 33 % pas du tout) sur le cadre juridique de protection contre les risques possibles pour la santé liés aux champs électromagnétiques.

On observe une forte disparité sur ce sujet selon les pays. Ceux ayant les plus forts taux d'insatisfaction vis-à-vis de l'information disponible sur le cadre juridique de protection contre les risques possibles sont le Portugal (89 %), l'Espagne (87 %) et la France (86 %).

60 % des citoyens des 25 pays de l'UE ont une vision négative des actions menées par les pouvoirs publics en matière de protection contre les champs électromagnétiques.

On observe des niveaux d'insatisfaction à ce sujet particulièrement élevés en Grèce (87 %) et à Chypre (75 %).

Le niveau d'insatisfaction est plus élevé parmi les citoyens qui sont préoccupés par les risques pour la santé des champs électromagnétiques (69 %) ainsi que parmi ceux qui ne sont pas satisfaits des informations reçues (71 %).

Plus des trois quarts (77 %) des citoyens de l'Union européenne qui déclarent être inquiets au sujet des champs EM et ne pas être satisfaits des informations liées aux aspects sanitaires dans ce domaine pensent que les autorités publiques n'agissent pas efficacement pour les protéger des risques possibles.

Les citoyens demandent prioritairement aux autorités publiques de mener des actions au niveau du pays (local, régional, national)

Plus de la moitié (54 %) des citoyens de l'UE (des 25) estiment que la responsabilité en matière de protection des citoyens contre les risques possibles des champs électromagnétiques devrait se faire au niveau du pays (national, régional ou local).

Les réponses les plus fortes se retrouvent en Finlande (71 %), en Suède (66 %), au Royaume Uni (65 %) et en Pologne (63 %). En France, 53 % des personnes interrogées estiment que le niveau national ou infra-national est le meilleur niveau pour développer des actions publiques en matière de protection vis-à vis-des champs électromagnétiques.

17 % des européens estiment que des actions devraient être menées au niveau européen.

19 %, soit près d'une personne sur cinq, pensent que les actions devraient être menées au niveau mondial, opinion partagée par 34 % des espagnols, 29 % des luxembourgeois sondés et 20 % des français.

Le choix le plus populaire pour l'ensemble des citoyens en matière d'implication des autorités publiques dans ce domaine demeure le niveau national, indépendamment du degré de préoccupation ou de satisfaction quant aux informations données sur les champs électromagnétiques.

7.2.5 Etude de perception des risques de la téléphonie mobile en Suisse

Une étude complète de perception des risques spécifiquement construite en Suisse (n = 1 015) sur la téléphonie mobile et les antennes-relais est présentée par Siegrist *et al.* (2005). Les conclusions de cette étude sont les suivantes :

- la téléphonie mobile et les antennes sont perçues comme de moindres sources de champs électromagnétiques que les lignes à haute tension ;
- la confiance envers les autorités est associée positivement avec les bénéfices de la téléphonie mobile et négativement avec les risques perçus ;
- les usagers fréquents de leur téléphone mobile perçoivent moins de risques et plus de bénéfices que les usagers occasionnels :
- les personnes pensant vivre près d'une antenne ne se différencient pas significativement dans leur niveau de risque perçu par rapport à celles pensant ne pas vivre à proximité d'une antenne.

7.2.6 Conclusion sur les enquêtes d'opinion

Les trois sondages présentés ci-dessus traitent de la perception des français en particulier (Baromètres INPES et IRSN) et des européens (Eurobaromètre spécial) vis-à-vis des risques pour la santé liés aux stations de base de téléphonie mobile et à l'utilisation de téléphone mobile mais de manière différente :

- l'énoncé d'un même thème n'est pas identique d'un baromètre à l'autre ni tout au long d'un même baromètre (« le téléphone portable », « les antennes de téléphonie mobile », « les antennes de réseau pour téléphones portables », « la téléphonie mobile », « les champs électromagnétiques », etc.) ;
- les autres risques environnementaux auxquels ceux-ci sont comparés sont différents ;
- les échelles de recueil de données sont variables (3, 4 ou 5 catégories) ;

Aussi, il semble très difficile de comparer finement les résultats de ces 3 sondages d'opinion.

Néanmoins, de manière globale, il ressort que :

- la téléphonie et / ou les antennes-relais ne semblent pas représenter un risque majeur pour les populations interrogées, comparé aux autres risques environnementaux proposés. Ils

constituent, cependant, une vraie préoccupation dans la population, avec une perception du risque moyenne à élevée selon les différents sondages.

- l'information donnée et sa qualité sont jugées assez négativement, sauf dans l'enquête de l'INPES 2007 où elles semblent être jugées positivement.
- le niveau de satisfaction vis-à-vis de l'expertise scientifique est moyen. Celui dans les pouvoirs publics est moyen à très mauvais, selon les sondages ;
- une dégradation de la confiance dans l'action des pouvoirs publics, de l'information technique voire de l'expertise est observée. Elle semble s'être récemment accélérée (entre les deux enquêtes de l'INPES en 2007 et en 2009).

Des biais liés à la traduction du questionnaire de l'eurobaromètre et à la sélection des échantillons de population ne peuvent être exclus.

Cependant, l'eurobaromètre a comme atout, par rapport aux deux autres sondages, d'avoir un point de vue plus global au niveau de l'Europe et de s'intéresser à toutes les sources des champs électromagnétiques, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres qui ne traitent que du téléphone mobile et /ou des antennes-relais.

Néanmoins, si ce sondage souligne de fortes disparités dans la perception des risques liés aux champs électromagnétiques selon les pays, aucun élément explicatif n'est donné. On peut penser que des différences liées au contexte culturel, au rapport au risque, au type d'information reçue, à la capacité de mobilisation des acteurs sociaux et à la gestion politique du sujet seraient susceptibles d'apporter un éclairage.

A l'occasion de leur audition par le Groupe de travail en charge de cette saisine, Danielle Salomon et Olivier Borraz ont fait référence à leurs études menées en Belgique, en Suisse, en France, en Italie et au Royaume Uni dans lesquelles ils expliquent certaines différences culturelles par un contexte national parfois très particulier avec des références à des crises qui ont mis en cause les experts ou les pouvoirs publics, ou les deux, c'est notamment le cas de la vache folle en Grande Bretagne et de crises alimentaires en Belgique.

Ils estiment aussi que les groupes d'experts n'ont pas la même définition du principe de précaution, assez étroite en France, plus large en Suisse et en Angleterre.

Ils citent également dans l'explication de certaines différences culturelles, l'organisation politico-administrative des pays, le fait qu'ils soient plus ou moins fortement décentralisés comme c'est le cas en Suisse, en Belgique, en Italie ou au contraire très centralisés comme en France et en Grande Bretagne.

Les événements récents qui sont intervenus en France à la suite d'actions de justice (démontage d'antennes *etc*.), l'introduction au quotidien et le développement de nouvelles technologies, peuvent avoir un impact non négligeable sur l'évolution des perceptions, attitudes et représentations de la population vis-à-vis des risques liés aux champs électromagnétiques qu'il convient de suivre finement.

7.3 Coûts et bénéfices associés aux RF

7.3.1 Analyse coûts / bénéfices

L'évaluation économique qui se fonde sur l'analyse coûts bénéfices (ACB) permet de comparer, par exemple, des gains sociaux en termes de qualité de la vie ou de réduction de la mortalité et de la morbidité aux coûts monétaires de la prévention en convertissant l'ensemble des conséquences en « équivalent monétaire ». Il s'agit d'un outil d'aide à la décision permettant de comparer les coûts et les bénéfices de deux scénarios. L'analyse coûts bénéfices (ACB) est communément utilisée aux Etats-Unis (où elle fait même l'objet d'une obligation légale), et dans les pays anglo-saxons et scandinaves mais l'est très peu en France. Dans le domaine de la gestion des questions

liées aux effets sanitaires des radiofréquences, aucune analyse coûts bénéfices n'a été identifiée. N Treich, de l'école d'économie de Toulouse, propose deux explications à cela (*cf*. annexe 3.4 – contribution écrite) :

- « Il est difficile de faire une ACB dans un contexte d'incertitude scientifique. En effet, une ACB compare les coûts et les bénéfices de différents scénarios. Si les conséquences des différents scénarios sont impossibles à calculer, une ACB est impossible. »
- « Une ACB évalue en général une décision publique. Ainsi faut-il justifier au préalable l'intervention des pouvoirs publics. Cette intervention est classiquement justifiée s'il y a une défaillance de marché, typiquement une externalité comme la pollution. Mais quelle est la défaillance de marché dans le cas de la téléphonie mobile ? Si les consommateurs peuvent librement décider d'acheter et utiliser un bien qui ne génère pas d'externalités, la justification à l'intervention des pouvoirs publics n'est pas claire. Pourquoi ne pas laisser les citoyens appliquer une analyse coût bénéfice à un niveau individuel ? Une politique de restriction de la consommation pourrait être qualifiée de paternaliste. L'ACB est mal adaptée pour évaluer les politiques paternalistes. »

La seule ACB identifiée dans le domaine de la téléphonie mobile est une étude américaine qui portait sur une mesure visant l'interdiction de l'utilisation du téléphone mobile au volant d'un véhicule motorisé (2003).

7.3.2 Perception des coûts et bénéfices

Dans le contexte français, il paraît possible d'inférer un niveau de bénéfice perçu comme élevé si l'on s'en tient à l'étude récente (échantillon représentatif de la population française, n = 1 505) réalisée par l'INPES (2009). En effet, 85 % des personnes interrogées considèrent que le téléphone est "une bonne chose" (64 % une "assez bonne chose", 21 % une "très bonne chose").

Henson *et al.* (2008) ont réalisé une étude comparative de perception des risques et bénéfices associés à différentes technologies alimentaires et non alimentaires, dont la téléphonie mobile au Canada. Alors que certaines technologies, comme l'énergie solaire, sont associées à des bénéfices élevés et des risques faibles, d'autres, comme les hormones dans l'alimentation, sont associées à un bénéfice faible et un risque élevé. Intermédiaire entre ces bornes, la téléphonie mobile est perçue comme présentant plus de bénéfices que de risques, ces deux catégories se trouvant dans une zone moyenne élevée.

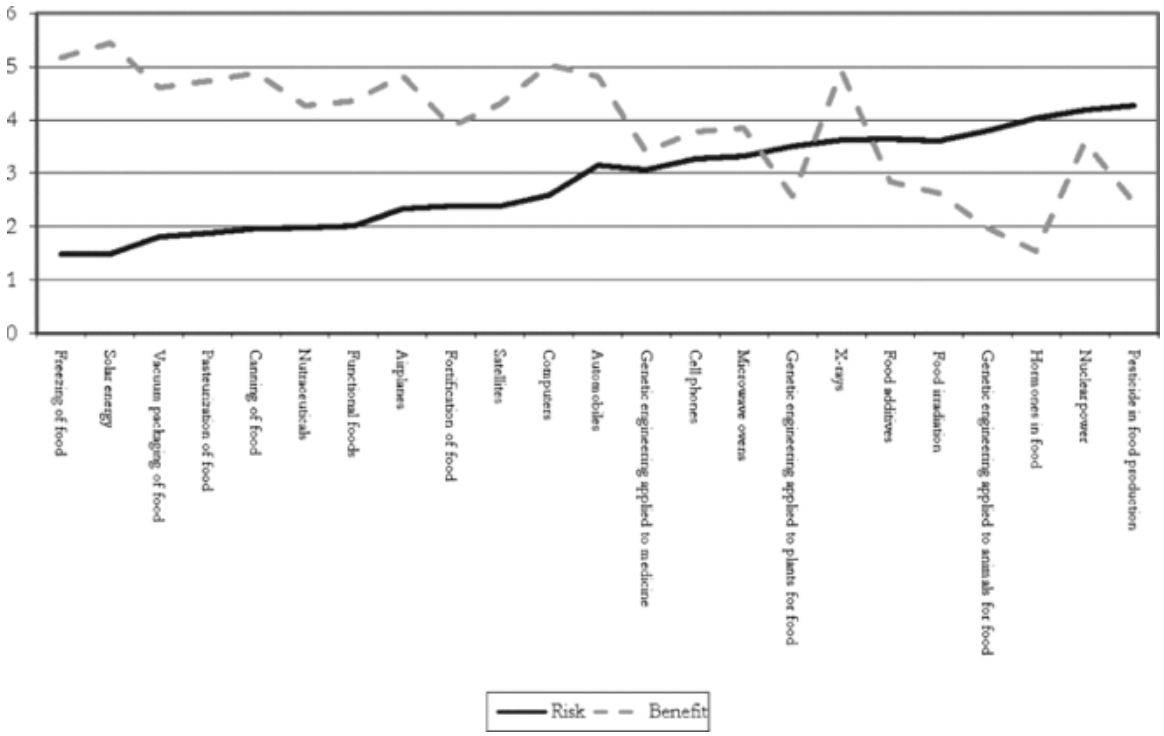


Figure 34 : Comparaison de la perception des risques et bénéfices associés à différentes technologies (Henson *et al.* 2008)

Dans cette même étude, Henson *et al.* (2008) ont réalisé une analyse factorielle pour présenter les 21 technologies d'intérêts selon trois axes principaux :

- le premier représente le niveau de risque perçu associé à la technologie (il est borné par les notions de dangers, cause de contamination, impact environnemental négatif, *etc*. d'un coté et les notions d'utilité, de sécurité et de confiance de l'autre) ;
- le second représente le niveau de bénéfice perçu associé à la technologie (il est borné par les notions d'inquiétude et d'incertitudes d'un coté et les notions de nécessité, de bénéfice contrôlé, *etc*. de l'autre) ;
- et le troisième représente le niveau de confiance dans la technologie (il est borné par les notions d'inquiétude de risque de cancer et de contamination d'un coté et les notions d'utilité, de bénéfice et de confiance de l'autre).

En raison de sa position très proche du milieu des deux premiers axes, il est difficile de dire avec précision les variables qui interviennent dans la perception des risques et bénéfices liés au téléphone. Cependant, le schéma ci-dessous semble montrer que cette population a faiblement confiance dans les téléphones mobiles.

Figure 35 : localisation de différentes technologies en fonction du 1er et du 3ème axe d'une analyse factorielle (Henson *et al.* 2008)

7.4 Aspects psychosociaux et impacts socioculturels liés au développement des technologies RF

Le déploiement des télécommunications hertziennes s'inscrit dans les politiques de grands aménagements du territoire, au même titre qu'ont pu l'être l'électrification du territoire et le développement du réseau ferré.

Intuitivement, chacun comprend que l'électrification du territoire français pendant le XXeme siècle a induit d'importantes transformations impactant les personnes et les populations, alors qu'il paraît bien difficile sinon impossible, même avec un certain recul, de se représenter toute l'étendue ou de définir l'ensemble des caractéristiques desdites transformations. Une difficulté similaire se présente avec les technologies utilisant des radiofréquences dont le développement récent a de plus été particulièrement rapide, notamment dans le cas de la téléphonie mobile.

Pour dépasser cette difficulté, la méthode retenue consiste dans un premier temps à considérer le rapport social aux risques technologiques, au sein desquels prennent place les technologies utilisant des radiofréquences. Ce positionnement des technologies radiofréquences, et notamment la téléphonie mobile parmi d'autres technologies, est complémentaire de l'approche taxinomique utilisée dans les études de perception des risques (*cf.* chapitre 7.2), lesquelles recourent à des listes d'objets ou de situations à risques de natures diverses et ne se limitant pas aux seules technologies. Ensuite, au-delà de ce premier positionnement et pour caractériser plus avant les dimensions psychologique et sociale, nous considèrerons les éléments se rapportant directement à la diffusion massive des technologies utilisant des radiofréquences : en premier lieu le taux

d'équipement et les développements prévisibles, mais aussi les nombreuses études physiques et biologiques consacrées notamment aux risques de la téléphonie mobile, ainsi que la dynamique sociale de production et d'appropriation des informations s'y rapportant. Seront considérés également les pratiques et usages de la téléphonie mobile, ainsi que les effets de l'information présentant les risques ou controverses associés aux radiofréquences.

7.4.1 RF et rapport aux risques technologiques

L'exemple des « périls du sans fil » il y a près d'un siècle (*cf.* chapitre 7.1) signale que le rapport aux risques technologiques est ancien, cependant que la recherche dans ce domaine est plus récente.

La recherche en sciences humaines et sociales du risque montre en effet que le développement de technologies et de leurs applications ne va pas sans susciter diverses mobilisations dans les sociétés démocratiques, concernant aussi bien leur dangerosité supposée ou avérée, que leur appropriation ou rejet, ou même leur « détournement » par rapport à l'usage initialement prévu (voir le cas du *Minitel* analysé sous cet angle par Laulan, [Laulan, 1985]). La question du rapport individuel et collectif aux risques technologiques s'est donc déjà posée avant le développement de la téléphonie mobile. Ainsi, dans le contexte français, Lefaure et Moatti [Lefaure et Moatti, 1983], dans leurs réflexions consacrées aux ambiguïtés de l'acceptable, s'intéressent-ils à la perception des risques et aux controverses sur les technologies. Plus globalement, le fort développement de technologies pendant la deuxième moitié du XX^{eme} siècle s'est accompagné, outre les effets bénéfiques pour la société, d'un potentiel catastrophique en cas d'accident. Les risques technologiques ont des caractéristiques propres : la survenue des accidents les plus graves est rare, d'autres conséquences redoutées peuvent apparaître avec des délais dans le temps et paraissent complexes à évaluer *a priori*.

De plus, les évaluations probabilistes utilisées pour définir quantitativement l'acceptabilité d'un risque au regard des bénéfices attendus et comparativement à d'autres risques, semblent difficiles à communiquer compte tenu de l'attention accordée de préférence par les médias et le public à la nature des conséquences [Slovic, 2000]. On notera que J.B. Comby [J.B. Comby, 2008], retrouve un phénomène similaire dans le traitement médiatique du changement climatique : la place accordée aux conséquences est privilégiée par rapport à celle accordée aux causes. Il serait utile de vérifier si, dans le cadre de la téléphonie mobile, le même phénomène se reproduit : il pourrait se trouver à l'origine d'une difficulté de compréhension réciproque entre les acteurs selon qu'ils privilégient les causes ou les conséquences supposées.

On notera également que les données se rapportant aux risques sanitaires associés aux radiofréquences ne permettent pas aujourd'hui de faire d'évaluations probabilistes du risque ni de développer des scénarios d'impact. Cette situation d'incertitude laisse la place à la simplification en un « tout ou rien » binaire. Cette binarité est propice à la polarisation des points de vue extrêmes. (*cf.* audition de D. Salomon du 1er avril 2009 en annexe 3.4).

Il ne semble pas davantage possible d'établir des comparaisons de risques, au sens de celles réalisées en analyse des risques : Karipidis [Karipidis, 2007 la] remet ainsi en question la comparaison parfois reprise par les médias entre radiofréquences, tabac et amiante, dans la mesure où les données actuelles ne permettent pas d'établir que l'exposition aux radiofréquences constitue un danger pour la santé.

Le développement et la diffusion de cette technologie sous ses différentes formes et dans une espèce de continuité avec des équipements existants et familiers semble s'être décidée *de facto* et sans études de risques préalables. Pouvant contribuer à un effet de familiarité, la liste des objets technologiques présentant une source de radiofréquences dans la vie quotidienne est longue : téléphone sans fil, ordinateur, Wi-Fi, four micro-ondes, plaques à induction, etc. (*cf.* chapitre 2.2.1). De plus cette liste va vraisemblablement s'allonger, tout comme le temps consacré à l'utilisation

des ces applications si l'on considère les développements prévus dans ce domaine : l'Arcep[130] estime ainsi par exemple que « la croissance et la diversification des applications sans fil devraient largement se poursuivre dans les prochaines années, en fonction notamment du rythme de la croissance des utilisations et des besoins ainsi que de l'innovation technologiques ». Se pose alors la question de la nécessité de réaliser des études préalables à leur commercialisation visant tant la recherche de potentiels effets biologiques que sociaux [Vecchia, 2003 la].

Les technologies radiofréquences peuvent s'inscrire dans une perspective relativement récente du rapport social aux risques, lequel a été étudié pour l'essentiel à partir des années 1970. Toutefois, les technologies radiofréquences diffèrent des technologies ayant alors retenu l'attention des populations et celle des chercheurs (technologies de l'énergie et de l'industrie notamment, concentrées spatialement et caractérisées par un risque d'accident rare mais potentiellement destructeur). Les technologies radiofréquences sont en effet et le plus souvent décentralisées et souvent individualisées, familières et présentes dans le milieu domestique et, si un risque leur est associé, il est de nature chronique et lié à une exposition quasi-continue avec des sources diverses.

Dans un domaine physiquement différent, celui des champs électromagnétiques de diverses sources (lignes HT, ordinateurs, équipement ménager), Mitchell et Cambrosio, [Mitchell et Cambrosio, 1997] montrent comment les champs électromagnétiques sont devenus une forme de pollution environnementale, avec les difficultés de mesurer et de définir les « niveaux », « l'exposition », et le « risque » pour la santé (guillemets des auteurs).

Pour plusieurs auteurs, les radiofréquences accèdent au statut de risque environnemental (terminologie utilisée notamment dans le cadre du California EMF Program, 2002). Ainsi dans son étude de l'inégalité environnementale, Briggs *et al.* [Briggs *et al.,* 2008, la] incluent les radiofréquences parmi les pollutions environnementales, au même titre que le trafic routier, l'industrie, les résidus chimiques dans l'eau du robinet et le radon. La notion de risque environnemental paraît couvrir ici aussi bien les « expositions » à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitat.

L'attention portée aux antennes et aux risques qu'elles représentent, en tant qu'équipement collectif, contraste avec le rapport au téléphone mobile lui-même et qui reste comme à l'abri d'une remise en question au sein de la sphère privée. Il peut aussi se concevoir comme un risque choisi en contraste avec celui des antennes qui serait un risque subi, si l'on se réfère à une dimension classique de la perception des risques.

Par ailleurs, le rejet des antennes-relais de téléphonie mobiles se fait, non pas en tant que rejet d'un risque global existant dans toute la France voire dans le monde entier, mais plutôt comme le rejet d'un équipement gênant se trouvant dans un voisinage immédiat : ce qui est contesté est moins l'implantation d'antennes-relais en tant que telle mais leur implantation à proximité de son lieu de vie ou de travail (Il s'agit ainsi d'un exemple de l'effet « Nimby » : *Not in my backyard*, pas dans mon arrière-cour).

Un des premiers cas d'opposition réussie à l'installation d'une antenne relais est décrit par Chapman et Wutzhe [Chapman et Wutzhe, 1997] en Australie : il concerne un projet d'antenne près d'une école maternelle. En France, c'est principalement, sur la base de « trouble anormal de voisinage » que les jugements récents ont été prononcés pour démonter des antennes. Un effet de stigmatisation peut, sur cette base, s'associer aux antennes et à la technologie qu'elles représentent. Dans le domaine des risques, le *stigma* renvoie à une « chose qui doit être contournée ou évitée non seulement parce qu'elle est dangereuse mais parce qu'elle inverse ou détruit un état positif ; ce qui est ou devrait être une bonne chose est maintenant marqué comme

[130] *Cf.* Contribution écrites de l'ARCEP et de l'AFOM en annexes 3.4.

étant flétri ou corrompu » [Gregory *et al.*, 1995]. L'impact économique d'une telle stigmatisation est abordé par McDonough [McDonough, 2003, la] sous l'angle de l'esthétique et des préoccupations pour la santé, pour conclure que les antennes-relais peuvent constituer un facteur négatif dans l'évaluation de biens résidentiels.

En contraste avec cette stigmatisation des antennes, le téléphone mobile s'inscrit le plus souvent dans une sphère de proximité acceptée et de familiarité. Dans leur passage en revue des principaux résultats traitant du rapport social au risque, Kuzma *et al.* [Kuzma *et al.,* 2008] relèvent que celui-ci ne peut se réduire au seul niveau quantitatif de l'évaluation du risque. La recherche montre notamment que les attitudes sont influencées par plusieurs facteurs, et ces auteurs différencient ainsi les risques selon qu'ils sont volontaires ou involontaires, naturels ou créés par l'homme, contrôlables ou incontrôlables, familiers ou non-familiers, en s'appuyant sur les travaux de Rasmussen [Rasmussen, 1981] et de Slovic [Slovic, 1987]. Le rapport à un risque et son « acceptabilité sociale » ne sont donc pas uniquement déterminés par sa source (radiofréquences) ou par son impact sanitaire.

La proximité généralisée et quasi-continue des technologies radiofréquences en font des objets associés à des pratiques et usages familiers, malgré la sophistication et la concentration technologique que représentent certains équipements. Les informations parvenant à l'utilisateur de ces technologies quant aux risques qu'elles représentent le confrontent à une dissonance cognitive classique [Festinger, 1957] : pour réduire la dissonance, il peut théoriquement choisir soit d'éviter ces technologies, soit de minorer l'importance des informations reçues concernant les risques. On notera que le choix d'évitement est largement théorique, compte tenu de l'omniprésence des technologies radiofréquences. Suivant la terminologie de Pidgeon *et al.* (2008), l'hypothèse d'une « acceptation réticente » peut être émise. Un autre mécanisme de défense qui peut être utilisé dans ce cas est le biais d'optimisme, selon lequel chacun se considère prendre moins de risques qu'autrui.

La stratégie dans les débats actuels en France paraît en partie construite autour de ces facteurs : les « opposants » centrent leurs analyses de risques et leur communication sur les antennes-relais (équipement non personnel, extérieur, collectif) alors que l'Etat répond par des projets de restriction visant les équipements personnels (par exemple interdiction du téléphone mobile pour les très jeunes enfants, interdiction du téléphone mobile à l'école, *etc*.

Cette dernière option reçoit *a priori* l'assentiment des enseignants qui perçoivent le téléphone mobile à l'école comme interférant avec leurs tâches éducatives et pour lesquels bannir le mobile à l'école est « une mesure d'urgence pédagogique », voir L.M. 7-8 juin 2009, p. 18). Une nouvelle catégorie de risque apparaît ainsi associée à la téléphonie mobile : le « risque pédagogique », ce qui pourrait suggérer que l'appropriation sociale du téléphone mobile et de ses usages comporte encore des points de tension.

Cette espèce de clivage dans la représentation du téléphone mobile comme objet personnel « bon » *versus* les antennes-relais collectives « mauvaises ,» aboutissant à désigner les antennes collectives comme source de risques n'a pas échappé au ministre de la santé, qui insiste dans sa lettre de saisine de la table ronde « radiofréquences, santé, environnement » pour que ce point soit bien clarifié.

Toutefois, la totalité de la vie psychologique et sociale ne saurait être réduite au seul tropisme que des risques exerceraient uniformément sur la population, et les caractéristiques de chaque contexte local devraient être mieux prises en compte. Analysant les discours de contestation (*contending discourses*) depuis l'étude de Wertheimer et Leeper [Leeper, 1979] associant des cas de leucémie à des lignes à HT, Linder [Linder, 1995] déroule la construction sociale des risques liés aux champs électromagnétiques aboutissant à un enjeu public aux Etats-Unis. Dans la même veine, O. Borraz (*cf*. audition de O. Borraz du 1er avril 2009 en annexe 3.4) analyse la construction sociale des enjeux associés à la téléphonie mobile en France qui a permis d'aboutir à des préoccupations d'ordre sanitaire) et montre que « ça n'allait pas de soi » et « qu'il aurait existé

différentes façons de cadrer le problème ». Il souligne notamment la nécessité de mieux connaître les caractéristiques des populations locales mobilisées autour des enjeux de la téléphonie mobile. Suivant un autre raisonnement, M. Setbon indique également l'intérêt de mieux connaître les caractéristiques des populations (*cf*. audition de M. Setbon du 2 avril 2009 en annexe 3.4).

En comparant les réponses de plusieurs pays (Royaume-Uni, Etats-Unis, Australie, Italie, Irlande) à la perception des risques des antennes-relais, (Burgess, 2002), relève une combinaison instable de nombreux facteurs aboutissant, ou pas, à l'avènement d'un risque sanitaire.

Au-delà de ce premier positionnement des technologies radiofréquences, nous allons donc considérer plus avant l'impact social de la téléphonie mobile, en commençant par prendre en compte les faits bruts de sa diffusion mondiale.

7.4.2 La téléphonie mobile : une diffusion massive et mondiale

La téléphonie mobile est l'objet d'une diffusion massive, rapide et mondiale. Les données relatives à ce phénomène, paraissent peu prises en compte dans les analyses et les débats alors qu'elles constituent des données factuelles de premier ordre.

La téléphonie mobile se distingue pour être la seule technologie faisant l'objet du rapport « OCDE en chiffres » (2008). Reprenant des données de l'Union Internationale des Télécommunications, ce rapport présente en effet des chiffres éloquents : « d'un peu plus de 750 000 abonnements en 1985 à 2,5 millions en 1987, le nombre total d'abonnements aux téléphones mobiles a dépassé les 11 millions en 1990, et le milliard en 2002. Le taux de croissance a cependant ralenti, mais a tout de même dépassé les 3,3 milliards en 2007 » (cf. chapitre 3.1).

Ce rapport poursuit en précisant que la pénétration est si vaste qu'il y a maintenant plus de téléphones mobiles en Afrique qu'au Japon. Toujours d'après ce rapport, « depuis les années 90, la mondialisation et l'activité économique ont été beaucoup influencées par la forte croissance des technologies de l'information et de la communication. Le marché des téléphones mobiles a beaucoup profité de la concurrence et des progrès technologiques, ainsi que de la popularité de l'envoi de SMS ou autres. Beaucoup de pays en voie de développement ont préféré le téléphone mobile à de lourds investissements dans des lignes terrestres ».

Sur cette base, nous pouvons estimer actuellement le nombre d'abonnés au niveau mondial à quelques 4 milliards.

En France, d'après l'Autorité de régulation des télécommunications, on compte en 2008 environ 58 millions d'abonnés à la téléphonie mobile, dont 49,2 millions de particuliers (une même personne pouvant détenir plusieurs abonnements). Cette situation est en phase avec la volonté politique : "La totalité des communes de France bénéficiera de la téléphonie mobile d'ici 2007" assurait en novembre 2005 le ministre délégué à l'Aménagement du territoire. En septembre 2008, la couverture réseau des opérateurs mobiles laisse encore 364 communes isolées. Ce n'est pourtant qu'une goutte d'eau si l'on considère les 36 860 villes et villages que compte l'Hexagone (Presse généraliste, 2009). Il est important de souligner que la diffusion massive de la téléphonie mobile sur le territoire français résulte d'une décision de politique publique, présentant des objectifs assumés positivement il y a quelques années seulement.

Quand elle peut toucher le plus grand nombre, la diffusion d'une technologie devient un objet public et un enjeu politique. On se souvient ici notamment de la place que Lenine accordait à l'électrification dans sa définition du communisme (« Le pouvoir des soviets plus l'électrification du pays »). La volonté de couverture réseau du territoire national français correspond vraisemblablement à un idéal politique comparable, tout en étant de nature différente, et assimilant éventuellement le progrès technique et le progrès social. Cette dimension politique est rendue clairement visible au Vénézuela avec l'annonce récente par le président de la production locale d'un « produit de la révolution », à savoir un téléphone mobile bon marché et moderne (environ

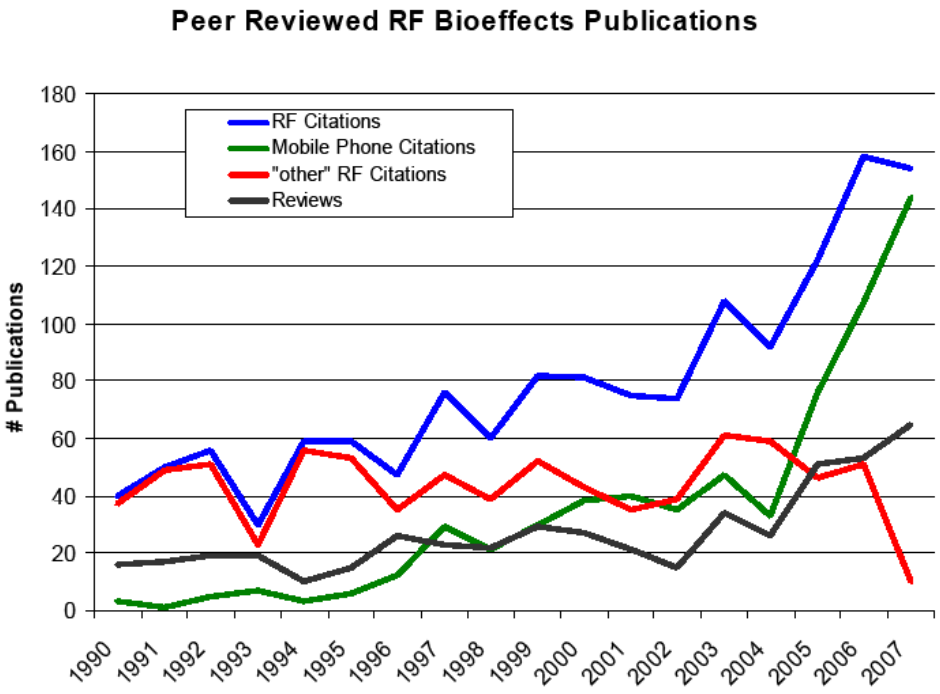
10 euros, avec les fonctions SMS, photo, radio FM, accès Internet, MP3) (L.M., 21 mai 2009, p.25).

Curieusement, les préoccupations des populations ou des associations semblent peu porter sur les atteintes aux libertés publiques et à la vie privée, par la surveillance généralisée ainsi rendue possible, ainsi que sur l'utilisation *via* la connexion Internet des données personnelles à des fins commerciales, le tout à l'échelle de la planète [Dobson, 2009].

7.4.3 Les effets biologiques des technologies RF comme objet d'études scientifiques

Les technologies radiofréquences font également l'objet d'une production d'études scientifiques de plus en plus nombreuses. L'évolution de cette production a été évaluée quantitativement par Veyret [Veyret, 2008].

Figure 36 : Publications *peer-reviewed* relatives aux effets biologiques des radiofréquences (période 1990-2007) [Veyret, 2008]



Consacrée aux articles publiés dans des revues scientifiques à comité de lecture dans le domaine des effets biologiques des radiofréquences, l'étude de Veyret montre la progression rapide, à partir de 2004, des études comprenant l'objet radiofréquences. On note aussi la croissance rapide des citations concernant la téléphonie mobile à partir de cette même date, ainsi que leur prééminence en comparaison avec les autres sources de radiofréquences qui sont en décroissance.

En rapprochant cette courbe de la précédente montrant la diffusion de la téléphonie mobile dans le monde, on constate un développement parallèle entre cette diffusion et la production de publications – sachant que les études précèdent en moyenne de un à deux ans la date de publication.

Que peut-on conclure de ce rapprochement ? Les savoirs scientifiques se rapportant aux radiofréquences n'étant pas vraiment nouveaux, il est vraisemblable que la multiplication des études notamment sur les effets biologiques soit liée au développement de la téléphonie mobile, non seulement en tant que technologie, mais surtout en tant que pratique sociale. On peut donc

déjà y voir une forme de réponse aux préoccupations des populations, illustrant la fonction sociale de la recherche et de l'expertise puisque la décision de les engager ne se limite pas à de seuls enjeux scientifiques. Cette mobilisation de la recherche ne paraît pas totalement satisfaisante si l'on se place du point de vue des associations et d'une partie des populations qui ne trouvent pas dans les contenus des résultats une réponse à leurs préoccupations ou demandes. Toutefois, on peut imaginer facilement que l'absence d'études serait encore moins satisfaisante.

Par ailleurs, d'un point de vue des politiques publiques, la question de reconnaître la fonction sociale de ces travaux de recherche se pose. La reconnaissance de la fonction sociale de la recherche et de l'expertise peut également être problématique du point de vue des scientifiques qui ne sont pas forcément formés pour intégrer cette caractéristique. Enfin, la question de l'allocation des ressources pour réitérer des recherches et des expertises au-delà des besoins scientifiques peut se poser d'un triple point de vue politique, économique et déontologique.

L'exposition rapide et massive des populations à la téléphonie mobile en tant que technologie s'est accompagnée d'une production scientifique soutenue (voir les deux courbes s'y rapportant). Cette situation peut légitimement conduire certains chercheurs (cf. par exemple l'audition de D. Belpomme du 28 janvier 2009, annexe 3.4) et d'autres acteurs, à mettre en avant la dimension potentiellement catastrophique des effets, quand bien même la dangerosité de ces derniers n'est pas avérée. De plus, dans le domaine des risques, l'absence de visibilité ne signifie pas l'absence d'effets. Ceux-ci peuvent apparaître avec des délais dans le temps ; ils peuvent aussi faire l'objet d'une atténuation sociale [Pidgeon *et al.*, 2003] qui affecte leur caractérisation et évaluation (Note : Par exemple, les quelque 6 000 décès supplémentaires liés à la canicule de 1976 en France ne furent reconnus qu'en 2003, le cadrage initial portant sur les effets de la sécheresse, les controverses et la mobilisation sociale s'étant orientées vers le milieu agricole qui bénéficiera d'un impôt sécheresse. Jusqu'en 2003, les recherches et la prévention dans ce domaine de la santé publique reposaient sur la mortalité associée aux basses températures hivernales (lesquelles font l'objet d'une amplification sociale) et ignorant la mortalité associée aux vagues de chaleur qui n'était que rarement mentionnée comme cause de mortalité sur les certificats de décès). La question de déterminer si les risques de la téléphonie mobile font l'objet d'une atténuation ou amplification sociales est traitée ci-dessous.

7.4.4 Pratiques et usages de la téléphonie mobile

Dans son étude de la diffusion du téléphone mobile, Levinson [Levinson, 2004] relève simplement les avantages suivants qui lui paraissent reconnus par une grande partie de la population et qui permettent d'expliquer le succès mondial de la téléphonie mobile : les utilisateurs sont capables de communiquer à distance (ce qui n'était pas le cas d'un grand nombre de personnes sur la planète), d'accéder à l'information, et d'être joignables partout et à n'importe quel moment. En complément, des usages divers se rattachent à des groupes sociaux et à des fonctions particulières. Par exemple, une étude en Allemagne [Power *et al.*, 2007] porte sur l'usage par les sourds de SMS, vers d'autres sourds ou des entendants, et leur demande est celle d'une plus grande connectivité entre technologies.

Parmi les risques, celui lié à l'utilisation du téléphone mobile en conduisant une voiture est le mieux connu. Dans leur revue des recherches sur le sujet, [Svenson *et al.*, 2005] soulignent d'abord l'avantage du téléphone dans une voiture, en cas d'accident et de situation d'urgence notamment. Ils soulignent ensuite que l'usage du téléphone mobile affecte les capacités de conduite, que le téléphone soit utilisé avec le kit mains-libres ou pas. Cet usage semble constituer un facteur réduisant les performances du conducteur, avec notamment une perte d'attention [Törnos et Bolling, 2006]. Dressel et Atchley [Dressel et Atchley, 2008] montrent des variations de résultats dans l'établissement du facteur de risque selon les méthodologies utilisées (corrélations, simulateur de conduite, tâches cognitives).

Brusque *et al.* [Brusque *et al.,* 2007] considèrent que l'usage du téléphone en conduisant mérite d'être étudié puisqu'il est répandu, malgré une réglementation se voulant restrictive. Leur étude révèle qu'aucune variable sociodémographique en France ne paraît liée à cet usage, les

utilisations quotidiennes de la voiture et du téléphone étant les seuls facteurs explicatifs de l'utilisation intensive du mobile au volant. En contraste, Walsh *et al.* [Walsh *et al.,* 2008] trouvent dans le contexte australien de leur étude plusieurs facteurs (perception des risques, attitudes, normes) permettant de prédire en partie les différents usages de la téléphonie au volant. Dans le contexte taïwanais, ce sont des traits de personnalité (conduite agressive avec historique d'accidents) qui semblent prédictifs de l'usage du téléphone au volant [Chen, 2006].

Une restriction d'usage des téléphones mobiles s'applique également dans d'autres contextes : à bord des avions et dans certains hôpitaux, suivant l'hypothèse d'interférences avec les équipements, et à proximité de pompes à essence pour éviter des incendies. Aucun de ces phénomènes ne paraît fondé, ni théoriquement ni sur une base d'historique d'événements et, comme le rapporte Burgess [Burgess, 2008], certains praticiens hospitaliers anglais considèrent les restrictions comme dangereuses, dans la mesure où la radiomessagerie de substitution les oblige à quitter leur lieu de consultation pour trouver une ligne fixe et répondre aux appels.

Un niveau de préoccupation a concerné un temps la civilité des usages, entraînant des restrictions ou des recommandations sur l'usage du téléphone dans certains lieux publics, comme c'est par exemple le cas dans les trains en France. En Angleterre, Poole [Poole, 2008] confronte ironiquement le partage généreux des conversations privées par les voyageurs utilisant leurs téléphones mobiles dans les trains, avec la lecture silencieuse des autres voyageurs qui peut paraître un acte antisocial.

En 2002, Morel [Morel, 2002] développe une approche ethnographie (observationnelle des modes d'être en public avec un téléphone mobile) dont l'idée générale est de donner une interprétation alternative à celle qui voit dans l'usage du téléphone mobile un accroissement de l'individualisme. Morel constate au contraire que la gestion de cet objet par ses utilisateurs engagent des interactions qui, lorsqu'elles deviennent problématiques, nécessitent la mise en œuvre de stratégies de retour à la normale, qu'il nomme des savoir-faire (faire participer la tierce personne à la conversation téléphonique, faire comme si l'on n'entendait pas la conversation de la personne qui téléphone juste à côté, *etc*.)

Dans leur suivi des informations véhiculées entre 1995 et 2002 par trois quotidiens français (Libération, Le Monde, Le Figaro), Martha *et al.* [Martha *et al.,* 2006] relèvent que les risques « sociaux » (guillemets des auteurs), en référence à des incivilités sont très minoritaires.

Le développement de normes de consommation associées à la téléphonie mobile en France sont étudiées par Gaglio [Gaglio, 2008] sous le triple angle de leur émergence, de leur cristallisation et de leur transformation, en lien avec différentes dynamiques relationnelles (couple, famille, travail, *etc*.). Il souligne ainsi que la multiplication des usagers au cours des années a abouti à des attitudes de discrétion en public.

Jaureguiberry [Jaureguiberry, 2003] structure les usages de la téléphonie mobile à partir de trois logiques :

- la première est utilitaire, inscrivant l'usage quotidien du téléphone mobile dans l'efficacité recherchée dans les échanges professionnels et privés ;
- la seconde est celle de l'intégration, l'utilisateur signifiant et pratiquant son appartenance aux réseaux sociaux auxquels il est relié *via* son téléphone ;
- enfin la troisième se veut critique, l'utilisateur revendiquant son autonomie lui permettant de choisir parmi les nombreuses sollicitations lui parvenant via son téléphone.

L'ambivalence du rapport à la téléphonie mobile peut se rapprocher de l'analyse proposée par Wievorka [Wievorka, 2008] concernant la subjectivité et la modernité : « La subjectivité des acteurs, la façon dont […] ils produisent leur imaginaire personnel et subjectif, doivent beaucoup à leur exposition à la modernité la plus globale, […] globalisation qui les fascine et les rejette tout à la fois ».

Une section est consacrée, dans l'ouvrage de Jaureguiberry [Jaureguiberry, 2003], à la place psychologique et sociale du téléphone mobile dans le lien affectif et la sécurité, en ce qu'il permet

de sentir la présence rassurante des proches partout où on peut emmener un téléphone avec soi. L'auteur introduit habilement la notion du téléphone mobile comme « objet transitionnel », en référence aux travaux du psychanalyste anglais D. Winnicott qui a analysé l'importance pour le nourrisson et le jeune enfant (entre 4 et 12 mois) d'un objet matériel, notamment au moment de l'endormissement.

7.4.5 Effets de l'information sur les risques associés aux technologies RF

Dans cette sous partie, nous nous attachons à la question de l'information qui entoure les technologies radiofréquences, et notamment la téléphonie mobile.

Un premier niveau d'information est procuré par la présence matérielle des objets physiques : les personnes qui voient « l'objet » seraient plus susceptibles que celles qui ne le voient pas de se sentir exposées à des effets néfastes.

Une recherche sur ce point est réalisée par Poortinga *et al.*, [Poortinga *et al.,* 2008] et porte sur le radon et les lignes à haute tension, comme deux cas de risques de rayonnements ayant soulevé divers niveaux d'attention parmi les populations et les experts. Leur étude montre que les croyances concernant les deux cas diffèrent en fonction du niveau d' « exposition » -- qu'ils définissent dans ce contexte en termes de proximité spatiale avec des lignes à haute tension. Ils en concluent que ces résultats reflètent les informations visuelles dont disposaient les répondants « exposés », la prise de conscience (*awareness*) étant mesurée par la question suivante : « Pouvez-vous voir des lignes à haute tension depuis une ou plusieurs fenêtres ou portes de votre maison ? ». Cette recherche sur les effets de l'exposition visuelle est intéressante, dans la mesure où le questionnement, et parfois le rejet des antennes-relais commence par leur identification visuelle.

La conscience d'avoir une antenne relais dans son voisinage (parce qu'on la voit, qu'on le sait ou qu'on en a entendu parler[131]) est susceptible d'engendrer, chez certaines personnes, des craintes, du stress, voire même des symptômes. Comme l'a mentionné L. Challis (*cf.* audition de L. Challis du 3 décembre 2008 en annexe 3.4), le témoignage des médecins généralistes va dans ce sens et ce sont des données qui ne peuvent être ignorées :

"*We invited five different cities in Britain and we opened this to anyone who whished to come. 90% of the concern was on base stations. We talked to the doctors and they said the fears from the people on base stations produce symptoms. So it is not something that you can dismiss (…)"*

Il s'agit d'un fait notable signalé dans le cours de cette expertise : cependant il ne s'agit que de propos rapportés et la causalité entre la présence d'une antenne relais et les symptômes observés par les médecins n'est pas ainsi démontrée. Il conviendrait également de préciser quelle part est attribuable à l'exposition visuelle, et quelle part est attribuable à l'exposition cognitive, cette dernière renvoyant aux informations reçues sur les risques.

Ainsi le principe de précaution est-il invoqué dans différents pays comme moyen pour répondre aux préoccupations des populations, cependant que des études montreraient que cette approche pourrait causer ou exacerber lesdites préoccupations.

Ce deuxième point est étudié par Wiedemann et Schütz ([Wiedemann, 2003] ; [Wiedemann et Schütz, 2005]. Une approche expérimentale leur permet de conclure que les mesures de précaution pourraient déclencher des préoccupations et amplifier les perceptions de risques.

Pour vérifier ce qu'il en est au Royaume-Uni du rapport aux avis diffusés par le gouvernement concernant les risques potentiels de la téléphonie mobile, Timotijevic et Barnett [Barnett *et al.* 2006], utilisent la méthode du *focus group* (8 groupes présentant des caractéristiques différentes en âge, sensibilisation et préoccupations aux risques des antennes-relais, usages du téléphone mobile). Les résultats montrent que la compréhension des avis n'apparaît pas principalement

[131] Ces études renvoient à une notion d'exposition (visuelle, à l'information) différente de celle utilisée par ailleurs dans ce rapport dans le cadre des approches toxicologique ou épidémiologique.

cadrée en termes de précaution. La compréhension de la précaution semble passer par des réflexions concernant les coûts et bénéfices de la technologie, ainsi que sur le contexte institutionnel émettant les avis. Pour une partie de ceux opposés aux antennes-relais, la précaution renforce la crédibilité des préoccupations.

Dans une autre étude expérimentale, Barnett *et al.* [Barnett *et al.*2008] trouvent que deux dimensions sont associées à la précaution : d'abord en relation à sa nécessité intrinsèque, ensuite en l'ancrant à des notions de gouvernance. Un avis de précaution est généralement interprété comme une cause de préoccupation. En conclusion, les résultats montrent que la précaution peut être considérée comme une position utile, mais ça ne signifie pas qu'elle est perçue comme une bonne gouvernance ou qu'elle va réduire les préoccupations.

La question du lien éventuel entre la cognition (dans le sens d'une information sur des risques reçue par des individus) et la santé, souvent mal comprise et diversement interprétée, est étudiée en profondeur par Brewer *et al.*, [Brewer *et al.*, 2008] qui passent en revue plusieurs études ([Cioffi, 1991]; [David & Wesseley, 1995]; [Leventhal *et al.*, 1980]; [Mechanic, 1972]; [Pennebaker, 1982]). Ils concluent sur l'existence d'un lien et donnent comme exemple une controverse aux Etats-Unis concernant le maïs transgénique. Une association de consommateurs signale que des traces de maïs transgénique ont été trouvées dans des produits d'alimentation comme les *taco shells,* alors que les industriels maintiennent que le maïs transgénique est utilisé seulement pour nourrir le bétail. La nouvelle de ces traces circule rapidement et le CDC[132] [CDC, 2001] reçoit les cas de 51 personnes présentant des symptômes (modérés : état de faiblesse, vertiges, ou graves : évanouissement, hospitalisation) qu'elles attribuent à leur exposition au maïs. Toutefois, une investigation complète des cas par le CDC [CDC, 2001], s'appuyant sur des entretiens approfondis et des tests sérologiques, a conclu qu'aucune de ces personnes n'avait été exposée au maïs transgénique, et qu'une réaction allergique liée à l'exposition ne pouvait expliquer les symptômes signalés.

Poursuivant leur étude, les auteurs s'intéressent sur cette base aux explications d'un tel phénomène. Ils proposent deux explications qui ne sont pas mutuellement exclusives :

- la première propose comme possible que les personnes qui avaient au préalable un symptôme inexpliqué trouvent une explication utile avec l'information concernant la présence de maïs transgénique dans la nourriture ;
- la seconde suggère que les informations aient suscité, chez ceux qui croyaient avoir consommé du maïs transgénique, une vigilance aux symptômes allergiques.

Ces deux explications théoriques aboutissent à la règle de symétrie (*symmetry rule*) [Brownlee *et al.*, 2000] selon laquelle les cognitions se rapportant à la maladie reposent sur la dualité des représentations en mémoire : l'une concrète, l'autre abstraite. La construction mentale d'un état de santé inclut une représentation abstraite (par exemple, j'ai mangé des aliments contenant du maïs transgénique) et des symptômes concrets (par exemple, nausée, faiblesse), sachant que la présence de l'une des représentations entraînera l'autre. Ainsi, « les personnes chercheront et trouveront des représentations pour expliquer leurs symptômes, et chercheront et trouveront des symptômes pour les rendre concrets (c'est-à-dire donner du sens) à leur représentation de la maladie » [Brownlee *et al.*, 2008].

Les études cliniques en médecine, psychologie et sociologie montrent généralement l'engagement des personnes dans la recherche active d'un sens à donner à leur maladie. Ces points sont délicats à considérer, car les symptômes associés à des risques technologiques ne peuvent être réduits à la seule dimension cognitive, ni à la subjectivité des individus. Conversement, chaque individu ne peut davantage être réduit à une « boîte noire » passive et insensible, irréfléchie et

[132] *Centers for Desease Control*, c'est-à-dire le centre de contrôle et de prévention des maladies aux Etats-Unis.

coupée de son environnement. Sachant qu'une partie importante de la population est « exposée visuellement » (aux antennes-relais) et « exposée cognitivement » (à l'information et aux controverses sur la dangerosité des radiofréquences), la prise en compte de cette situation mériterait de plus amples évaluations, d'autant qu'elle paraît actuellement peu étudiée dans le domaine des radiofréquences et plus particulièrement des antennes-relais.

7.4.6 Indépendance de la recherche en évaluation des risques

La question de l'indépendance de la recherche est un point central dans l'évaluation et l'analyse des risques. Une première étape [Red Book, 1982] a consisté à séparer les rôles et les tâches entre évaluation et gestion, pour éviter que l'évaluation ne soit prédéterminée par les contraintes ou les limites de la gestion, et que la science ne soit instrumentalisée par les besoins de la politique. En France, cette approche a notamment donné naissance aux agences sanitaires.

Concernant l'expertise sur les radiofréquences, l'indépendance des chercheurs vis à vis des opérateurs est principalement remise en cause du fait de la participation de ces derniers au financement des travaux de recherche. Sans être spécifique aux radiofréquences, cette situation soulève plusieurs problèmes : l'application de ces critères pourrait conduire à restreindre la production de données, sachant que dans le domaine des risques la production de savoir ne se limite pas au milieu académique mais inclut les pouvoirs publics et les entreprises.

Dans leur discussion sur ce point dans le cadre d'une recherche européenne sur la gouvernance des risques appliquée à la téléphonie mobile ainsi qu'à d'autres objets, De Marchi *et al.* [De Marchi *et al.,* 2009] relèvent ce qu'ils considèrent comme une interprétation intéressante : les écarts qui séparent les « chercheurs officiels » et les « dissidents » ne seraient pas tant dus à des divergences de données, à des protocoles de recherche incorrects ou à des intérêts cachés, mais plutôt aux divers cadres interprétatifs choisis en raison des différences d'hypothèses scientifiques de base et de cadrage de l'action politique.

Ceci nous rapproche de la question de l'ambiguïté associée à certaines classes de risques dont les radiofréquences peuvent faire partie ; ainsi Klinke et Renn [Klinke et Renn, 2002] précisent que l'ambiguïté « renvoie à la variabilité d'interprétations (légitimes) s'appuyant sur des résultats d'évaluations ou des observations identiques. La plupart des litiges scientifiques dans les champs de l'analyse et de la gestion des risques ne portent pas sur des différences de méthodologie, de mesures ou de fonctions dose-réponse, mais sur la question de ce que tout ceci signifie en termes de santé humaine et de protection de l'environnement ». Outre l'ambiguïté, cette recherche définit la complexité et l'incertitude plus communément associées à l'évaluation des risques, et permet d'identifier trois stratégies d'évaluation et de gestion des risques, selon qu'elles sont basées sur le risque, la précaution ou la délibération. Les auteurs aboutissent à un modèle montrant la complexité croissante des procédures d'évaluation en fonction de la nature du risque, allant des procédures routinières jusqu'aux dispositifs participatifs et délibératifs.

Le *California EMF Program* [2002] fait apparaître quatre cadrages politiques se rapportant aux expositions environnementales involontaires dont les radiofréquences font partie :

- les économistes adhèrent au cadre de « l'utilité » en faveur « de maximiser les avantages pour le plus grand nombre au moindre coût » ;
- la plupart des citoyens semblent adhérer au cadre de la « justice sociale » selon laquelle il s'agit de « protéger les plus vulnérables quels que soient les coûts ». On notera que c'est vraisemblablement le cadre de la « justice sociale » qui a inspiré les membres de la conférence citoyenne de Paris pour demander de désactiver le Wi-Fi dans tous les espaces publics (mairies, bibliothèques, parcs et jardins), d'appliquer la valeur limite maximale de 0,6 V/m, *etc*.
- d'autres adhèrent au cadre de la « certitude virtuelle requise » qui requiert la certitude d'un problème avant d'agir sur lui ;
- enfin, d'autres encore adhèrent à un cadre de « non-intervention » qui préfère une approche des risques environnementaux sur la base de l'engagement volontaire sans nouvelle

règlementation par les pouvoirs publics, quel que soit le degré de certitude quant à l'existence d'un problème.

Plutôt que de choisir dès le départ entre ces visions distinctes, le *California EMF Program* s'est engagé dans la recherche des éléments permettant d'alimenter chaque courant de pensée.

Une autre démarche d'évaluation est proposée avec la « méthodologie d'évaluation et de surveillance intégrée », [Kuzma *et al,* 2008], laquelle combine les analyses de décision multicritères, les analyses quantitatives et qualitatives, et l'analyse des données historiques (*cf*. Figure 37). Le cas utilisé en illustration est celui d'un risque émergent, les nano technologies. On notera toutefois que la notion d'une surveillance peut se rapprocher de « l'attitude d'observation » que propose d'adopter J.-F. Viel (*cf.* audition de J.-F. Viel du 29 avril 2009 en annexe 3.4).

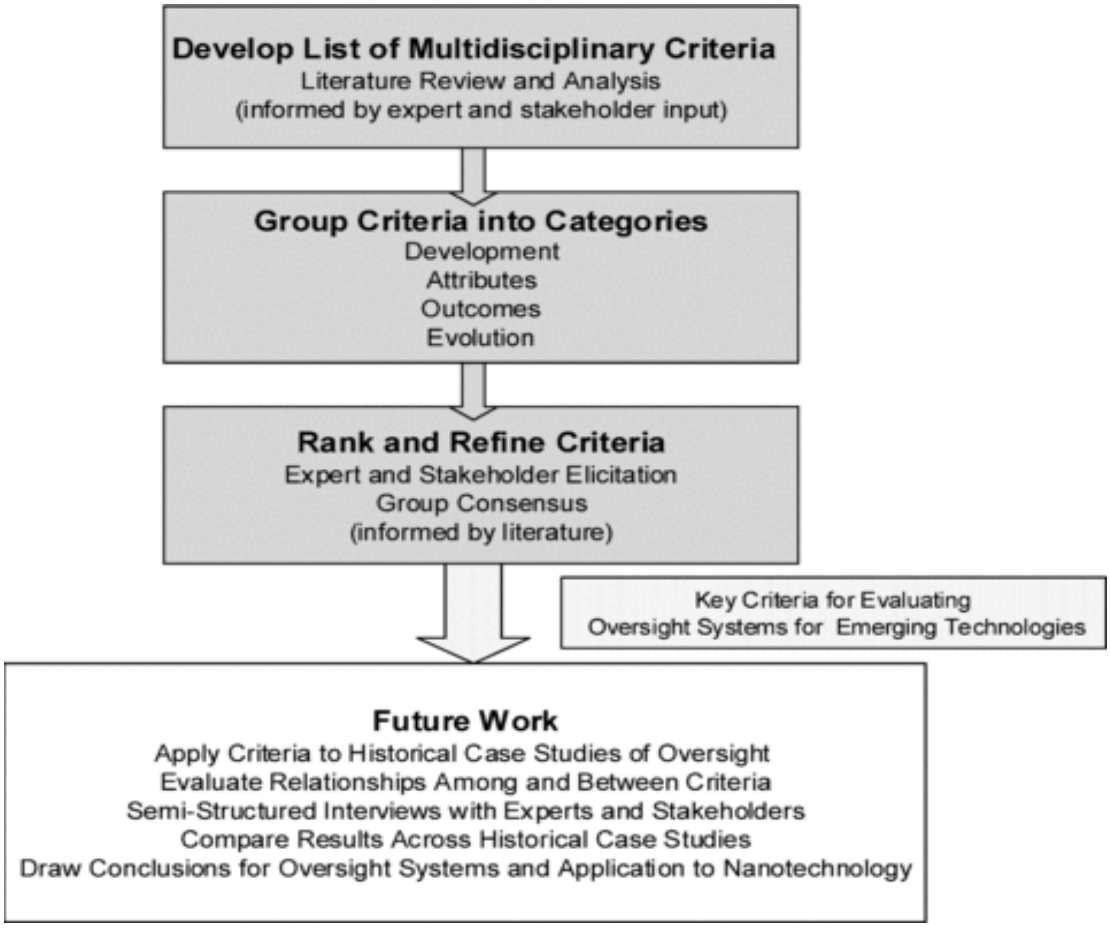


Figure 37 : Méthodologie d'évaluation et de surveillance intégrée [Kuzma *et al,* 2008]

Pour conclure cette partie sur l'indépendance de l'évaluation des risques quand elle est confrontée à des objets caractérisés par la complexité, l'incertitude et l'ambiguïté, cette ouverture pragmatique à plusieurs visions *a priori* et la considération simultanée de pistes diverses pourrait davantage être explorée en France où la recherche d'une vision unique devant s'imposer à tous paraît plus souvent privilégiée. Cette ouverture pragmatique suppose que plusieurs cadrages soient considérés et retenus pour fonctionner de façon complémentaire, comme dans le cadre de l'*EMF Porgram* (2002). L'expérience (de ce groupe de travail par exemple) montre que cet exercice ne va pas de soi quand existe une croyance qu'un seul cadrage est suffisant.

7.5 Le juge face à la question des risques sanitaires des antennes relais

Devant les juridictions administrative et judiciaire, la question du risque sanitaire des antennes-relais est un argument, un moyen juridique, soulevé au soutien des prétentions de nombreux plaideurs. Guidé par les conclusions des expertises scientifiques sur le sujet, le juge n'en est pas moins appelé à produire son analyse du risque sanitaire en la matière et à en tirer les conséquences juridiques.

Dans un premier temps, cette analyse s'est majoritairement développée devant le juge administratif. Celui-ci a pu stabiliser une jurisprudence sensible à l'absence de caractérisation des risques des radiofréquences et qui donne ainsi peu d'effet à l'argument des risques potentiels des antennes-relais. Les plaideurs se sont donc, dans un second temps, tournés vers le juge judiciaire dont la jurisprudence, encore largement en construction, a donné récemment les signes d'une plus grande efficacité de l'argument des risques potentiels des antennes-relais.

Dans le contexte actuel de détermination de la portée du principe de précaution depuis sa constitutionnalisation, le contentieux des antennes-relais fait figure de terrain d'expérimentation.

7.5.1 Le juge administratif sensible à l'absence de caractérisation des risques liés aux radiofréquences

Le Conseil d'Etat qui ne s'est prononcé qu'une seule fois au fond[133], a pu développer, dans son rôle de juge de cassation, des ordonnances prises en matière de référé-suspension[134], une jurisprudence stabilisée qui se veut plus sensible à l'absence de caractérisation des risques des radiofréquences.

Par un arrêt de sous-sections réunies du 30 juillet 2003[135], le Conseil d'Etat a énoncé que « *en l'état des connaissances scientifiques , il n'apparaît pas que les installations de téléphonie mobile auraient des effets dits non thermiques dangereux pour la santé publique, et, que les limites d'exposition imposées aux opérateurs de téléphonie mobile […] tiennent compte de marge de sécurité dans les limites d'exposition destinés à protéger le public contre tout effet, y compris à long terme, de l'exposition aux ondes électromagnétiques, dans l'ensemble des gammes de fréquence.* » Dans le même sens, le Conseil a admis par un arrêt en sous-sections réunies du 2 juillet 2008[136] « *l'absence d'éléments de nature à accréditer l'hypothèse, en l'état des connaissances scientifiques, de risques pour la santé publique pouvant résulter de l'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les antennes relais de téléphonie mobile […]* ».

Cette position du Conseil d'Etat n'a pas toujours été celle de l'ensemble des cours administratives d'appel. Ainsi, la cour administrative d'appel de Marseille avait antérieurement considéré, par un

133 Conseil d'Etat 30 juillet 2003, *Association Priartem.*

134 Conseil d'Etat 2 juillet 2008, *Commune de Créteil* ; Conseil d'Etat 28 novembre 2007, *Commune de Saint-Denis* ; Conseil d'Etat 23 juin 2004, *Commune de Luisant* ; Conseil d'Etat 15 mars 2004, *Commune de Villasavary* ; Conseil d'Etat 29 octobre 2003, *Commune de Saint-Cyr-l'Ecole* ; Conseil d'Etat 23 juillet 2003, *SFR* ; Conseil d'Etat 19 mai 2003, *SPM Telecom* ; Conseil d'Etat 22 août 2002, *SFR.*

135 Conseil d'Etat 30 juillet 2003, *Association Priartem.*

136 Conseil d'Etat 2 juillet 2008, *Commune de Créteil.*

arrêt du 13 juin 2002[137], que le maire qui ne s'est pas opposé à l'édification d'une station de base de téléphonie mobile émettant des radiofréquences d'une fréquence de 1 800 MHz à proximité immédiate d'habitations, avait fait une appréciation erronée des circonstances de l'espèce et n'avait pas satisfait aux exigences du principe de précaution, dans la mesure où, en l'état des connaissances scientifiques, il ne pouvait pas être établi avec certitude que les rayonnements émis par les stations de base ne présentaient aucun risque. Le maire aurait donc dû tenir compte de ces incertitudes pour s'opposer aux travaux. Cette tentative de percée du principe de précaution dans le contentieux administratif des antennes-relais a vite avorté et la cour de Marseille est revenue, dès 2005, sur une appréciation conforme au sens de celle donnée par le Conseil d'Etat[138]. Par là même, elle s'est alignée sur la position adoptée par les cours administratives de Versailles[139], Douai[140], Bordeaux[141], Nancy[142] et Lyon[143].

S'agissant des tribunaux administratifs, la prévalence de l'absence de risques avérés pour la santé ressort de la position des tribunaux de Grenoble[144], de Dijon[145] et Nancy[146]. En revanche, le tribunal administratif de Marseille a admis par un jugement du 9 mars 2004[147] que l'absence de certitude « *ne permet pas de conclure à l'absence de tout risque possible* », notamment pour les populations sensibles, et que « *ces circonstances justifient que l'implantation des antennes-relais soit réglementée dans le respect du principe de précaution* ». Néanmoins, cette analyse ne saurait prospérer en appel[148].

En matière administrative, la prise en compte de la question des risques sanitaires des antennes-relais se retrouve dans les contentieux relatifs à l'exercice par le ministre chargé des télécommunications de son pouvoir de police spéciale en la matière[149], à l'exercice par le maire de son pouvoir de police générale[150], aux décisions d'opposition ou de non – opposition aux travaux déclarés par les opérateurs en vue de l'implantation d'antennes sur le territoire communal[151], à l'approbation de plan local d'urbanisme restreignant l'implantation d'antennes sur le territoire de la

137 Conseil d'Etat 13 juin 2002, *Association intercommunale pour la défense des quartiers Peyre Long et des Epinets.*

138 Cour administrative d'appel de Marseille 11 septembre 2006, *Orange SFR* ; Cour administrative d'appel de Marseille 3 juillet 2006, *Commune de Sanary-sur-mer* ; Cour administrative d'appel de Marseille 3 juillet 2006, *Commune de Mandelieu La Napoule* ; Cour administrative d'appel de Marseille 26 mai 2005, *Commune de Montauroux.*

139 Cour administrative d'appel de Versailles 15 janvier 2009, *Commune de Saint-Denis.*

140 Cour administrative d'appel de Douai 30 octobre 2008, *Commune de Coquelles* ; Cour administrative d'appel de Douai 29 décembre 2006, *Commune de Leffrinckoucke.*

141 Cour administrative d'appel de Bordeaux 6 juin 2006, *Commune d'Arcachon.*

142 Cour administrative d'appel de Nancy 20 octobre 2005, *XY.*

143 Cour administrative d'appel de Lyon 17 juin 2004, *Commune de Dijon.*

144 Tribunal administratif de Grenoble 3 mars 2008, *Orange.*

145 Tribunal administratif de Dijon 29 décembre 2006, *Commune de Sougy-sur-Loire.*

146 Tribunal administratif de Nancy 30 mars 2004, *Association TESLA.*

147 Tribunal administratif de Marseille 9 mars 2004, *Orange.*

148 Cour administrative d'appel de Marseille 11 septembre 2006, *Orange SFR.*

149 Conseil d'Etat 30 juillet 2003, *Association Priartem.*

150 Conseil d'Etat 2 juillet 2008, *Commune de Créteil* ; Conseil d'Etat 29 octobre 2003, *Commune de Saint-Cyr l'Ecole* ; Conseil d'Etat 23 juillet 2003, *SFR* ; Tribunal administratif de Marseille 9 mars 2004, *Société Orange SA.*

151 Conseil d'Etat 23 juin 2004, *Commune de Luisant* ; Conseil d'Etat 22 août 2002, *SFR.*

commune[152], et aux conventions d'occupation conclues entre les opérateurs et les communes en vue de l'implantation d'antennes[153].

Le contentieux principalement concerné est celui né des situations où un maire fait usage de ses pouvoirs de police administrative générale pour réglementer l'implantation d'antennes-relais sur le territoire de sa commune. En matière de télécommunication, il existe pourtant une police spéciale qui relève de la compétence du ministre chargé des télécommunications. Dans cette situation de concours de police générale et spéciale, la compétence du maire est limitée : il ne peut agir qu'en cas de péril imminent pour l'ordre public ou d'urgence justifiée par les circonstances locales. Or, le juge administratif n'a jamais encore considéré que de telles conditions ont été remplies et refuse au maire toute compétence à agir au titre de ses pouvoirs de police générale en la matière.

De la même manière, il ressort de la jurisprudence administrative que les considérations sanitaires relatives aux antennes-relais ne permettent au maire ni de s'opposer aux travaux d'implantation déclarés par les opérateurs, ni de demander la nullité d'une convention d'occupation du domaine communal destinée à de telles implantations. Toutefois, ces solutions sont nées d'une mise en balance de plusieurs intérêts publics et sont ainsi de nature à évoluer en fonction de l'état des connaissances scientifiques.

Le juge administratif est particulièrement réticent à utiliser, dans le domaine de la santé publique, le principe de précaution qui est un principe de droit de l'environnement. Le Conseil d'Etat n'a d'ailleurs jamais employé expressément, dans des affaires de santé publique, le terme « principe de précaution » mais s'est contenté d'évoquer une « démarche de précaution » ou un « comportement de précaution ». Dans ce contexte, l'argument de la dangerosité potentielle des antennes-relais est apparu peu efficace en contentieux administratif, conduisant les plaideurs à privilégier un contentieux judiciaire.

7.5.2 L'efficacité de l'argument de la dangerosité potentielle des antennes-relais devant le juge judiciaire

Dans l'ordre judiciaire, à défaut de prise de position par la Cour de cassation, les juridictions de second et de premier degrés ont développé, par des décisions d'espèce, une jurisprudence plus fluctuante. Dans son analyse du risque, le juge judiciaire semble cependant plus sensible à l'argument de la dangerosité potentielle des antennes-relais et a récemment accueilli ce moyen sur le fondement du principe de précaution. Il faut néanmoins attendre une décision de la Cour de Cassation en la matière pour connaître l'orientation précise de la jurisprudence judiciaire.

En matière judiciaire, les contentieux ayant donné lieu à la prise en compte par le juge de la question des risques sanitaires des antennes-relais concernent le trouble de voisinage[154], les pouvoirs du CHSCT[155], le régime de la copropriété[156], l'appréciation de la réticence dolosive[157], et

---

152 Tribunal administratif d'Amiens 18 novembre 2008, *Nouvion en Ponthieu.*

153 Conseil d'Etat 15 mars 2004, *Commune de Villasavary* ; Conseil d'Etat 19 mai 2003, *SPM Telecom* ; Tribunal administratif de Nancy 30 mars 2004, *Association Tesla.*

154 Cour d'appel de Versailles 4 février 2009, *Bouygues Telecom* ; Cour d'appel d'Aix en Provence 15 septembre 2008, *Bouygues Telecom* ; Cour d'appel de Bordeaux 20 septembre 2005, *Verdeau* ; Cour d'appel d'Aix en Provence 8 juin 2004, *Commune Roquette* ; Cour d'appel de Paris 7 janvier 2004, *Mariais* ; Cour d'appel de Paris 7 mai 2002, *Bourely* ; Tribunal de grande instance de Carpentras 16 février 2009, *SFR Cegetel* ; Tribunal de grande instance de Grasse 17 juin 2003, *SFR.*

155 Cour d'appel de Paris 5 novembre 2008, *CHSCT France Telecom.*

le pouvoir du juge des référés en matière de demande d'expertise[158] ainsi que face à un dommage prétendu imminent[159] ou à un trouble manifestement illicite[160].

La sensibilité du juge judiciaire à l'argument des risques des antennes-relais se retrouve notamment en matière de copropriété. La cour d'appel de Paris a, en 2005[161], reconnu qu' « *une potentialité de risque existe même s'il n'a pas encore pu être mesuré* » et qu' « *alors même que la parfaite innocuité [d'une installation d'antenne de radiotéléphonie mobile] n'est pas démontré, il ne saurait être admis qu'un syndicat de copropriétaires dont l'une des missions est d'assurer la sécurité de ses membres tant dans ses parties privatives que communes impose à quelque majorité que ce soit à l'un d'eux de supporter non un risque avéré mais son éventualité* ».

C'est sur le terrain du trouble anormal de voisinage que le juge judiciaire a réservé à l'argument des risques sanitaires des radiofréquences le meilleur accueil. La Cour d'appel de Bordeaux a reconnu en 2005[162] que constituait un préjudice réparable pour les riverains d'une antenne la dépréciation de la valeur de leur habitation en raison notamment de l'éloignement d'acheteurs potentiels influencés par l'idée répandue du risque associé à de telles antennes. La Cour d'appel de Versailles a même, en 2009[163], réparé la « *crainte légitime constitutive d'un trouble* » inspirée par l'absence de garantie de l'innocuité de cette antenne. En matière de réparation, le trouble de voisinage prend ici le relais de la responsabilité civile dont la voie avait été fermée par la Cour d'appel d'Aix-en-Provence énonçant en 2008[164] qu' « *en l'absence de risque sanitaire établi* » une demande de dommages-intérêts ne peut être accueillie. Cette cour a néanmoins accepté, en 2004[165], d'ordonner le déplacement de l'antenne mais sans octroi de dommages-intérêts.

C'est également sur le fondement de la « crainte » inspirée par les incertitudes scientifiques sur l'innocuité des radiofréquences que le Tribunal de grande instance de Carpentras a, en 2009[166], ordonné la démontage d'une antenne mais sans octroi de dommages-intérêts : il existe pour les riverains d'une antenne « *une crainte légitime d'une atteinte directe à leur santé constitutive d'un trouble dont le caractère anormal tient au fait qu'il porterait atteinte, une fois réalisé, à leur intégrité physique sans qu'il soit à ce jour possible d'en mesurer toute l'ampleur* ».

---

156 Cour d'appel de Paris 7 avril 2005, *SARL Pierre Valorisation Développement*.

157 La réticence dolosive est l'inexécution par l'une des parties à un contrat d'une obligation d'information préalable à la conclusion de ce contrat conduisant à vicier le consentement de l'autre partie. Cf : Cour d'appel de Montpellier 24 février 2004, *SFR* : dans le cadre d'une convention relative à l'installation d'un relais de radiotéléphonie, il n'y a pas de réticence dolosive à ne pas révéler à son cocontractant les risques potentiels liés à l'émission d'ondes électromagnétiques.

158 Cour d'appel de Rennes 22 novembre 2000, *Yared.*

159 Cour d'appel de Paris 15 mars 2000, *Moullier Istria* ; Tribunal de grande instance d'Angers 5 mars 2009, *Notre Dame d'Alencon.*

160 Tribunal de grand instance de Créteil 11 août 2009, *Puybaret, Leudière.*

161 Cour d'appel de Paris 7 avril 2005, *SARL Pierre Valorisation Développement.*

162 Cour d'appel de Bordeaux 20 septembre 2005, *Verdeau*.

163 Cour d'appel de Versailles 4 février 2009, *Bouygues Telecom.*

164 Cour d'appel d'Aix en Provence 15 septembre 2008, *Bouygues Telecom.*

165 Cour d'appel d'Aix en Provence 8 juin 2004, *SFR.*

166 Tribunal de grande instance de Carpentras 16 février 2009, *SFR Cegetel.*

Antérieurement, la Cour d'appel de Paris avait, en 2002[167], refusé de reconnaître que de telles installations étaient constitutives d'un trouble anormal de voisinage et n'avait réparé en 2004[168] que le seul trouble visuel causé par une antenne en indiquant que le trouble sanitaire n'était pas pour les demandeurs « *un élément de leur préjudice* ». Dans ce dernier arrêt, la Cour d'appel de Paris avait pris soin de préciser que « *si le caractère nocif pour la santé du voisinage immédiat n'est pas établi en l'état des connaissances scientifiques […] il convient de rechercher les solutions permettant d'assurer la protection de la santé de la population, tout en prenant en compte la protection de l'environnement et le maintien de la qualité du service rendu* ».

Cet accueil du juge judiciaire fait à l'argument de la dangerosité potentielle des antennes-relais semble n'avoir pas atteint le juge des référés dont l'office est en la matière limité par sa qualité de juge de l'évidence.

Ainsi, en matière de référé expertise, la Cour d'appel de Rennes a jugé en 2000[169] qu'une expertise médicale sur les risques qu'une station relais serait susceptible de présenter pour la santé des personnes vivant dans son voisinage serait « *inutile et en tout cas non pertinente* » dans la mesure où il n'existe « *aucune certitude quant à la réalité des risques pour la santé liés à l'installation des stations de téléphonie mobile* ». L'inutilité du recours à une expertise judiciaire est de même énoncée par la Cour d'appel de Paris en 2002[170]en ce qu'elle ne serait sollicitée qu'en raison « *de craintes subjectives* » et non sur des éléments objectifs.

Cependant, deux ordonnances récentes ont donné une pleine efficacité à l'argument de la dangerosité potentielle des antennes-relais, sur le fondement du principe de précaution.

En effet, le juge des référés du tribunal de grande instance d'Angers a, en 2009[171], dans une affaire où un projet d'implantation d'antennes à proximité d'une école ne permettait pas de vérifier le respect des valeurs limites réglementaires applicables en France, ordonné en référé, sur le fondement de la prévention d'un dommage imminent combiné au principe de précaution, l'interdiction d'une telle implantation *« en vue de prévenir un dommage grave et irréversible à l'environnement »*. De la même manière, le juge des référés du tribunal de grande instance de Créteil[172] a ordonné, en raison des risques de dommages à la santé, l'interdiction de l'installation d'une antenne située entre 15 et 50 mètres des appartements d'un immeuble. Il a considéré, sur le fondement du principe de précaution, qu'une telle installation constituait un trouble manifestement illicite.

Cette position n'est pourtant pas celle de la Cour d'appel de Paris qui, en 2000[173], a rappelé que « *si il ne peut être affirmé qu'il n'existe aucun risque pour la santé des personnes, la nature et l'intensité de ce risque, à le supposer établi, restent encore largement inconnues* » et que dès lors, les justiciables ne peuvent utilement invoquer un dommage imminent pour obtenir du juge des référés la cessation de travaux d'installation d'une antenne-relais de radiotéléphonie. Cette solution est d'ailleurs en cohérence avec la position actuelle du juge administratif qui refuse, dans

167 Cour d'appel de Paris 7 mai 2002, *Bourely.*

168 Cour d'appel de Paris 7 janvier 2004, *Mariais.*

169 Cour d'appel de Rennes 22 novembre 2000, *Yared.*

170 Cour d'appel de Paris 7 mai 2002, *Bourely*.

171 Tribunal de grande instance d'Angers 5 mars 2009, *Notre Dame D'Alençon.*

172 Tribunal de grande instance de Créteil 11 août 2009, *Puybaret, Leudière.*

173 Cour d'appel de Paris 15 mars 2000, *Moullier Istria.*

le contentieux de légalité des décisions de police générale, de reconnaître l'existence d'un péril imminent dans l'implantation d'une antenne-relais.

Quant au caractère manifestement illicite du trouble causé par l'implantation d'une antenne, cette solution inédite mérite d'être confirmée par des juridictions supérieures, statuant au fond, tant la portée donnée au principe de précaution y est importante. La Cour de cassation qui doit se prononcer prochainement dans une affaire de trouble de voisinage aura ainsi l'occasion de mettre à jour l'orientation de la jurisprudence judiciaire dans le contentieux des antennes-relais. Elle pourrait également venir préciser l'impact du principe de précaution en matière de santé publique.

8 Conclusions du groupe de travail [174]

Méthodologie d'expertise collective

Les technologies radiofréquences (RF) – c'est-à-dire utilisant des champs électromagnétiques dont la gamme de fréquences est comprise entre 9 kHz et 300 GHz – connaissent une très large diffusion dans le public. Parallèlement, leur développement s'est accompagné d'inquiétudes diverses, en fonction des applications considérées, portant notamment sur leurs possibles impacts sanitaires. Les recherches scientifiques se sont poursuivies à la fois sur les aspects physiques, les effets biologiques, cliniques et sanitaires et les dimensions psychologiques, sociales et politiques des questions associées aux radiofréquences.

L'Afsset a expertisé à plusieurs reprises le domaine des effets sanitaires des champs électromagnétiques radiofréquences, avec la publication d'avis et de rapports d'expertise collective en 2003 et 2005 sur la téléphonie mobile et en 2009 sur les systèmes d'identification par radiofréquences (RFID). A la demande de ses ministères de tutelles, l'Afsset présente ici une mise à jour des connaissances scientifiques relatives à l'ensemble des applications utilisant des champs électromagnétiques radiofréquences, hors RFID.

L'originalité de ce travail d'expertise collective réside notamment dans :

- la prise en compte de l'ensemble des radiofréquences, et non pas seulement la téléphonie mobile,
- le regard porté sur la question de l'hypersensibilité électromagnétique,
- la multidisciplinarité du groupe de travail qui intègre notamment des experts du domaine des sciences humaines et sociales,
- la présence d'un observateur du milieu associatif au sein du groupe de travail.

Le groupe de travail (GT), dont les 13 membres ont été sélectionnés après un appel public à candidatures d'experts, s'est réuni 13 fois – soit 22 jours – entre le 11 septembre 2008 et le 1er octobre 2009. Lors de ces réunions, ou lors de séances supplémentaires (5 séances complémentaires de tout ou partie du groupe de travail uniquement dédiées aux auditions), 19 auditions ont également été réalisées. En complément de ces auditions, 13 contributions écrites ont été sollicitées, (9 ont obtenu des réponses) sur des questions plus précises du groupe de travail.

Le comité d'experts spécialisés (CES) « agents physiques », avant même la mise en place du groupe de travail, a auditionné les quatre associations nationales françaises positionnées sur la thématique des risques sanitaires de la téléphonie mobile (Agir pour l'environnement, Criirem, Priartém et Robin des toits). Dans un souci de transparence, la Direction Générale de l'Afsset conjointement avec le Président du CES « agents physiques », a proposé aux associations, lors de ces auditions, de nommer un représentant commun à ces quatre associations pour être l'observateur du déroulement des travaux du GT radiofréquences. Alors que le Criirem et Robin des toits ont répondu défavorablement à cette proposition, Daniel Oberhausen, membre de

[174] NB : Mentionner dans les conclusions si des positions divergentes ont été exprimées pendant les travaux. Si oui : renvoyer à l'annexe 2 pour présenter leur synthèse.

l'association Priartém, a été proposé par Priartém et Agir pour l'environnement. Il a donc été nommé observateur au sein du GT radiofréquences et a ainsi assisté à toutes les réunions et a été invité aux différentes auditions, dès le mois de décembre 2008[175].

L'analyse bibliographique entreprise par le groupe de travail a été aussi exhaustive que possible, en dépit des fortes contraintes temporelles. Les travaux scientifiques pris en compte dans ce rapport sont, pour la plupart, issus de publications écrites dans des revues internationales anglophones soumises à l'avis d'un comité scientifique de lecture. Dans un souci d'exhaustivité, les références ainsi retenues ont été confrontées à celles d'autres rapports internationaux (rapports du Scenihr 2007 et 2009, rapport du MTHR 2007, rapport BioInitiative 2007, *etc*.). Ce rapport étant une actualisation des connaissances relatives aux effets sanitaires des radiofréquences, les travaux pris en compte sont, pour l'essentiel, ceux qui ont été publiés entre la sortie du dernier rapport de l'Afsset (début 2005) et le 1er avril 2009 pour ce qui concerne la gamme de fréquences supérieures à 400 MHz (comprenant la téléphonie mobile) ainsi que d'autres travaux antérieurs pour les bandes de fréquences qui n'avaient pas été étudiées auparavant par l'Afsset.

Controverse publique et préoccupations sociales :

Les enquêtes d'opinion montrent que les préoccupations que peut nourrir la population au sujet de certaines applications radiofréquences semblent réelles et se renforcent, en dépit d'un fort engouement pour les technologies de télécommunication sans fil. Cependant, ces préoccupations ne concernent pas seulement les éventuels risques sanitaires des champs électromagnétiques, mais portent également sur d'autres aspects comme la qualité de l'information, ou le degré de confiance qui lui est accordé, ou encore les modalités de la prise de décision dans ce domaine. C'est en partie ce qui explique que l'implantation des antennes de stations de base de téléphonie mobile cristallise aujourd'hui les inquiétudes, alors même que l'exposition aux radiofréquences qu'elles occasionnent est beaucoup plus faible que celle liée à l'usage du téléphone mobile.

Mais la controverse publique sur les radiofréquences ne saurait être réduite au supposé décalage entre un risque évalué par la science, et un « risque perçu », qui serait pour sa part mesuré par les sondages d'opinion. Elle met aux prises différents groupes d'acteurs qui tous mobilisent à la fois des arguments scientifiques, éthiques et économiques. Dans ce contexte, le traitement de la controverse publique peut difficilement se résumer à l'amélioration de l'information sur le sujet, mais il doit passer par la mise en place de procédures de concertation et de recherche associant la pluralité des acteurs concernés et susceptibles d'enclencher des mécanismes d'apprentissage mutuel. Au-delà de l'évaluation scientifique du risque, la controverse actuelle sur les radiofréquences pose ainsi plus généralement la question de la bonne gouvernance de ce type de questions, ce qui nécessite que soient menées de plus amples réflexions sur l'ouverture de l'expertise scientifique à la société ainsi que sur les procédures permettant d'organiser un débat public sur les enjeux scientifiques et techniques.

[175] Le rôle précis de D. Oberhausen, qui n'est pas intervenu en tant qu'expert au sein du groupe de travail, était d'observer le déroulement des travaux d'expertise. Il a ainsi été convié à toutes les réunions du groupe de travail, ainsi qu'aux différentes auditions programmées pendant le temps de l'expertise. L'observateur a pu s'exprimer, poser des questions, mais n'est pas intervenu dans le travail d'expertise lui-même.

Exposition aux radiofréquences

Il existe un très grand nombre de systèmes de communication et d'applications, basés sur des liaisons sans fil, qui utilisent les ondes électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences comme support pour transmettre des informations. Bien que tous ces systèmes aient leurs propres spécificités techniques (transmission analogique ou numérique, bandes de fréquences utilisées, type de modulation du signal, protocole de transmission des informations, *etc*.), ils ont pour base commune la physique de la propagation des ondes et le rayonnement d'un champ électromagnétique à partir d'une antenne dans l'environnement.

Parmi les systèmes utilisant les radiofréquences, on peut citer :

- les réseaux de diffusion de contenu (radiodiffusion, télédiffusion) pour lesquels un émetteur émet à puissance constante pour couvrir une zone plus ou moins étendue dans laquelle se trouvent des récepteurs (radio, télévision, *etc*.) ;
- les réseaux cellulaires (réseaux mobiles professionnels, TETRA, téléphonie mobile GSM 900 et 1800, téléphonie mobile UMTS, *etc*.) pour lesquels des stations de base fixes sont réparties sur un territoire (zone de couverture) afin d'assurer une continuité de service pour des équipements terminaux mobiles. Dans ce cas, les puissances d'émission sont variables en fonction du volume de trafic de communications sur le réseau ;
- les systèmes sans fil de moyennes et courtes portées, de puissances variables selon les technologies : Wi-Fi (liaison internet entre bornes d'accès et ordinateurs), *Bluetooth* (liaison sans fil par exemple entre périphériques informatiques), téléphones sans fil domestiques DECT, systèmes sans fil pour la domotique (gestion d'énergie) et la sécurité (alarme), *etc*.

Les évolutions de ces technologies sans fil sont très rapides et devraient largement se poursuivre dans les prochaines années. Elles concernent à la fois les techniques (nouveaux protocoles de communication, augmentation des débits de données transmises, évolutions technologiques des émetteurs, *etc*.) et les usages (vers plus de mobilité et de « sans fil », développements de nouvelles applications et marchés associés, *etc*.).

Les émetteurs associés à l'ensemble de ces applications utilisant les radiofréquences contribuent au champ électromagnétique ambiant présent dans l'environnement.

Pour caractériser l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques radiofréquences, on utilise deux indicateurs dépendant de la fréquence et des effets associés connus qui peuvent se produire dans le corps. Jusqu'à une fréquence d'environ 10 MHz, on utilise la mesure des courants induits dans le corps humain. A partir de 100 kHz, l'absorption d'énergie électromagnétique, qui peut se traduire par une élévation de température des tissus, est caractérisée par le débit d'absorption spécifique (DAS), qui s'exprime en W/kg. En pratique, il peut être extrêmement complexe de réaliser des mesures de DAS ou de courant induit dans le corps, notamment lorsque l'exposition est faible, comme c'est le cas pour des sources lointaines. Ainsi, pour caractériser l'exposition du public aux champs électromagnétiques radiofréquences, la physique de la propagation des ondes permet de distinguer deux configurations :

- lorsque l'on se trouve à proximité d'un émetteur (en zone de champ proche), la répartition des champs électromagnétiques est complexe et ne peut pas être décrite par des méthodes simples. L'exposition doit être quantifiée par la valeur du DAS ou des courants induits, qui peuvent être soit simulés par méthode numérique, soit mesurés en laboratoire sur des modèles (fantômes).
- Au-delà d'une certaine distance de l'émetteur (en zone de champ lointain), il est plus simple de caractériser l'exposition, au moyen de méthodes de simulation ou par la mesure *in situ* de l'intensité du champ électrique ou du champ magnétique.

Les données disponibles pour connaître l'exposition du public aux champs électromagnétiques radiofréquences sont relativement nombreuses pour les applications utilisant des fréquences supérieures à 400 MHz, mais beaucoup plus limitées pour les fréquences plus basses.

Ainsi, en zone de champ proche, de nombreuses mesures de DAS ont été réalisées en laboratoire pour des émetteurs comme les téléphones mobiles, les téléphones sans fil DECT, les interphones bébé, les cartes Wi-Fi, les clés USB 3G, *etc*. Dans le cadre de la certification obligatoire des terminaux mobiles, pour vérifier le respect des réglementations en vigueur, ces méthodologies de mesure sont encadrées par des normes.

En zone de champ lointain, des mesures *in situ* de champs électromagnétiques permettent d'évaluer l'exposition du public due à l'ensemble des émetteurs qui sont présents dans l'environnement (radiodiffusion, télédiffusion, antennes-relais de téléphonie mobile, *etc*.), sans recourir à une évaluation du DAS extrêmement complexe à réaliser dans ces conditions. Les nombreuses mesures réalisées selon le protocole de l'ANFR permettent de caractériser les niveaux d'exposition *maxima* générés par des émetteurs radiofréquences fixes. Ces mesures sont indispensables pour connaître ponctuellement les niveaux d'exposition dans une situation donnée (cour d'école, logement d'un particulier, *etc*.) et la répartition entre les différents émetteurs radioélectriques mais aussi, dans le cadre du protocole de l'ANFR pour vérifier le respect des valeurs limites d'exposition réglementaires. Elles permettent également d'évaluer l'évolution globale des niveaux d'exposition, au travers des synthèses que l'ANFR publie régulièrement. En outre, des campagnes de mesure ont déjà été réalisées avec des exposimètres individuels portables récemment développés qui devraient permettre de suivre l'exposition d'individus au fil du temps (une journée, une semaine, *etc*.).

Le rapport donne les résultats disponibles à ce jour sur les niveaux d'exposition de la population obtenus à partir des études de terrains et de la base de données de l'ANFR : ils sont tous inférieurs aux valeurs limites d'exposition réglementaires, et même souvent très en-dessous de ces valeurs limites.

En marge de la controverse publique sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques, de nombreux produits et systèmes de protection contre les champs électromagnétiques apparaissent sur le marché (*patch* anti ondes, *spray* anti ondes, vêtements métallisés, compensateur d'ondes, *etc*.). L'efficacité de ces produits n'est pas prouvée et peut être raisonnablement mise en doute.

Il ressort, de l'analyse des différentes technologies et réseaux de communications sans fil, et des données sur l'exposition de la population, un certain nombre de points :

- l'évolution très rapide des technologies et des usages des systèmes de télécommunications sans fil nécessite une adaptation progressive des normes et des protocoles d'évaluation des niveaux d'exposition (évolutions en cours du protocole de l'ANFR, évolutions des normes de mesure de DAS pour tenir compte des nouveaux usages du téléphone mobile, recherches en cours sur l'évaluation du DAS pour les enfants et fœtus, *etc*.) ;
- la mesure du DAS ou de champs électromagnétiques *in situ* nécessite un niveau d'expertise important en métrologie et en physique : connaissance précise des caractéristiques techniques des équipements et des signaux mesurés, estimation des incertitudes associées, analyse des résultats, *etc*. ;
- concernant les réseaux cellulaires de téléphonie mobile, l'ensemble des études analysées confirme la complexité de la répartition des niveaux d'exposition autour des antennes de stations de base. Cette complexité est notamment due à la grande variabilité des signaux, à la position et à la directivité des antennes, ainsi qu'à la présence d'obstacles (immeubles, relief, *etc*.). De plus, l'architecture de ces réseaux repose sur un équilibre entre les puissances émises par les antennes de stations de base et les puissances émises par les

téléphones mobiles. L'estimation de l'exposition du public nécessite de prendre en compte l'ensemble de ces paramètres ;

- en terme d'intensité de l'exposition, il faut rappeler la très forte prédominance de celle liée aux téléphones mobiles par rapport à celle due aux antennes de stations de base de téléphonie mobile ;
- à la demande du groupe de travail, des mesures en très basses fréquences ont été réalisées au voisinage d'antennes de station de base. Il ressort de ces mesures que les émetteurs radiofréquences et notamment les antennes des stations de base de téléphonie mobile n'émettent pas de rayonnements extrêmement basses fréquences de quelques dizaines de Hertz. Ce résultat est conforme aux caractéristiques de rayonnement attendues de ces antennes. Les seuls rayonnements en basses fréquences mesurables proviennent de l'alimentation de l'émetteur (courant du secteur à 50 Hz ou batterie du téléphone). Le découpage temporel du signal (cas du GSM) ne peut pas être assimilé au rayonnement d'un champ électromagnétique en très basses fréquences.

Aspects réglementaires

Ce rapport présente l'état de la réglementation liée aux effets sanitaires des champs électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences. Cette réglementation se traduit en termes de valeurs limites d'exposition (par exemple pour les courants induits, le DAS ou l'intensité des champs électromagnétiques) pour l'ensemble des radiofréquences. Dans la majorité des pays, comme c'est le cas pour la France, les valeurs limites d'exposition réglementaires retenues sont celles définies par l'Icnirp et recommandées par l'Union européenne, sur la base des effets sanitaires avérés.

Dans certains pays (en Europe : Suisse, Italie, Autriche, *etc*.) des valeurs limites spécifiques différentes ont été mises en place, notamment à des échelons locaux ou régionaux. Dans tous les cas, ces nouvelles définitions de valeurs limites d'exposition sont accompagnées de caractéristiques (notion de moyenne sur une certaine durée, définition de lieux sensibles, focalisation sur certaines bandes de fréquences, *etc*.) qui rendent très difficile la comparaison entre ces réglementations et surtout l'estimation de leur impact sur l'exposition réelle du public.

Etudes des effets biologiques, épidémiologiques et cliniques

L'observation d'un effet biologique, *a fortiori* en conditions expérimentales, ne signifie pas forcément qu'il entraîne un dommage et encore moins qu'il se traduise par un effet sur la santé. Le corps humain est soumis en permanence à un ensemble de *stimuli* internes et externes, entraînant éventuellement des réactions biologiques d'adaptation, ayant un impact sur les cellules, le fonctionnement des organes et la santé. Un impact sur la santé n'intervient que lorsque des effets biologiques entraînés par une agression dépassent les limites d'adaptation du système biologique considéré. Cela peut se produire de manière aiguë ou, dans certains cas, à plus long terme, à la suite d'agressions répétées (comme par exemple pour les rayonnements ionisants).

Les phénomènes biologiques pris en compte pour prévenir des effets sanitaires dépendent de l'interaction des ondes avec la matière à la fréquence considérée. Ils s'expriment différemment en fonction du type de champ (électrique ou magnétique), et de sa fréquence. Jusqu'à 100 kHz, il s'agit des champs et courants pouvant entraîner la stimulation de tissus excitables (système nerveux et muscles). Au-dessus de 10 MHz, l'absorption des radiofréquences devient prédominante et l'échauffement le mécanisme essentiel. Aux fréquences intermédiaires, entre 100 kHz et 10 MHz, on peut observer un mélange des deux phénomènes.

Concernant les bandes de fréquences pour lesquelles les effets dus à l'échauffement sont prépondérants, on distingue les effets thermiques des effets dits « non thermiques » :

- Les effets thermiques désignent les effets biologiques qui peuvent être mis en évidence sur des modèles de cultures cellulaires, animaux ou humains lorsque l'on observe une augmentation de température des cellules ou des tissus, consécutive à une exposition aux radiofréquences. Ce sont des effets qui concernent la partie haute du spectre des radiofréquences, au-dessus de 100 kHz, mais surtout à partir de 10 MHz. Ces effets thermiques sont utilisés dans les applications thérapeutiques des radiofréquences.
- Les effets non thermiques, ou « athermiques », apparaîtraient à des niveaux d'exposition non thermique, pour lesquels le corps peut réguler sa température, sans que l'on observe macroscopiquement d'augmentation de celle-ci. Dans le cas expérimental où des cultures cellulaires sont exposées aux radiofréquences, il est question d'effets dits « non thermiques » si aucune élévation de température susceptible de les provoquer ne peut être mesurée.

En raison de leurs spécificités (modes d'action, applications concernées, données disponibles), les effets biologiques des champs électromagnétiques radiofréquences ont été abordés par bande de fréquences : entre 9 kHz et 400 MHz et au-dessus de 400 MHz.

Etudes biologiques et épidémiologiques dans la bande 9 kHz- 400 MHz

Etudes biologiques et épidémiologiques dans la bande 9 kHz- 10 MHz

Peu d'études expérimentales et épidémiologiques sont disponibles concernant les effets des champs électromagnétiques des fréquences intermédiaires sur la santé. L'analyse de ces études ne permet pas de conclure quant à l'existence ou non d'effet délétère lié à des expositions aux radiofréquences dans la bande 9 kHz – 10 MHz à des niveaux non thermiques. On retient cependant la difficulté de caractérisation de l'exposition dans cette bande, et la nécessité d'entreprendre des études pilotes de caractérisation des sources d'émission avant de lancer des études épidémiologiques. Il faut noter que les valeurs limites d'exposition professionnelle peuvent être dépassées dans certaines applications industrielles.

En raison de l'accroissement de l'exposition au rayonnement dans cette bande de fréquences, il est important d'entreprendre de nouvelles études, et ceci particulièrement pour des expositions chroniques de faibles puissances permettant de confirmer la bonne adéquation des valeurs limites.

On note également quelques publications mentionnant des effets sur des systèmes cellulaires en division, qui mériteraient d'être poursuivies.

Eu égard au faible nombre de données, il persiste une zone d'incertitude qui empêche de proposer des conclusions définitives. Il apparaît donc nécessaire de réaliser des études épidémiologiques et des recherches *in vitro* et *in vivo*, dans cette bande de fréquences, portant en particulier sur la reproduction et le système nerveux.

Etudes biologiques et épidémiologiques dans la bande 10 MHz- 400MHz

Cette bande de fréquence (10 MHz – 400 MHz) est dominée par les applications industrielles et médicales. Dans certaines situations, des études ponctuelles ont montré que les valeurs limites d'exposition pour le public ou les professionnels étaient parfois dépassées.

En pratique, l'exposition réelle est souvent inconnue parce qu'hétérogène dans le temps et dans l'espace. Ceci entraîne de sévères limitations pour les enquêtes épidémiologiques que l'évolution des méthodes de modélisation et de calcul a cependant réduites dans les années récentes et que l'utilisation d'exposimètres multi-bandes individuels devrait améliorer.

L'évaluation de l'exposition est encore compliquée par l'existence de résonances dimensionnelles pour lesquelles l'absorption est accrue, ainsi que par l'existence de surexpositions partielles pour des expositions conformes aux valeurs limites, ou encore par des dépendances positionnelles et dimensionnelles (par exemple cas des enfants). A l'heure actuelle, d'importants travaux portant sur la dosimétrie dans ces bandes de fréquences sont entrepris.

Les résultats biologiques sont toujours limités et contradictoires. Cependant, certaines observations liées au système cardio-vasculaire et au système nerveux, ou à l'apoptose, devraient être approfondies. Il en est de même pour certaines applications médicales : stimulation nerveuse et action anti-tumorale avec, dans ce dernier cas, une action identifiée sur le cytosquelette.

Conclusion générale pour les études biologiques et épidémiologiques dans la bande 9 kHz – 400 MHz

La plupart des études ne suggèrent pas de risque pour la santé humaine à des niveaux d'exposition non thermiques. La majorité des études identifiées dans ces gammes de fréquences concernent les travailleurs. Les résultats biologiques sont toujours limités et contradictoires.

La majorité des études ne suggèrent pas d'effets sanitaires, à l'exception de quelques résultats, limités à une légère augmentation de malformations morphologiques mineures chez l'animal. Ces effets mineurs et non spécifiques semblent limités à certaines espèces animales et ne sont pas extrapolables à l'homme.

Il apparaît également nécessaire de mieux caractériser l'exposition professionnelle et du public. Le seuil d'apparition des effets liés à une exposition localisée est mal connu et devrait être étudié dans les recherches futures.

Etudes biologiques et cliniques pour les fréquences supérieures à 400 MHz

Les études originales publiées dans des revues anglophones à comité de lecture du 1er janvier 2005 au 1er avril 2009 ont été systématiquement analysées.

De nombreuses études de qualité sont parues aux cours de ces dernières années. Cependant, une proportion importante des études analysées présentent des lacunes méthodologiques, le plus souvent dans la partie dosimétrie, mais aussi, parfois, dans la partie biologie. Cela concerne la majorité des études qui montrent des effets positifs des radiofréquences, mais aussi certaines études négatives.

Il est apparu que trois revues internationales spécialisées, connues pour leur double compétence biologie/physique, prennent en compte quasi systématiquement la qualité des travaux dans ces deux domaines : *Radiation Research*, *Bioelectromagnetics*, *International Journal of Radiation Biology*. Ceci n'exclut pas que des études rigoureuses soient également publiées dans d'autres revues.

D'après le bilan global des analyses, sur 287 articles rattachés aux différentes catégories présentées, 226 articles de recherche ont été analysés, hors revues et articles non anglophones. Il peut être tentant de faire un simple comptage des résultats « positifs » et des résultats « négatifs ». Cependant, comme cela a été précisé précédemment, il est nécessaire de prendre en compte la validité des parties biologique et physique des études.

D'après les analyses systématiques qui ont été faites dans le cadre de cette expertise (cf. paragraphe 4.4.1), il apparaît que :

182 études ont été réalisées *in vivo*, sur l'animal, et *in vitro*, 82 études trouvent des effets biologiques des radiofréquences et 100 n'en montrent pas.

- Parmi les 82 études trouvant des effets, 45 n'ont pas une dosimétrie validée, soit 55 %. Parmi les 37 articles restants, seuls 9 présentent également une méthodologie très satisfaisante pour la partie biologique. Par conséquent, 11 % des études qui montrent des effets ont une méthodologie rigoureuse pour à la fois les parties physique et biologique.
- Parmi les 100 études ne trouvant pas d'effets, 13 n'ont pas une dosimétrie validée, soit 13 %. Parmi les 87 articles restants, 69 présentent une méthodologie très satisfaisante pour la partie biologique. Par conséquent 69 % des études qui ne montrent pas d'effet ont une méthodologie rigoureuse à la fois pour les parties physique et biologie.

44 études ont été réalisées sur l'humain, dont 20 montrent des effets et 24 n'en montrent pas. Le système d'exposition utilisé étant souvent un téléphone du commerce, le DAS maximal ne dépasse pas les limites réglementaires Il est néanmoins important que l'exposition soit caractérisée rigoureusement pour éliminer la possibilité d'autres effets liés à l'environnement des sujets.

- Parmi les 20 études montrant des effets, 4 équipes ont suivi des protocoles rigoureux pour la partie biologique, soit 20 % des études et seulement 2 équipes ont réalisé les expériences dans des conditions d'expositions parfaitement caractérisées.
- Parmi les 24 études ne trouvant pas d'effet, 17 présentent une méthodologie rigoureuse, soit 71 % des études, mais seulement 3 ou 4 équipes ont réalisé les expériences dans des conditions d'expositions parfaitement caractérisées.

Les résultats des études présentant des lacunes méthodologiques n'ont pas été pris en compte pour formuler des conclusions. Le nombre important de ces travaux s'explique par le fait que les expériences visant à rechercher les effets des radiofréquences sont justement construites de manière à mettre en évidence des effets très faibles et s'appuient donc sur les variations de systèmes biologiques très sensibles susceptibles d'être modifiées au moindre biais si toutes les précautions ne sont pas mises en œuvre.

Cependant, quelques études dotées d'une méthodologie apparemment correcte trouvent des effets mineurs et hétérogènes, elles pourraient être complétées et reproduites.

Les conclusions du groupe de travail sont donc fondées sur des travaux rigoureux et sur des résultats concordants obtenus par plusieurs études différentes.

Au vu de l'analyse détaillée et critique des travaux effectuée par le groupe de travail, et compte tenu par ailleurs de l'état antérieur des connaissances, aucune preuve convaincante d'un effet biologique particulier des radiofréquences n'est apportée pour des niveaux d'exposition non thermiques, dans les conditions expérimentales testées.

A ce jour, il ressort de cette analyse que, en conditions non thermiques, les radiofréquences supérieures à 400 MHz :

- ne modifient pas les grandes fonctions cellulaires telles que i) l'expression génique ; ii) la production de radicaux libres oxygénés (ROS) ; et iii) l'apoptose notamment des cellules d'origine cérébrale (provenant de gliome ou de neuroblastome humains) les plus exposées en cas d'utilisation d'un téléphone mobile ;

- ne sont pas un facteur de stress pour les cellules en comparaison des facteurs de stress avérés. Les seuls effets de stress observés sont des effets thermiques associés à des niveaux d'exposition élevés ;

- ne provoquent pas d'effet génotoxique ou co-génotoxique reproductibles à court ou à long terme et ne sont pas mutagènes dans les tests de mutagénicité classiques ;

- ne provoquent pas d'augmentation d'incidence ou l'aggravation de cancers dans les conditions expérimentales testées. Les résultats convergent donc vers une absence d'effet cancérogène ou co-cancérogène des radiofréquences pour des expositions pouvant excéder 4 W/kg ;

- n'ont pas d'effet délétère sur le système nerveux, que ce soit en termes de cognition et de bien-être, en termes d'intégrité de la barrière hémato-encéphalique ou en termes de fonctionnement cérébral général ;

- n'ont pas d'effet susceptible d'affecter le fonctionnement du système immunitaire ;

- n'ont pas d'impact sur la reproduction et le développement d'après les études les plus récentes et les mieux paramétrées. Cependant, les résultats ne sont pas homogènes, et plusieurs études devraient être répliquées dans des conditions d'expérimentation fiables, avec notamment des données dosimétriques ;

- n'ont pas d'effet délétère sur le système cochléo-vestibulaire après une exposition aiguë.

Et d'après les résultats d'un nombre limité d'études, les radiofréquences supérieures à 400 MHz :

- ne paraissent pas perturber le système cardio-vasculaire, en particulier la régulation de la pression artérielle et du rythme cardiaque ;

- n'auraient pas d'effet délétère sur le système oculaire ;

- ne modifieraient pas le taux de mélatonine chez l'homme.

Quelques études isolées ont porté sur des effets ponctuels, ce qui ne permet pas de donner une conclusion valide. Certaines mériteraient d'être reproduites.

Etudes épidémiologiques pour les fréquences supérieures à 400 MHz

Concernant les études épidémiologiques, il n'y a pas à ce jour de preuve de l'augmentation du risque de tumeur intracrânienne lié à l'utilisation régulière du téléphone mobile par un phénomène de promotion. Cependant, une partie de la plus grande étude cas-témoins dans ce domaine, l'étude Interphone, n'a pas encore été publiée. Même s'il est peu vraisemblable que les résultats globaux diffèrent, il restera à étudier les sources d'hétérogénéité entre toutes les études.

Certains résultats d'études suggèrent la possibilité d'une augmentation du risque de gliomes pour une utilisation d'une durée supérieure à 10 ans. D'autres semblent indiquer une diminution du risque de méningiomes pour une utilisation régulière de moins de 10 ans.

En revanche, les excès de lymphomes et leucémies observés et leur répétition sur trois cohortes de militaires exposés à des radars montrent que l'on ne peut à ce jour écarter la possibilité d'une association entre l'exposition professionnelle aux radars de plus de 2 GHz et le risque de lymphomes et leucémies. Un certain nombre d'études réalisées sur des populations professionnelles soulèvent des hypothèses d'augmentation de risque de cancer (tumeurs cérébrales, cancers des testicules, et mélanomes oculaires).

Hypersensibilité électromagnétique

Personne ne peut contester aujourd'hui la réalité du vécu des personnes qui attribuent leurs symptômes à l'exposition aux radiofréquences. Mais, aucune preuve scientifique d'une relation de

causalité entre l'exposition aux radiofréquences et l'hypersensibilité électromagnétique n'a pu être apportée jusqu'à présent.

La plupart des recherches sur l'hypersensibilité électromagnétique ont pâti, jusqu'à une date récente, d'une approche inadaptée de symptômes subjectifs (qui constituent l'essentiel de cette situation clinique). Un progrès vient d'être accompli avec la quantification de ces symptômes et leur regroupement en composantes. L'harmonisation des méthodes utilisées laisse espérer la mise au point d'un outil diagnostic acceptable. Parallèlement, un faisceau d'indices concordants a été recueilli, suggérant fortement que des facteurs neuro-psychiques individuels interviendraient, au moins en partie, dans la genèse de l'hypersensibilité électromagnétique.

Les seuls résultats positifs obtenus à ce jour sur le plan thérapeutique sont ceux obtenus par des thérapies comportementales ou des prises en charge globales.

Effets des radiofréquences sur les enfants

Une partie de la population nourrit des craintes quant aux effets des champs électromagnétiques radiofréquences sur la santé des fœtus, des enfants et des adolescents. Ces craintes sont justifiées par l'utilisation de plus en plus précoce des techniques de communication sans fil, par la durée bien plus longue de l'exposition à laquelle ces enfants seront soumis et par la vulnérabilité supposée plus grande de leurs tissus. Ces problèmes ont été abordés dans plusieurs parties du rapport. On peut en faire la synthèse suivante.

Des études et recherches dosimétriques spécifiques ont été réalisées ou sont actuellement en cours. Leurs premiers résultats ne sont pas homogènes. Ces études doivent être poursuivies, pour permettre par exemple de mieux évaluer l'impact de la variabilité des différentes morphologies et des caractéristiques physico-chimiques des tissus sur le DAS, et pour valider les modèles, les méthodes de calcul et les méthodes de mesure utilisés.

Des limitations d'ordre éthique évidentes font que les études et expérimentations impliquant la participation directe d'enfants ont été peu nombreuses et resteront peu nombreuses. Certaines ont mis en évidence une amélioration des performances cognitives qui reste à répliquer. Les recherches expérimentales sur l'animal ont été un peu plus nombreuses. Mais l'extrême diversité des modèles utilisés et les lacunes méthodologiques de la plupart de ces études ne permettent pas de formuler une conclusion cohérente sur le sujet. Ces recherches expérimentales doivent être poursuivies. Par ailleurs, une étude épidémiologique cas-témoin sur les tumeurs cérébrales de l'enfant est en cours.

Conclusion générale sur les effets sanitaires

L'actualisation de cette expertise collective a reposé sur l'analyse d'un très grand nombre d'études, dont la majorité a été publiée au cours des cinq dernières années. La validité de ces études a été analysée et n'est pas toujours acquise. Les données issues de la recherche expérimentale disponibles n'indiquent pas d'effets sanitaires à court terme ni à long terme de l'exposition aux radiofréquences. Les données épidémiologiques n'indiquent pas non plus d'effets à court terme de l'exposition aux radiofréquences. Des interrogations demeurent pour les effets à long terme, même si aucun mécanisme biologique analysé ne plaide actuellement en faveur de cette hypothèse.

9 Recommandations du groupe de travail

S'agissant des recommandations en matière d'études et de recherche

Pour les effets biologiques

Considérant en particulier :

- les lacunes méthodologiques relatives à la caractérisation de l'exposition en conditions expérimentales observées dans de nombreuses études ;
- l'éventualitéd'effets à très long terme sur des pathologies particulières et la nécessité de mieux documenter l'effet des expositions de très longues durées (chroniques) ;
- l'intérêt de poursuivre la recherche de certains effets biologiques éventuels pour des expositions à des niveaux « non thermiques » ;
- qu'un grand nombre d'études qui trouvent des résultats positifs à la suite d'expériences mal conduites n'ont pas lieu d'être reproduites, car d'autres travaux de qualité ont, par ailleurs, déjà répondu aux hypothèses soulevées ;

le groupe de travail recommande :

5. de veiller à la qualité méthodologique des études *in vitro* et *in vivo* concernant principalement la partie physique (caractérisation de l'exposition), mais également la partie biologie (expériences en aveugle, contrôles appropriés, identification des faux positifs, répétition des expériences, *etc.*) ;
6. de mener des études notamment sur la reproduction et le développement sur plusieurs générations d'animaux (par exemple sur des animaux dotés d'une prédisposition à des maladies pour lesquelles des gènes humains de susceptibilité sont connus - maladies neuro-dégénératives, certains cancers, maladies auto-immunes), à comparer toujours avec des animaux normaux et pour des conditions d'exposition réalistes parfaitement caractérisées ;
7. de répliquer quelques études analysées dans ce rapport et qui montrent des effets biologiques probablement physiologiques (sur le débit sanguin cérébral, *etc.*).

Pour l'épidémiologie

Considérant en particulier :

- les nombreuses lacunes méthodologiques relatives à la caractérisation de l'exposition des personnes ;
- l'intérêt d'établir une surveillance de l'exposition à destination de la population ;
- l'intérêt des études de cohortes ;
- que la question de l'association entre des troubles ressentis à proximité de stations de téléphonie mobile et l'exposition aux radiofréquences reste ouverte ;
- l'hétérogénéité observée entre les résultats des deux études cas-témoins obtenues par le groupe de recherche de Hardell et les autres études ;

le groupe de travail recommande :

1. d'intensifier les efforts pour inclure dans les études épidémiologiques la caractérisation la plus précise possible de l'exposition des populations cibles ;
2. d'évaluer la possibilité d'études épidémiologiques dans les populations de travailleurs exposés aux radiofréquences (comme par exemple les militaires exposés à certains radars, les professionnels intervenant sur les systèmes WiMax et TMP, les professionnels de la soudure du plastique, *etc.*) dans l'objectif d'identifier des effets éventuels observés pour les populations les plus exposées et d'évaluer la possibilité de l'extrapoler à la population générale ;
3. d'étudier la faisabilité d'une participation française à l'étude de cohorte internationale COSMOS ;
4. d'examiner la possibilité d'étudier la question des radiofréquences à partir de cohortes épidémiologiques existantes (ELFE, Constances) ;
5. de répliquer avec une meilleure puissance statistique des études du type de celles menées par Hutter *et al.* et Heinrich *et al.* ;
6. d'entreprendre une ré-analyse des données incluses dans les études du groupe de Hardell, en vue de comprendre leur hétérogénéité par rapport aux autres études ;
7. d'analyser la faisabilité et, éventuellement, d'entreprendre de nouvelles études pour des expositions chroniques de faible puissance aux fréquences inférieures à 400 MHz ;
8. d'effectuer une méta-analyse dès que les résultats de l'étude Interphone seront intégralement publiés. Même s'il est peu vraisemblable que les résultats globaux diffèrent, il restera à étudier les sources d'hétérogénéité entre toutes les études.

Pour l'hypersensibilité électromagnétique

Considérant en particulier :

- les progrès récents en matière de quantification des symptômes associés ;
- l'implication de différents facteurs neuro-psychiques individuels dans la genèse de l'hypersensibilité électromagnétique ;
- l'intérêt de mettre en place un protocole d'accueil et de suivi des patients hypersensibles ;

<u>le groupe de travail recommande :</u>

6. le développement et l'évaluation d'un outil de diagnostic clinique de l'hypersensibilité électromagnétique basé sur les travaux d'Eltiti *et al.* (2007), de Hillert *et al.* (2008) et de Brandt *et al.* (2009) ;
7. la définition des modalités d'une prise en charge globale des sujets hypersensibles (traitement des causes organiques de symptômes fonctionnels, traitement symptomatique des plaintes résiduelles fonctionnelles, prise en charge des facteurs neuro-psychiques identifiés, prise en compte d'autres facteurs environnementaux, *etc.*) ;
8. l'organisation d'un suivi des patients et, si possible, d'une centralisation de ce suivi ;
9. l'information des professionnels de santé ;
10. le développement de travaux de recherche (relations entre l'hypersensibilité électromagnétique et d'autres syndromes fonctionnels ; relation entre l'hypersensibilité électromagnétique et l'électrosensibilité ; modification de l'imagerie fonctionnelle cérébrale, *etc.*).

S'agissant des recommandations en matière d'expositions

Pour la caractérisation des expositions

Considérant en particulier :

- l'intérêt d'identifier les lieux (en intérieur et à l'extérieur) pour lesquels des niveaux d'exposition « atypiques » (c'est à dire dépassant le niveau moyen ambiant) seraient observés ;
- l'intérêt d'une connaissance approfondie des expositions individuelles, y compris en continu et à long terme ;
- l'intérêt de renforcer la description des expositions en vue de disposer d'une possibilité de surveillance ;
- l'intérêt de disposer d'une métrologie précise et reproductible ;
- l'intérêt d'objectiver les niveaux d'expositions réels de la population générale ;

le groupe de travail recommande :

1. qu'une attention particulière soit apportée à l'ensemble des protocoles de mesure afin qu'ils soient en phase avec les évolutions techniques. Le groupe de travail encourage en particulier les évolutions en cours du protocole de l'ANFR pour une meilleure prise en compte des bandes de fréquences Wi-Fi et WiMAX ;
2. de travailler sur la définition et le choix de grandeurs représentatives de l'exposition réelle des personnes aux ondes provenant de l'ensemble des émetteurs de radiofréquences ;
3. la poursuite du développement des exposimètres portables, des sondes de mesure fixes et autonomes, de méthodes de simulation et de cartographie de l'exposition et des études permettant de mieux définir leurs conditions d'utilisation ;
4. d'aller vers une description spatiale plus exhaustive de l'exposition aux champs radiofréquences, en milieu urbain notamment ;
5. le renforcement de la description des niveaux d'exposition pour les professionnels les plus concernés.

.

Pour les niveaux d'exposition

Considérant en particulier :

- le fort développement du recours aux technologies utilisant les radiofréquences qui pourraient conduire à un renforcement des niveaux d'exposition ;
- les préoccupations du public liées à l'exposition aux sources de radiofréquences ;
- le souhait de certains de modérer des niveaux d'exposition aux radiofréquences et les possibilités techniques disponibles permettant cette réduction pour des appareils du type téléphone mobile, veille-bébé, téléphone sans fil DECT, etc. ;

le groupe de travail informe sur les possibilités suivantes :

5. la généralisation de la mise à disposition des utilisateurs des indicateurs d'exposition maximale (DAS par exemple) pour tous les équipements personnels utilisant la technologie des radiofréquences (téléphones portables, DECT, veille-bébé, *etc*.) ;

6. l'engagement de réflexions quant à la diminution des niveaux d'exposition de la population générale dans les lieux présentant des valeurs sensiblement plus élevées que le niveau moyen ambiant ;
7. fournir aux utilisateurs d'équipements personnels émetteurs de radiofréquences des mesures simples pour leur permettre de réduire leur exposition, s'ils le souhaitent. Par exemple :
   - favoriser les modèles de téléphones sans fil DECT dont la puissance émise est minimisée,
   - généraliser la présence d'interrupteur de l'émission Wi-Fi sur les émetteurs de type « modem » ;
   - Permettre sans surcoût les accès filaires multiples sur les « modem » Wi-Fi ;
   - Le niveau d'exposition diminuant fortement avec la distance à l'émetteur, sur des équipements tels que la base d'un téléphone DECT, des périphériques *Bluetooth* ou des veille-bébé, une distance de quelques dizaines de centimètres entre l'appareil et l'utilisateur permet de diminuer considérablement l'exposition.
8. l'efficacité des dispositifs « anti-ondes » devrait être évaluée et portée à la connaissance du public.

Considérant :

- la demande de réduction des niveaux d'exposition induits par les antennes-relais de téléphonie mobile à une valeur qui ne repose sur aucune justification scientifique, demande exprimée notamment à l'occasion de la table ronde « radiofréquences, santé, environnement » du 25 mai 2009 ;

- que certaines villes françaises ont exprimé le souhait d'expérimenter des valeurs limites d'exposition différentes des valeurs limites réglementaires ;

le groupe de travail recommande de peser avec soin les conséquences d'une telle réduction, notamment :

1. en termes de multiplication du nombre des antennes ;
2. et en termes d'augmentation possible de l'exposition de la tête aux radiofréquences émises par les téléphones mobiles.

D'une manière plus générale

Considérant en particulier :

- la multidisciplinarité et la complexité de la description d'éventuels effets sanitaires associés aux radiofréquences ;
- la nécessaire indépendance des experts et des équipes de recherche impliqués sur cette thématique ;
- la nécessité d'une veille permanente quant aux nouveaux travaux produits sur un sujet en évolution constante ;
- la nécessaire implication sur les enjeux associés aux radiofréquences de l'ensemble des parties prenantes ;
- la nécessité de maintenir à jour l'état des connaissances à travers une veille bibliographique ;

le groupe de travail recommande :

1. la collaboration étroite entre physiciens, spécialistes en dosimétrie biologique et biologistes pour la réalisation des études sur les effets biologiques des radiofréquences ;
2. le financement des travaux de recherche par une structure garantissant l'indépendance et la transparence des études menées ;
3. la mise en place d'une structure permanente, associant l'ensemble des parties prenantes, assurant le suivi des connaissances en matière d'effet des radiofréquences et l'organisation de rencontres de travail régulières entre les scientifiques de toutes disciplines associés à la question ;
4. de favoriser la concertation et le débat autour des nouvelles implantations ou modifications d'émetteurs radiofréquences (téléphonie mobile, télévision mobile personnelle, WiMAX, etc.), en impliquant l'ensemble des acteurs concernés le plus en amont possible du dossier ;
5. de poursuivre au niveau national les enquêtes sur des échantillons représentatifs afin de suivre l'évolution des préoccupations des français vis-à-vis des radiofréquences ;
6. d'améliorer l'information du public, en particulier par la mise en place d'un portail internet notamment destiné aux collectivités locales.

10 Bibliographie

10.1 Publications

Cell phone use raises cancer risk. Swedish researchers demonstrate the first small link between cell phones and tumors, but is it time to panic? *Health News 2005;* 11(2):3.

Cell phones and heart devices. *Harv Heart Lett. 2005;* 16(4):7.

UV exposure guidance: a balanced approach between health risks and health benefits of UV and vitamin D. Proceedings of an international workshop, International Commission on Non-ionizing Radiation Protection. October 17-18, 2005. Munich, Germany. *Prog Biophys Mol Biol. 2006;* 92(1):1-184.

The First International Congress of the Croatian Association for Protection of Non-ionizing Radiation. Influence of non-ionizing radiation on the eyes and skin. Macular degeneration and skin cancer. Opatija, Croatia, 15-17 September 2006. *Coll Antropol. 2007;* 31 Suppl 1:1-110.

Le téléphone mobile: produit de la révolution au Venezuela. *Le Monde,* 21 mai 2009:25.

Aalto S., Haarala C., Bruck A. *et al.* (2006). Mobile phone affects cerebral blood flow in humans. *J Cereb Blood Flow Metab.;* 26(7):885-90.

Abdel-Rassoul G., El-Fateh O.A., Salem M.A. *et al.* (2007). Neurobehavioral effects among inhabitants around mobile phone base stations. *Neurotoxicology;* 28(2):434-40.

Abdus-salam A., Elumelu T., Adenipekun A. (2008). Mobile phone radiation and the risk of cancer; a review. *Afr J Med Med Sci.;* 37(2):107-18.

Abou-Ali G., Kaler K.V., Paul R. *et al.* (2002). Electrorotation of axolotl embryos. *Bioelectromagnetics*.; 23(3):214-23.

Adair E.R., Blick D.W., Allen SJ. *et al.* (2005). Thermophysiological responses of human volunteers to whole body RF exposure at 220 MHz. *Bioelectromagnetics*.; 26(6):448-61.

Adair E.R., Mylacraine K.S., Allen S.J. (2003). Thermophysiological consequences of whole body resonant RF exposure (100 MHz) in human volunteers. *Bioelectromagnetics*.; 24(7):489-501.

AFOM, Association des Maires de France. (2007). Guide des relations entre opérateurs et communes. En ligne : http://www.afom.fr/v4/STATIC/documents/GROC_page_a_page.pdf.

Afsse. (2003). Téléphonie mobile et santé. Maisons-Alfort: Afsse. 103 p.

Afsse. (2005). Téléphonie mobile et santé. Maisons-Alfort: Afsse. 128 p.

Afsset. (2009). Analyse des champs électromagnétiques associés aux lampes fluorescentes compactes. Protocole de mesure de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques émis par des lampes fluorescentes compactes. Maisons-Alfort: Afsset. 31 p.

Agarwal A., Deepinder F., Sharma R.K. *et al.* (2008). Effect of cell phone usage on semen analysis in men attending infertility clinic: an observational study. *Fertil Steril.;* 89(1):124-8.

Agarwal A., Desai N.R., Makker K. *et al.* (2009). Effects of radiofrequency electromagnetic waves (RF-EMW) from cellular phones on human ejaculated semen: an in vitro pilot study: *Fertil Steril.*; 92(4):1318-25.

Ahamed V.I., Karthick N.G., Joseph P.K. (2008). Effect of mobile phone radiation on heart rate variability. *Comput Biol Med.;* 38(6):709-12.

Ahlbom A., Bridges J., de Seze R. *et al.* (2008). Possible effects of electromagnetic fields (EMF) on human health--opinion of the scientific committee on emerging and newly identified health risks (SCENIHR).*Toxicology;* 246(2-3):248-50.

Ahlbom A., Feychting M., Cardis E. *et al.* (2007). Re: Cellular telephone use and cancer risk: update of a nationwide Danish cohort study. *J Natl Cancer Inst.;* 99(8):655; author reply 655-6.

Ahlbom A., Feychting M., Green A. *et al.* (2009). Epidemiologic evidence on mobile phones and tumor risk: a review. *Epidemiology;* 20(5):639-52.

Ahlbom A., Green A., Kheifets L. *et al.* (2004). Epidemiology of Health Effects of Radiofrequency Exposure. *Environ Health Perspect.;* 112(17): 1741-54.

Aitken R.J., Bennetts L.E., Sawyer D. *et al.* (2005). Impact of radio frequency electromagnetic radiation on DNA integrity in the male germline. *Int J Androl.;* 28(3):171-9.

Akca I.B., Ferhanoglu O., Yeung C.J. *et al.* (2007). Measuring local RF heating in MRI: Simulating perfusion in a perfusionless phantom. *J Magn Reson Imaging*.; 26(5):1228-35.

Aksoy U., Sahin S., Ozkoc S. *et al.* (2005). The effect of electromagnetic waves on the growth of Entamoeba histolytica and Entamoeba dispar. *Saudi Med J.;* 26(9):1388-90.

Alanko T., Hietanen M. (2007). Occupational exposure to radiofrequency fields in antenna towers. *Radiat Prot Dosimetry*.; 123(4):537-9.

Allison D. B., X. Cui, G. P. Page and M. Sabripour, Microarray data analysis: from disarray to consolidation and consensus. Nat.Rev. Genet. 7, 55–65 (2005) ;

Altpeter E.S., Roosli M., Battaglia M. *et al.* (2006). Effect of short-wave (6-22 MHz) magnetic fields on sleep quality and melatonin cycle in humans: the Schwarzenburg shut-down study. *Bioelectromagnetics*.; 27(2):142-50.

Alvarez-Alvarez J., Guillamon E., Crespo J.F. *et al.* (2005). Effects of extrusion, boiling, autoclaving, and microwave heating on lupine allergenicity. *J Agric Food Chem.;* 53(4):1294-8.

Amiel D. (2006). Comment: the effect of radiofrequency (RF) energy on human articular cartilage. *Am J Sports Med.;* 34(2):315; author reply 315-6.

Ammari M., Brillaud E., Gamez C. *et al.* (2008a). Effect of a chronic GSM 900 MHz exposure on glia in the rat brain. *Biomed Pharmacother.;* 62(4):273-81.

Ammari M., Jacquet A., Lecomte A. *et al.* (2008b). Effect of head-only sub-chronic and chronic exposure to 900-MHz GSM electromagnetic fields on spatial memory in rats. *Brain Inj.;* 22(13-14):1021-9.

Anderson H.J. (2008). The power of a telephone. *Health Data Manag.;* 16(7):53-4.

Anderson V., McIntosh R. (2006). Guidelines for the RF exposure assessment of metallic implants. International EMF dosimetry Hanbook. 39 p.

Andersson B., Berg M., Arnetz B.B. *et al.* (1996). ,A cognitive-behavioral treatment of patients suffering from "electric hypersensitivity". Subjective effects and reactions in a double-blind provocation study. *J Occup Environ Med.*; 38(8):752-8.

ANFR. (2004). Protocole de mesure in situ visant à vérifier pour les stations émettrices fixes, le respect des limitations, en terme de niveaux de référence, de l'exposition du public aux champs électromagnétiques prévues par le décret n° 2002-775 du 3 mai 2002. Ma isons-Alfort: ANFR. 57 p. (ANFR/DR 15-2.1, version 2.1).

ANFR. (2008). Guide technique. Modélisation des sites radioélectriques et des périmètres de sécurité pour le public - Version II. En ligne : http://www.anfr.fr/pages/sante/guide_champ.pdf.

Ang G.S., Lian P., Ng W.S. *et al.* (2007). Digital mobile telephones and interference of ophthalmic equipment. *Eye;* 21(1):29-32.

Anghileri L.J., Mayayo E., Domingo J.L. (2006a). Iron-radiofrequency synergism in lymphomagenesis. *Immunopharmacol Immunotoxicol.;* 28(1):175-83.

Anghileri L.J., Mayayo E., Domingo J.L. *et al.* (2005). Radiofrequency-induced carcinogenesis: cellular calcium homeostasis changes as a triggering factor. *Int J Radiat Biol.;* 81(3):205-9.

Anghileri L.J., Mayayo E., Domingo J.L. *et al.* (2006b). Evaluation of health risks caused by radio frequency accelerated carcinogenesis: the importance of processes driven by the calcium ion signal. *Eur J Cancer Prev.;* 15(3):191-5.

Antonini C., Trabalza-Marinucci M., Franceschini R. *et al.* (2006). In vivo mechanical and in vitro electromagnetic side-effects of a ruminal transponder in cattle. *J Anim Sci.;* 84(11):3133-42.

Arnetz B., Akerstedt T., Hillert L. *et al.* (2007). The effects of 884MHz GSM wireless communication signals on self-reported symptoms and sleep - an experimental provocation study. *PIERS Online;* 3(7):1148-50.

Arnetz B.B., Berg M. (1996). Melatonin and adrenocorticotropic hormone levels in video display unit workers during work and leisure. J Occup Environ Med.; 38(11):1108-10.

Arnetz B.B., Berg M., Anderzen I. *et al.* (1995). A nonconventional approach to the treatment of "environmental illness". *J Occup Environ Med;* 37(7):838-44.

Arns M., Van Luijtelaar G., Sumich A. *et al.* (2007). Electroencephalographic, personality, and executive function measures associated with frequent mobile phone use. *Int J Neurosci.;* 117(9):1341-60.

Arthur J.S. (2007). MAPK activation by radio waves. *Biochem J.;* 405(3):5-6.

Arya K., Agarwal M. (2007). Microwave prompted multigram synthesis, structural determination, and photo-antiproliferative activity of fluorinated 4-hydroxyquinolinones. *Bioorg Med Chem Lett.;* 17(1):86-93.

Atlasz T., Kellenyi L., Kovacs P. *et al.* (2006). The application of surface plethysmography for heart rate variability analysis after GSM radiofrequency exposure. *J Biochem Biophys Methods;* 69(1-2):233-6.

Augner C., Florian M., Pauser G. *et al.* (2009). GSM base stations: short-term effects on well-being. *Bioelectromagnetics;* 30(1):73-80.

Auvinen A., Toivo T., Tokola K. (2006). Epidemiological risk assessment of mobile phones and cancer: where can we improve? *Eur J Cancer Prev.;* 15(6):516-23.

Avdikos A., Karkabounas S., Metsios A. *et al.* (2007). Anticancer effects on leiomyosarcoma-bearing Wistar rats after electromagnetic radiation of resonant radiofrequencies. *Hell J Nucl Med.;* 10(2):95-101.

Bachmann M., Kalda J., Lass J. *et al.* (2005). Non-linear analysis of the electroencephalogram for detecting effects of low-level electromagnetic fields. *Med Biol Eng Comput.;* 43(1):142-9.

Bachmann M., Lass J., Kalda J. *et al.* (2006). Integration of differences in EEG analysis reveals changes in human EEG caused by microwave. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.;* 1:1597-600.

Bachmann M., Rubljova J., Lass J. *et al.* (2007). Adaptation of human brain bioelectrical activity to low-level microwave. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.;* 2007(4747-50.

Bachmann M., Tomson R., Kalda J. *et al.* (2007). Individual changes in human EEG caused by 450 MHz microwave modulated at 40 and 70 Hz. *Environmentalist*; 27:511-7.

Balbani A.P., Montovani J.C. (2008). Mobile phones: influence on auditory and vestibular systems. *Braz J Otorhinolaryngol.;* 74(1):125-31.

Balik H.H., Turgut-Balik D., Balikci K. *et al.* (2005). Some ocular symptoms and sensations experienced by long term users of mobile phones. *Pathol Biol. (Paris);* 53(2):88-91.

Balikci K., Cem Ozcan I., Turgut-Balik D. *et al.* (2005). A survey study on some neurological symptoms and sensations experienced by long term users of mobile phones. *Pathol Biol. (Paris)*; 53(1):30-4.

Balmori A. (2005). Possible effects of electromagnetic fields from phone masts on a population of white stork (Ciconia ciconia). *Electromagn. Biol Med.;* 24(2):109-19.

Balmori A. (2009). Electromagnetic pollution from phone masts. Effects on wildlife. *Pathophysiology;* 16(2-3):191-9.

Balzano Q., Swicord M. (2008). Comments on Neurophysiological effects of mobile phone electromagnetic fields on humans: a comprehensive review. *Bioelectromagnetics;* 29(5):410; discussion 411.

Bamiou D.E., Ceranic B., Cox R. *et al.* (2008). Mobile telephone use effects on peripheral audiovestibular function: a case-control study. *Bioelectromagnetics;* 29(2):108-17.

Baohong W., Jiliang H., Lifen J. *et al.* (2005). Studying the synergistic damage effects induced by 1.8 GHz radiofrequency field radiation (RFR) with four chemical mutagens on human lymphocyte DNA using comet assay in vitro. *Mutat Res.;* 578(1-2):149-57.

Baohong W., Lifen J., Lanjuan L. *et al.* (2007). Evaluating the combinative effects on human lymphocyte DNA damage induced by ultraviolet ray C plus 1.8 GHz microwaves using comet assay in vitro. *Toxicology;* 232(3):311-6.

Barbault A., Costa F.P., Bottger B. *et al.* (2009). Amplitude-modulated electromagnetic fields for the treatment of cancer: discovery of tumor-specific frequencies and assessment of a novel therapeutic approach. *J Exp Clin Cancer Res.*; 28:51.

Barker A.T., Jackson P.R., Parry H. *et al.* (2007). The effect of GSM and TETRA mobile handset signals on blood pressure, catechol levels and heart rate variability. *Bioelectromagnetics;* 28(6):433-8.

Barker A.T., Jalinous R., Freeston I.L. (1985). Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex. *Lancet*; 1(8437):1106-7.

Barnett J., Timotijevic L., Shepherd R. *et al.* (2007). Public responses to precautionary information from the Department of Health (UK) about possible health risks from mobile phones. *Health Policy;* 82(2):240-50.

Barsky A.J., Saintfort R., Rogers M.P. *et al.* (2002). Nonspecific medication side effects and the nocebo phenomenon. *JAMA;* 287(5):622-7.

Barteri M., Pala A., Rotella S. (2005). Structural and kinetic effects of mobile phone microwaves on acetylcholinesterase activity. *Biophys. Chem;* 113(3):245-53

Barth A., Winker R., Ponocny-Seliger E. *et al.* (2008b). A meta-analysis for neurobehavioural effects due to electromagnetic field exposure emitted by GSM mobile phones. *Occup Environ Med.;* 65(5):342-6.

Barthe Y., Gilbert C. (2005). Impuretés et compromis de l'expertise, une difficile reconnaissance. À propos des risques collectifs et des situations d'incertitude. In: Dumoulin L., LaBranche S., Robert C. *et al.* Grenoble:Presses universitaires de Grenoble. pp. 43-62.

Bartsch H., Bartsch C., Seebald E. *et al.* (2002). Chronic exposure to a GSM-like signal (mobile phone) does not stimulate the development of DMBA-induced mammary tumors in rats: results of three consecutive studies. *Radiat Res.;* 157(2):183-90.

Bassen H., Kainz W., Mendoza G. *et al.* (2006). MRI-induced heating of selected thin wire metallic implants--laboratory and computational studies-- findings and new questions raised. *Minim Invasive Ther Allied Technol.*; 15(2):76-84.

Bastide M., Youbicier-Simo B.J., Lebecq J.C. *et al.* (2001). Toxicologic Study of Electromagnetic Radiation Emitted by Television and Video Display Screens and Cellular Telephones on Chickens and Mice. *Indoor built environ.*; 10:291-8.

Batellier F., Couty I., Picard D. *et al.* (2008). Effects of exposing chicken eggs to a cell phone in "call" position over the entire incubation period. *Theriogenology;* 69(6):737-45.

Baumann J., Baumann J., Landstorfer F.M. *et al.* (2006). Evaluation of radiation exposure by UMTS mobile phones. *Electron Lett.;* 42(4):225-6.

Baumgardt-Elms C., Ahrens W., Bromen K. *et al.* (2002). Testicular cancer and electromagnetic fields (EMF) in the workplace: results of a population-based case-control study in Germany. *Cancer Causes Control.*; 13(10):895-902.

Beaubois E., Girard S., Lallechere S. *et al.* (2007). Intercellular communication in plants: evidence for two rapidly transmitted systemic signals generated in response to electromagnetic field stimulation in tomato. *Plant, Cell and Environment;* 30(834-44.

Bediz C.S., Baltaci A.K., Mogulkoc R. *et al.* (2006). Zinc supplementation ameliorates electromagnetic field-induced lipid peroxidation in the rat brain. *Tohoku J Exp Med.;* 208(2):133-40.

Behari J., Paulraj R. (2007). Biomarkers of induced electromagnetic field and cancer. *Indian J Exp Biol.;* 5(1):77-85.

Bell K.R., Hoffman J.M., Temkin N.R. *et al.* (2008). The effect of telephone counselling on reducing post-traumatic symptoms after mild traumatic brain injury: a randomised trial. *J Neurol Neurosurg Psychiatry;* 79(11):1275-81.

Bellieni C.V., Acampa M., Maffei M. *et al.* (2008). Electromagnetic fields produced by incubators influence heart rate variability in newborns. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed;* 93(4):298-301.

Belot A., Grosclaude P., Bossard N. *et al.* (2008). Cancer incidence and mortality in France over the period 1980-2005. *Rev Epidemiol Sante Publique;* 56(3):159-75.

Belson M., Kingsley B., Holmes A. (2007). Risk factors for acute leukemia in children: a review. *Environ Health Perspect.;* 115(1):138-45.

Belyaev I.Y., Grigoriev Y.G. (2007). Problems in assessment of risks from exposures to microwaves of mobile communication. *Radiats Biol Radioecol.;* 47(6):727-32.

Belyaev I.Y., Hillert L., Protopopova M. *et al.* (2005b). 915 MHz microwaves and 50 Hz magnetic field affect chromatin conformation and 53BP1 foci in human lymphocytes from hypersensitive and healthy persons. *Bioelectromagnetics;* 26(3):173-84.

Belyaev I.Y., Hillert L., Protopopova M. *et al.* (2005a). 915 MHz microwaves and 50 Hz magnetic field affect chromatin conformation and 53BP1 foci in human lymphocytes from hypersensitive and healthy persons. *Bioelectromagnetics;* 26(3):173-84.

Belyaev I.Y., Koch C.B., Terenius O. *et al.* (2006). Exposure of rat brain to 915 MHz GSM microwaves induces changes in gene expression but not double stranded DNA breaks or effects on chromatin conformation. *Bioelectromagnetics;* 27(4):295-306.

Belyaev I.Y., Markova E., Hillert L. *et al.* (2009a). Microwaves from UMTS/GSM mobile phones induce long-lasting inhibition of 53BP1/gamma-H2AX DNA repair foci in human lymphocytes. *Bioelectromagnetics;* 30(2):129-41.

Beneduci A., Chidichimo G., De Rose R. *et al.* (2005a). Frequency and irradiation time-dependant antiproliferative effect of low-power millimeter waves on RPMI 7932 human melanoma cell line. *Anticancer Res.;* 25(2A):1023-8.

Beneduci A., Chidichimo G., Tripepi S. *et al.* (2005b). Transmission electron microscopy study of the effects produced by wide-band low-power millimeter waves on MCF-7 human breast cancer cells in culture. *Anticancer Res.;* 25(2A):1009-13.

Beneduci A., Chidichimo G., Tripepi S. *et al.* (2007). Antiproliferative effect of millimeter radiation on human erythromyeloid leukemia cell line K562 in culture: ultrastructural- and metabolic-induced changes. *Bioelectrochemistry;* 70(2):214-20.

Benes M., Del Frate S., Villalta R. (2008). Evaluation of radiofrequency dielectric heaters workers exposure. *Radiat Prot Dosimetry.;* 129(4):397-402.

Bensaude-Vincent B. (2000). L'opinion publique et la science. A chacun son ignorance. Paris: Empêcheurs de penser en rond. 240 p.

Berg G., Spallek J., Schuz J. *et al.* (2006). Occupational exposure to radio frequency/microwave radiation and the risk of brain tumors: Interphone Study Group, Germany. *Am J Epidemiol.;* 164(6):538-48.

Berg-Beckhoff G., Blettner M., Kowall B. *et al.* (2009b). Mobile phone base stations and adverse health effects: phase 2 of a cross-sectional study with measured radio frequency electromagnetic fields. *Occup Environ Med.;* 66(2):124-30.

Bergdahl J., Stenberg B., Eriksson N. *et al.* (2004). Coping and self-image in patients with visual display terminal-related skin symptoms and perceived hypersensitivity to electricity. *Int Arch Occup Environ Health;* 77(8):538-42.

Bergdahl J., Marell L., Bergdahl M. *et al.* (2005). Psychobiological personality dimensions in two environmental-illness patient groups. *Clin Oral Investig*.; 9(4):251-6.

Bergdahl J., Larsson A., Nilsson L.G. *et al.* (2005). Treatment of chronic stress in employees: subjective, cognitive and neural correlates. *Scand J Psychol*.;46(5):395-402.

Bergqvist U., Vogel E. (1997). Possible health implications of subjective symptoms and electromagnetic fields. A report by a European group of experts for the European Commission, DG V. Solna: National Institute for Working Life. 170 p. (Arbete och Hälsa 1997:19).

Bernardi P., Cavagnaro M., Pisa S. *et al.* (2003). Specific absorption rate and temperature elevation in a subject exposed in the far-field of radiofrequency sources operating in the 10-900-MHz range. *IEEE Trans Biomed Eng.*; 50(3):295-304.

Bernardini C., Zannoni A., Turba M.E. *et al.* (2007). Effects of 50 Hz sinusoidal magnetic fields on Hsp27, Hsp70, Hsp90 expression in porcine aortic endothelial cells (PAEC). *Bioelectromagnetics;* 28(3):231-7.

Besset A., Espa F., Dauvilliers Y. *et al.* (2005). No effect on cognitive function from daily mobile phone use. *Bioelectromagnetics;* 26(2):102-8.

Bethke L., Murray A., Webb E. *et al.* (2008a). Comprehensive analysis of DNA repair gene variants and risk of meningioma. *J Natl. Cancer Inst.;* 100(4):270-6.

Bethke L., Webb E., Murray A. *et al.* (2008b). Comprehensive analysis of the role of DNA repair gene polymorphisms on risk of glioma. *Hum. Mol Genet.;* 17(6):800-5.

BfS. (2008). Rapport du Programme "Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm" (DMF). Bremerhaven: BfS.

Billaudel B., Haro E., Hurtier E. *et al.* (2008). Effect on brain blood barrier and heat shock proteins of wistar-Han rats exposed head only to GSM-1800 or UMTS signals. 30th International Meeting of the Bioelectromagnetics Society. San Diego, USA.

Binhi V.N., Blackman C.F. (2005). Analysis of the structure of magnetic fields that induced inhibition of stimulated neurite outgrowth. *Bioelectromagnetics;* 26(8):684-9.

BioInitiative Working Group (the). (2007). BioInitiative Report: A rationale for a biologically-based public exposure standard for electromagnetic fields (ELF and RF). Carpenter,D., Sage,C. (eds).

Bisht K.S., Moros E.G., Straube W.L. *et al.* (2002). The effect of 835.62 MHz FDMA or 847.74 MHz CDMA modulated radiofrequency radiation on the induction of micronuclei in C3H 10T(1/2) cells. *Radiat Res;* 157(5):506-15.

Black D.R. (2006). Mobile phones. precautionary options. *Med Lav.;* 97(2):221-5.

Blackman C. (2009). Cell phone radiation: Evidence from ELF and RF studies supporting more inclusive risk identification and assessment. *Pathophysiology;* 16(2-3):205-16.

Blackman C.F. (2006). Can EMF exposure during development leave an imprint later in life? *Electromagn Biol Med.;* 25(4):217-25.

Blake H. (2008). Mobile phone technology in chronic disease management. *Nurs Stand.;* 23(12):43-6.

Blank M. (2006). The Precautionary Principle must be guided by EMF research. *Electromagn Biol Med.;* 25(4):203-8

Blank M., Goodman R. (2008). A mechanism for stimulation of biosynthesis by electromagnetic fields: charge transfer in DNA and base pair separation. *J Cell Physiol.;* 214(1):20-6.

Blank M., Goodman R. (2009). Electromagnetic fields stress living cells. *Pathophysiology;* 16(2-3):71-8.

Blettner M., Berg G. (2000). Are mobile phones harmful? *Acta Oncol.;* 39(8):927-30.

Blettner M., Schlehofer B., Breckenkamp J. *et al.* (2009). Mobile phone base stations and adverse health effects: phase 1 of a population-based, cross-sectional study in Germany. *Occup Environ Med.;* 66(2):118-23.

Blettner M., Schlehofer B., Samkange-Zeeb F. *et al.* (2007b). Medical exposure to ionising radiation and the risk of brain tumours: Interphone study group, Germany. *Eur J Cancer;* 43(13):1990-8.

Boice J.D., McLaughlin J.K. (2006). Concerning mobile phone use and risk of acoustic neuroma. *Br J Cancer;* 95(1):130.

Borraz O., Devigne M., Salomon D. (2004). Controverses et mobilisations autour des antennes-relais de téléphonie mobile. Paris: Centre de sociologie des organisations. 159 p.

Borraz O. (2008). Les politiques du risque. Paris: Presses de Sciences Po.

Bortkiewicz A., Gdicka E., Zmyslony M. (1996). Heart rate variability in workers exposed to medium-frequency electromagnetic fields. *J Autonom Nervous system*; 59(3):91-97.

Boscol P., Di Sciascio M.B., D'Ostilio S. *et al.* (2001). Effects of electromagnetic fields produced by radiotelevision broadcasting stations on the immune system of women. *Sci Total Environ.;* 273(1-3):1-10.

Boscolo P., Di Giampaolo L., Di Donato A. *et al.* (2006). The immune response of women with prolonged exposure to electromagnetic fields produced by radiotelevision broadcasting stations. *Int J Immunopathol Pharmacol.;* 19(4 Suppl):43-8.

Boscolo P., Di Gioacchino M., Di Giampaolo L. *et al.* (2007). Combined effects of electromagnetic fields on immune and nervous responses. *Int J Immunopathol Pharmacol.;* 20(2 Suppl 2):59-63.

Boutry C.M., Kuehn S., Achermann P. *et al.* (2008). Dosimetric evaluation and comparison of different RF exposure apparatuses used in human volunteer studies. *Bioelectromagnetics;* 29(1):11-9.

Bouyer J., Hemon D., Cordier S. *et al*. (1995). Epidémiologie. Principes et méthodes quantitatives. Paris: Inserm. 498 p.

Brand S., Heller P., Bircher A.J. *et al.* (2009). Patients with environment-related disorders: comprehensive results of interdisciplinary diagnostics. *Int J Hyg Environ Health;* 212(2):157-71.

Brazma A., Hingamp P., Quackenbush J. *et al.* (2001). Minimum information about a microarray experiment (MIAME)-toward standards for microarray data. *Nat. Genet.;* 29(4):365-71.

Breckenkamp J., Berg G., Blettner M. (2003). Biological effects on human health due to radiofrequency/microwave exposure: a synopsis of cohort studies. *Radiat Environ Biophys.*; 42(3):141-54.

Brescia F., Sarti M., Massa R. *et al.* (2009). Reactive oxygen species formation is not enhanced by exposure to UMTS 1950 MHz radiation and co-exposure to ferrous ions in Jurkat cells. *Bioelectromagnetics*.; 30(7):525-35.

Brewer N.T., Hallman W.K., Kipen H.M. (2008). The symmetry rule: a seven-year study of symptoms and explanatory labels among Gulf War veterans. *Risk Anal.;* 28(6):1737-48.

Briggs D., Abellan J.J. and Fecht D. (2008) Environmental inequity in England: Small area associations between socio-economic status and environmental pollution. *Social Science & Medicine*; 67: 1612–1629

Brillaud E., Piotrowski A., de Seze R. (2007). Effect of an acute 900MHz GSM exposure on glia in the rat brain: a time-dependent study. *Toxicology;* 238(1):23-33.

Brown P. (1992). Popular Epidemiology and Toxic Waste Contamination: Lay and Professional Ways of Knowing. *J Health Soc Behav.;* 33(3):267-81.

Brownlee S., Leventhal H., Leventhal E.A. (2000). Regulation, self-regulation, and construction of the self in the maintenance of physical health. In: Boekartz M., Pintrick P.R., Zeidner M. *Handbook of Self-Regulation. Research, theory and applications*. San Diego, CA:Elsevier Academy Press. pp. 369-93.

Brusque C., Alauzet A. (2008) Analysis of the individual factors affecting mobile phone use while driving in France: Socio-demographic characteristics, car and phone use in professional and private contexts. A*ccident Analysis and Prevention*; 40: 35–44

Budak G.G., Muluk N.B., Budak B. *et al.* (2009). Effects of intrauterine and extrauterine exposure to GSM-like radiofrequency on distortion product otoacoustic emissions in infant male rabbits. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol.;* 73(3):391-9.

Burch J.B., Clark M., Yost M.G. *et al.* (2006). Radio frequency nonionizing radiation in a community exposed to radio and television broadcasting. *Environ Health Perspect.;* 114(2):248-53.

Burgess A. (2007). Comparing national responses to perceived health risks from mobile phone masts. *Health, Risk & Society*; 4 (2): 175-188

Burgess A. (2007). Mobile Phones and Service Stations: Rumour, Risk and Precaution. *Diogenes*; 54: 125-139

Buttiglione M., Roca L., Montemurno E. *et al.* (2007). Radiofrequency radiation (900 MHz) induces Egr-1 gene expression and affects cell-cycle control in human neuroblastoma cells. *J Cell Physiol.;* 213(3):759-67.

Callon M. (1998). Des différentes formes de démocratie technique. *Annales des mines;* 9:63-73.

Callon M., Lascoumes P., Barthe Y. (2001). Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique. Paris: Seuil. 358 p.

Cambrosio A., Limoges C. (1991). Controverses publiques: les limites de l'information. *Biofutur;* 100:87-90.

Canadian Cancer Society. (2008). Canadian Cancer Statistics. En ligne : http://www.cancer.ca/vgn/images/portal/cit_86751114/10/34/614137951cw_library_WYNTK_Bladder_Punjabi2005.pdf.

Canguilhem G. (1966). Le normal et le pathologique. Paris: P.U.F. 240 p.

Caplan L.S., Schoenfeld E.R., O'Leary E.S. *et al.* (2000). Breast cancer and electromagnetic fields--a review. *Ann Epidemiol.;* 10(1):31-44.

Capri M., Salvioli S., Altilia S. *et al.* (2006). Age-dependent effects of in vitro radiofrequency exposure (mobile phone) on CD95+ T helper human lymphocytes. *Ann N Y Acad Sci.;* 1067(493-9.

Capri M., Scarcella E., Bianchi E. *et al.* (2004). 1800 MHz radiofrequency (mobile phones, different Global System for Mobile communication modulations) does not affect apoptosis and heat shock protein 70 level in peripheral blood mononuclear cells from young and old donors. *Int J Radiat Biol.;* 80(6):389-97.

Caraglia M., Marra M., Mancinelli F. *et al.* (2005). Electromagnetic fields at mobile phone frequency induce apoptosis and inactivation of the multi-chaperone complex in human epidermoid cancer cells. *J Cell Physiol.;* 204(2):539-48.

Cardis E., Deltour I., Mann S. *et al.* (2008). Distribution of RF energy emitted by mobile phones in anatomical structures of the brain. *Phys. Med Biol.;* 53(11):2771-83.

Cardis E., Kilkenny M. (1999). International Case Control Study of Cancers of Brain and Salivary Gland. Report of the Feasibility Study. Lyon: IARC. (IARC Internal Report 99/004).

Cardis E., Kilkenny M. (2001). INTERPHONE International Case Control Study of Tumours of the Brain and Salivary Glands - Protocol, rev. 1. Lyon: IARC. 41 p. (IARC Internal Report 01/002).

Cardis E., Richardson L., Deltour I. *et al.* (2007). The INTERPHONE study: design, epidemiological methods, and description of the study population. *Eur J Epidemiol.;* 22(9):647-64.

Castro A., Lassaletta L., Bastarrica M. *et al.* (2006). Comparison of different mobile telephones in Combi40+ users. *Acta Otolaryngol.;* 126(7):714-7.

Caubet R., Pedarros-Caubet F., Chu M. *et al.* (2006). A radio frequency electric current enhances antibiotic efficacy against bacterial biofilms. *Antimicrob Agents Chemother*; 48(12):4662-4.

CDC. (2001). Investigation of Human Health Effects Associated with Potential Exposure to Genetically Modified Corn. Report to the U.S. Food and Drug Administration. 24 p.

Centre for Evidence-Based Medicine. (2009). Oxford Centre for Evidence-based Medicine - Levels of Evidence. En ligne : http://www.cebm.net.

Chan S.S., So W.K., Wong D.C. *et al.* (2007). Improving older adults' knowledge and practice of preventive measures through a telephone health education during the SARS epidemic in Hong Kong: a pilot study. *Int J Nurs Stud.;* 44(7):1120-7.

Chang K., Chang W.H., Tsai M.T. *et al.* (2006). Pulsed electromagnetic fields accelerate apoptotic rate in osteoclasts. *Connect Tissue Res.;* 47(4):222-8.

Chang S.K., Choi J.S., Gil H.W. *et al.* (2005). Genotoxicity evaluation of electromagnetic fields generated by 835-MHz mobile phone frequency band. *Eur J Cancer Prev.;* 14(2):175-9.

Chapman S., Wutzke S. (1997). Not in our back yard: media coverage of community opposition to mobile phone towers--an application of Sandman's outrage model of risk perception. *Aust. N Z. J Public Health;* 21(6):614-20.

Charpentier D. (2002). Exposition aux rayonnements électromagnétiques. Verneuil-en-Halatte: INERIS. 45 p. (INERIS-DCE-LEEL-DCh 2002 28434).

Chateauraynaud F., Torny D. (1999). Les sombres précurseurs. Une sociologie pragmatique de l'alerte et du risque. Paris: Éditions de l'EHESS. 476 p.

Chauhan V., Mariampillai A., Bellier P.V. *et al.* (2006a). Gene expression analysis of a human lymphoblastoma cell line exposed in vitro to an intermittent 1.9 GHz pulse-modulated radiofrequency field. *Radiat Res.;* 165(4):424-9.

Chauhan V., Mariampillai A., Gajda G.B. *et al.* (2006b). Analysis of proto-oncogene and heat-shock protein gene expression in human derived cell-lines exposed in vitro to an intermittent 1.9 GHz pulse-modulated radiofrequency field. *Int J Radiat Biol.;* 82(5):347-54.

Chauhan V., Mariampillai A., Kutzner B.C. *et al.* (2007a). Evaluating the biological effects of intermittent 1.9 GHz pulse-modulated radiofrequency fields in a series of human-derived cell lines. *Radiat Res.;* 167(1):87-93.

Chauhan V., Qutob S.S., Lui S. *et al.* (2007b). Analysis of gene expression in two human-derived cell lines exposed in vitro to a 1.9 GHz pulse-modulated radiofrequency field. *Proteomics;* 7(21):3896-905.

Chemeris N.K., Gapeyev A.B., Sirota N.P. *et al.* (2006). Lack of direct DNA damage in human blood leukocytes and lymphocytes after in vitro exposure to high power microwave pulses. *Bioelectromagnetics;* 27(3):197-203.

Chen Y. L. Driver personality characteristics related to self-reported accident involvement and mobile phone use while driving. (2007). *Safety Science*; 45: 823–831

Chen Y.P., Jia J.F., Han X.L. (2009). Weak microwave can alleviate water deficit induced by osmotic stress in wheat seedlings. *Planta;* 229(2):291-8.

Chou C.K. (2007). Thirty-five years in bioelectromagnetics research. *Bioelectromagnetics;* 28(1):3-15.

Christ A., Kuster N. (2005a). Differences in RF energy absorption in the heads of adults and children. *Bioelectromagnetics;* Suppl 7:S31-S44.

Christ A., Samaras T., Klingenbock A. *et al.* (2006). Characterization of the electromagnetic near-field absorption in layered biological tissue in the frequency range from 30 MHz to 6,000 MHz. *Phys Med Biol.;* 51(19):4951-65.

Christensen H.C., Schuz J., Kosteljanetz M. *et al.* (2005). Cellular telephones and risk for brain tumors: a population-based, incident case-control study. *Neurology;* 64(7):1189-95.

Christensen H.C., Schuz J., Kosteljanetz M. *et al.* (2004). Cellular telephone use and risk of acoustic neuroma. *Am J Epidemiol.;* 159(3):277-83.

Chuian O.M., Temur'iants N.A., Makhonina M.M. *et al.* (2005). [Effect of hypokinetic stress and low intensity electromagnetic field of extremely high frequency on changes of cytokine concentration in rat blood]. *Fiziol Zh.;* 51(6):70-8.

Cinel C., Boldini A., Russo R. *et al.* (2007). Effects of mobile phone electromagnetic fields on an auditory order threshold task. *Bioelectromagnetics;* 28(6):493-6.

Cinel C., Russo R., Boldini A. *et al.* (2008). Exposure to mobile phone electromagnetic fields and subjective symptoms: a double-blind study. *Psychosom. Med.;* 70(3):345-8.

Cioffi D. (1991). Beyond attentional strategies: cognitive-perceptual model of somatic interpretation. *Psychol Bull.;* 109(1):25-41.

Clapp R.W., Jacobs M.M., Loechler E.L. (2008). Environmental and occupational causes of cancer: new evidence 2005-2007. *Rev Environ Health;* 23(1):1-37.

Clark M.L., Burch J.B., Yost M.G. *et al.* (2007). Biomonitoring of estrogen and melatonin metabolites among women residing near radio and television broadcasting transmitters. *J Occup Environ Med.;* 49(10):1149-56.

Coggon D. (2006). Health risks from mobile phone base stations. *Occup Environ Med.;* 63(5):298-9.

Cohen J.T., Graham J.D. (2003). A revised economic analysis of restrictions on the use of cell phones while driving. *Risk Anal.;* 23(1):5-17.

Coker A.L., Sanderson M., Ellison G.L. *et al.* (2006). Stress, coping, social support, and prostate cancer risk among older African American and Caucasian men. *Ethn Dis.;* 16(4):978-87.

Collin A. (2007). Dosimétrie de systèmes d'exposition pour l'étude in vivo ou in vitro des interactions des ondes électromagnétiques décimétriques et centimétriques avec le vivant. Thèse de Doctorat en Electronique. Université de Limoges, Faculté des sciences et techniques.

Colonna A. (2005). [Cellular phones and cancer: current status]. *Bull Cancer;* 92(7):637-43

Comby J.-P. (2008). Créer un climat favorable. Les enjeux liés aux changements climatiques : valorisation publique, médiatisation et appropriations au quotidien. Thèse de doctorat en sciences de l'information et de la Communication. Université Paris II.

Conejo-Garcia A., Nunez M.C., Marchal J.A. *et al.* (2008). Regiospecific microwave-assisted synthesis and cytotoxic activity against human breast cancer cells of (RS)-6-substituted-7- or 9-(2,3-dihydro-5H-1,4-benzodioxepin-3-yl)-7H- or -9H-purines. *Eur J Med Chem.;* 43(8):1742-8.

Conil E., Hadjem A., Lacroux F. *et al.* (2008a). Variability analysis of SAR from 20 MHz to 2.4 GHz for different adult and child models using finite-difference time-domain. *Phys. Med Biol.;* 53(6):1511-25.

Cook A., Woodward A., Pearce N. *et al.* (2003). Cellular telephone use and time trends for brain, head and neck tumours. *N Z. Med J.;* 116(1175):U457.

Cooper T.G., Mann S.M., Khalid M. *et al.* (2006). Public exposure to radio waves near GSM microcell and picocell base stations. *J Radiol. Prot.;* 26(2):199-211.

Cosquer B., Galani R., Kuster N. *et al.* (2005a). Whole-body exposure to 2.45 GHz electromagnetic fields does not alter anxiety responses in rats: a plus-maze study including test validation. *Behav Brain Res.;* 156(1):65-74.

Cosquer B., Kuster N., Cassel J.C. (2005b). Whole-body exposure to 2.45 GHz electromagnetic fields does not alter 12-arm radial-maze with reduced access to spatial cues in rats. *Behav Brain Res.;* 161(2):331-4.

Cosquer B., Vasconcelos A.P., Frohlich J. *et al.* (2005c). Blood-brain barrier and electromagnetic fields: effects of scopolamine methylbromide on working memory after whole-body exposure to 2.45 GHz microwaves in rats. *Behav Brain Res.;* 161(2):229-37.

Cotgreave I.A. (2005). Biological stress responses to radio frequency electromagnetic radiation: are mobile phones really so (heat) shocking? *Arch Biochem Biophys.;* 435(1):227-40.

Crasson M. (2005). L'hypersensibilité à l'électricité : une approche multidisciplaire pour un problème multifactoriel. *Eur Rev Appl Psychol.;* 55(1):51-67.

Croft R.J., Hamblin D.L., Spong J. *et al.* (2008a). The effect of mobile phone electromagnetic fields on the alpha rhythm of human electroencephalogram. *Bioelectromagnetics;* 29(1):1-10.

Croft R.J., McKenzie R.J., Inyang I. *et al.* (2008b). Mobile phones and brain tumours: a review of epidemiological research. *Australas Phys Eng Sci Med.;* 31(4):255-67.

Crouzier D., Perrin A., Torres G. *et al.* (2009). Pulsed electromagnetic field at 9.71GHz increased free radical production in yeast (Saccharomyces cerevisiae). *Pathol Biol. (Paris);* 57(3):245-51.

Crozier S., Trakic A., Wang H. *et al.* (2007). Numerical study of currents in workers induced by body-motion around high-ultrahigh field MRI magnets. *J Magn Reson Imaging*.; 26(5):1261-77.

Curcio G., Ferrara M., Limongi T. *et al.* (2009). Acute mobile phones exposure affects frontal cortex hemodynamics as evidenced by functional near-infrared spectroscopy. *J Cereb. Blood Flow Metab.;* 29(5):903-10.

Curcio G., Ferrara M., Moroni F. *et al.* (2005). Is the brain influenced by a phone call? An EEG study of resting wakefulness. *Neurosci Res.;* 53(3):265-70.

Curcio G., Valentini E. (2008). Response to Comments by Balzano and Swicord on ‘‘Neurophysiological Effects of Mobile Phone Electromagnetic Fields on Humans: A Comprehensive Review’’. *Bioelectromagnetics;* 29:411.

Curcio G., Valentini E., Moroni F. *et al.* (2008). Psychomotor performance is not influenced by brief repeated exposures to mobile phones. *Bioelectromagnetics;* 29(3):237-41.

D'Ambrosio G., Massa R., Scarfi M.R. *et al.* (2002). Cytogenetic damage in human lymphocytes following GMSK phase modulated microwave exposure. *Bioelectromagnetics;* 23(1):7-13.

Dahmen N., Ghezel-Ahmadi D., Engel A. (2009). Blood laboratory findings in patients suffering from self-perceived electromagnetic hypersensitivity (EHS). *Bioelectromagnetics;* 30(4):299-306.

Das-Munshi J., Rubin G.J., Wessely S. (2006). Multiple chemical sensitivities: A systematic review of provocation studies. *J Allergy Clin Immunol.;* 118(6):1257-64.

Dasdag S., Akdag M.Z., Ulukaya E. *et al.* (2008). Mobile phone exposure does not induce apoptosis on spermatogenesis in rats. *Arch Med Res.;* 39(1):40-4.

Dasenbrock C. (2005). Animal carcinogenicity studies on radiofrequency fields related to mobile phones and base stations. *Toxicol Appl Pharmacol.;* 207(2 Suppl):342-6.

Davanipour Z., Sobel E. (2009). Long-term exposure to magnetic fields and the risks of Alzheimer's disease and breast cancer: Further biological research. *Pathophysiology;* 16(2-3):149-56.

David A.S., Wessely S.C. (1995). The legend of Camelford: medical consequences of a water pollution accident. *J Psychosom. Res.;* 39(1):1-9.

Davidson H.C., Lutman M.E. (2007). Survey of mobile phone use and their chronic effects on the hearing of a student population. *Int J Audiol.;* 46(3):113-8.

Davis R.L., Mostofi F.K. (1993). Cluster of testicular cancer in police officers exposed to hand-held radar. *Am J Ind Med.;* 24(2):231-3.

Dawe A.S., Nylund R., Leszczynski D. *et al.* (2008). Continuous wave and simulated GSM exposure at 1.8 W/kg and 1.8 GHz do not induce hsp16-1 heat-shock gene expression in Caenorhabditis elegans. *Bioelectromagnetics;* 29(2):92-9.

Dawe A.S., Smith B., Thomas D.W. *et al.* (2006). A small temperature rise may contribute towards the apparent induction by microwaves of heat-shock gene expression in the nematode Caenorhabditis Elegans. *Bioelectromagnetics;* 27(2):88-97.

Degrave E., Meeusen B., Grivegnée A.R. *et al.* (2009). Causes of death among Belgian professional military radar operators: a 37-year retrospective cohort study. *Int J Cancer*.; 124(4):945-51.

De Marchi B. (2009). Electromagnetic Fields (Mobile phones). In: *Final Report of the Risk Bridge project. (Project no. SAS6-CT-2006-036661-RISKBRIDGE)*. TNO Built Environment and Geosciences. pp. 73-104.

de Pomerai D.I., Smith B., Dawe A. *et al.* (2003). Microwave radiation can alter protein conformation without bulk heating. *FEBS Lett.;* 543(1-3):93-7.

de Pomerai D., Daniells C., David H. *et al.* (2000). Non-thermal heat-shock response to microwaves. *Nature*.; 405(6785):417-8. Retraction in: Nature. 2006 Mar 23;440(7083):437.

de Salles A.A., Bulla G., Rodriguez C.E. (2006). Electromagnetic absorption in the head of adults and children due to mobile phone operation close to the head. *Electromagn. Biol Med;* 25(4):349-60.

de Sauvage R.C., Lagroye I., Billaudel B. *et al.* (2008). Evaluation of the potential genotoxic effects of rTMS on the rat brain and current density mapping. *Clin Neurophysiol.;* 119(2):482-91.

De Souza A., Garci D., Sueiro L. *et al.* (2006). Pre-sowing magnetic treatments of tomato seeds increase the growth and yield of plants. *Bioelectromagnetics;* 27(4):247-57.

de P.D., Daniells C., David H. *et al.* (2000). Non-thermal heat-shock response to microwaves. *Nature;* 405(6785):417-8.

Deepinder F., Makker K., Agarwal A. (2007). Cell phones and male infertility: dissecting the relationship. *Reprod Biomed Online;* 15(3):266-70.

Del Seppia C., Ghione S., Luschi P. *et al.* (2007). Pain perception and electromagnetic fields. *Neurosci Biobehav Rev.;* 31(4):619-42.

Demers P.A., Thomas D.B., Rosenblatt K.A. *et al.* (1991). Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men. *Am J Epidemiol.;* 134(4):340-7.

Denollet J., De Vries J. (2006). Positive and negative affect within the realm of depression, stress and fatigue: the two-factor distress model of the Global Mood Scale (GMS). *J Affect Disord.;* 91(2-3):171-80.

Derat B., Bolomey J.-C. (2006). Various Optimization Problems of Electromagnetic Power Absorption in Homogeneous and Heterogeneous Phantoms. *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on;* 48(4):641-7.

Diem E., Schwarz C., Adlkofer F. *et al.* (2005). Non-thermal DNA breakage by mobile-phone radiation (1800 MHz) in human fibroblasts and in transformed GFSH-R17 rat granulosa cells in vitro. *Mutat Res.;* 583(2):178-83.

Dimberg Y. (1995). Neurochemical effects of a 20 kHz magnetic field on the central nervous system in prenatally exposed mice. *Bioelectromagnetics;* 16(4):263-367.

Dimbylow P.J., Mann S.M. (1994). SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile communication transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz. *Phys. Med Biol;* 39(10):1537-53

Dimbylow P., Bolch W. (2007). Whole-body-averaged SAR from 50 MHz to 4 GHz in the University of Florida child voxel phantoms. *Phys. Med Biol.;* 52(22):6639-49.

Divan H.A., Kheifets L., Obel C. *et al.* (2008). Prenatal and postnatal exposure to cell phone use and behavioral problems in children. *Epidemiology;* 19(4):523-9

Djeridane Y., Touitou Y., de Seze R. (2008). Influence of electromagnetic fields emitted by GSM-900 cellular telephones on the circadian patterns of gonadal, adrenal and pituitary hormones in men. *Radiat Res.;* 169(3):337-43.

Dobson J.E. (2009). Big Brother has evolved. *Nature;* 458(7241):968.

Dodier N. (2003). Leçons politiques de l'épidémie de sida. Paris: Editions de l'EHESS. 360 p.

Dolk H., Elliott P., Shaddick G. *et al.* (1997). Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain. II. All high power transmitters. *Am J Epidemiol*.; 145(1):10-7.

Dolk H., Shaddick G., Walls P. *et al.* (1997). Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain. I. Sutton Coldfield transmitter. *Am J Epidemiol*.; 145(1):1-9.

Dondelinger R.M. (2008). Diathermy units. *Biomed Instrum Technol.;* 42(4):286-90.

Doran T.J., Lu P.J., Vanier G.S. *et al.* (2009). Microwave irradiation enhances gene and oligonucleotide delivery and induces effective exon skipping in myoblasts. *Gene Ther.;* 16(1):119-26.

Dorev B., Israel M.S., Todorova L.C. (1982). Radiofrequency electromagnetic fields as a risk factor in different professional groups in Bulgaria. *J Occcup Accid.*; 4:187.

dos Santos I. (1999). Epidémiologie du cancer: principes et méthodes. Lyon: IARC. 467 p.

Dovrat A., Berenson R., Bormusov E. *et al.* (2005). Localized effects of microwave radiation on the intact eye lens in culture conditions. *Bioelectromagnetics;* 26(5):398-405.

Dressel J., Atchley P. (2008) Cellular phone use while driving: A methodological checklist for investigating dual-task costs. *Transportation Research;* Part F 11: 347–361

Dupont G. (5 A.D.). Controverse sur les risques sanitaires du téléphone mobile. *Le Monde*; 15 octobre 2005.

Dürrenberger G., Klaus G. (2004). EMF von Energiesparlampen: Feldmessungen und Expositionsabschätzungen mit Vergleich zu anderen Quellen im Alltag. Bern: BFE, Programm Elektrizität. 30 p. (DIS-Vertrags Nr. 151050).

Ebell M.H., Siwek J., Weiss B.D. *et al.* (2004). Strength of recommendation taxonomy (SORT): a patient-centered approach to grading evidence in the medical literature. *Am Fam. Physician;* 69(3):548-56.

Eberhardt J.L., Persson B.R., Brun A.E. *et al.* (2008). Blood-brain barrier permeability and nerve cell damage in rat brain 14 and 28 days after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Electromagn Biol Med.;* 27(3):215-29.

Ebert S., Eom S.J., Schuderer J. *et al.* (2005). Response, thermal regulatory threshold and thermal breakdown threshold of restrained RF-exposed mice at 905 MHz. *Phys Med Biol.;* 50(21):5203-15.

Edwards C.G., Schwartzbaum J.A., Lonn S. *et al.* (2006). Exposure to loud noise and risk of acoustic neuroma. *Am J Epidemiol.;* 163(4):327-33.

Eger H., Hagen K.U., Lucas B. *et al.* (2004). The Influence of Being Physically Near to a Cell Phone Transmission Mast on the Incidence of Cancer. *Umwelt Med Ges*.; 17:1-7 p.

Eivazi B., Sapundhziev N., Folz B.J. *et al.* (2005). Bipolar radiofrequency induced thermotherapeutic volumetric reduction of VX2 metastases in an animal model. *In Vivo;* 19(6):1023-8.

Eklof M., Hagberg M. (2006). Are simple feedback interventions involving workplace data associated with better working environment and health? A cluster randomized controlled study among Swedish VDU workers. *Appl Ergon.*; 37(2):201-10.

Elhag M.A., Nabil G.M., Attia A.M. (2007). Effects of electromagnetic field produced by mobile phones on the oxidant and antioxidant status of rats. *Pak J Biol Sci.;* 10(23):4271-4.

Eliyahu I., Luria R., Hareuveny R. *et al.* (2006). Effects of radiofrequency radiation emitted by cellular telephones on the cognitive functions of humans. *Bioelectromagnetics;* 27(2):119-26.

Eltiti S., Wallace D., Ridgewell A. *et al.* (2007). Does short-term exposure to mobile phone base station signals increase symptoms in individuals who report sensitivity to electromagnetic fields? A double-blind randomized provocation study. *Environ Health Perspect;* 115(11):1603-8.

Eltiti S., Wallace D., Zougkou K. *et al.* (2007b). Development and evaluation of the electromagnetic hypersensitivity questionnaire. *Bioelectromagnetics;* 28(2):137-51.

Engholm G., Ferlay J., Chrisrensen N. *et al.* (2009). NORDCAN: Cancer Incidence, Mortality and Prevalence in the Nordic Countries, Version 3.4. Association of Nordic Cancer Registries. Danish Cancer Society.

Eraso R.M., Bradford N.J., Fontenot C.N. *et al.* (2007). Fibromyalgia syndrome in young children: onset at age 10 years and younger. *Clin Exp Rheumatol.* 25(4):639-44.

Eriksson U.K., Gatz M., Dickman P.W. *et al.* (2008). Asthma, eczema, rhinitis and the risk for dementia. *Dement Geriatr Cogn Disord.* 25(2):148-56.

Erogul O., Oztas E., Yildirim I. *et al.* (2006). Effects of electromagnetic radiation from a cellular phone on human sperm motility: an in vitro study. *Arch Med Res.;* 37(7):840-3.

Erren T.C. (2005). Re: "Occupational magnetic fields and female breast cancer: a case-control study using Swedish population registers and new exposure data". *Am J Epidemiol.* 162(4):392-3.

Eshet Y., Mann R.R., Anaton A. *et al.* (2006). Microwave drilling of bones. *IEEE Trans Biomed Eng.* 53(6):1174-82.

Esprit S., Kothari P., Dhillon R. (2006). Injury from lightning strike while using mobile phone. *BMJ;* 332(7556):1513.

Expert Group on the Health Effects of Electromagnetic Fields (the). (2007). Report of the Expert Group on the Health Effects of Electromagnetic Fields. Dublin: Departement of communications, marine and natural resources. 57 p.

Falzone N., Huyser C., Fourie F. *et al.* (2008). In vitro effect of pulsed 900 MHz GSM radiation on mitochondrial membrane potential and motility of human spermatozoa. *Bioelectromagnetics;* 29(4):268-76.

Favier A. (2003). Le stress oxydant. Intérêt conceptuel et expérimental dans la compréhension des mécanismes des maladies et potentiel thérapeutique. *Actualité Chimique;* 269-270):108-15.

Fedrowitz M., Loscher W. (2005). Power frequency magnetic fields increase cell proliferation in the mammary gland of female Fischer 344 rats but not various other rat strains or substrains. *Oncology;* 69(6):486-98.

Ferreira A.R., Bonatto F., de Bittencourt Pasquali M.A. *et al.* (2006a). Oxidative stress effects on the central nervous system of rats after acute exposure to ultra high frequency electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics;* 27(6):487-93.

Ferreira A.R., Knakievicz T., Pasquali M.A. *et al.* (2006b). Ultra high frequency-electromagnetic field irradiation during pregnancy leads to an increase in erythrocytes micronuclei incidence in rat offspring. *Life Sci.* 80(1):43-50.

Ferreri F., Curcio G., Pasqualetti P. *et al.* (2006). Mobile phone emissions and human brain excitability. *Ann Neurol.* 60(2):188-96.

Festinger L. (1957). A theory of cognitive dissonance. Stanford, CA: Stanford University Press. 239 p.

Feychting M. (2005). Non-cancer EMF effects related to children. *Bioelectromagnetics;* Suppl 7:69-74

Feychting M., Ahlbom A., Kheifets L. (2005). EMF and health. *Annu Rev Public Health;* 26:165-89.

Feychting M., Forssen U. (2006). Electromagnetic fields and female breast cancer. *Cancer Causes Control;* 17(4):553-8.

Figa-Talamanca I. (2006). Occupational risk factors and reproductive health of women. *Occup Med. (Lond);* 56(8):521-31.

Fini M., Giavaresi G., Carpi A. *et al.* (2005). Effects of pulsed electromagnetic fields on articular hyaline cartilage: review of experimental and clinical studies. *Biomed Pharmacother.;* 59(7):388-94.

Finnie J.W., Blumbergs P.C., Manavis J. *et al.* (2002). Effect of long-term mobile communication microwave exposure on vascular permeability in mouse brain. *Pathology*; 34(4):344-7.

Finnie J.W. (2005). Expression of the immediate early gene, c-fos, in mouse brain after acute global system for mobile communication microwave exposure. *Pathology (Phila).;* 37(3):231-3.

Finnie J.W., Blumbergs P.C., Cai Z. *et al.* (2006). Neonatal mouse brain exposure to mobile telephony and effect on blood-brain barrier permeability. *Pathology (Phila).;* 38(3):262-3.

Fitzsimmons R.J., Gordon S.L., Kronberg J. *et al.* (2008). A pulsing electric field (PEF) increases human chondrocyte proliferation through a transduction pathway involving nitric oxide signaling. *J Orthop Res.;* 26(6):854-9.

Floderus B., Stenlund C., Carlgren F. (2002). Occupational exposures to high frequency electromagnetic fields in the intermediate range (>300 Hz-10 MHz). *Bioelectromagnetics*.; 23(8):568-77.

Forgacs Z., Kubinyi G., Sinay G. *et al.* (2005). [Effects of 1800 MHz GSM-like exposure on the gonadal function and hematological parameters of male mice]. *Magy Onkol.;* 49(2):149-51.

Forgacs Z., Somosy Z., Kubinyi G. *et al.* (2006). Effect of whole-body 1800MHz GSM-like microwave exposure on testicular steroidogenesis and histology in mice. *Reprod Toxicol.;* 22(1):111-7.

Foster K.R., Glaser R. (2007). Thermal mechanisms of interaction of radiofrequency energy with biological systems with relevance to exposure guidelines. *Health Phys.;* 92(6):609-20.

Fox E. (2004). Electrosensitivity symptoms associated with electromagnetic field exposure. Conference Presentation WHO International Workshop on Electrical Hypersensitivity, October 25-27, 2004, Prague, Czech Republic.

Franke H., Ringelstein E.B., Stogbauer F. (2005a). Electromagnetic fields (GSM 1800) do not alter blood-brain barrier permeability to sucrose in models in vitro with high barrier tightness. *Bioelectromagnetics;* 26(7):529-35.

Franke H., Streckert J., Bitz A. *et al.* (2005). Effects of universal mobile telecommunications system (UMTS) electromagnetic fields on the blood-brain barrier in vitro. *Radiat Res.;* 164(3).

Franzellitti S., Valbonesi P., Contin A. *et al.* (2008). HSP70 expression in human trophoblast cells exposed to different 1.8 Ghz mobile phone signals. *Radiat Res.;* 170(4):488-97.

Frei P., Mohler E., Neubauer G. *et al.* (2009a). Temporal and spatial variability of personal exposure to radio frequency electromagnetic fields. *Environ Res.;* 109(6):779-85.

French P.W., Penny R., Laurence J.A. *et al.* (2001). Mobile phones, heat shock proteins and cancer. *Differentiation;* 67(4-5):93-7.

Frey A.H. (1998). Headaches from cellular telephones: are they real and what are the implications? *Environ Health Perspect.;* 106(3):101-3.

Frick U., Kharraz A., Hauser S. *et al.* (2005). Comparison perception of singular transcranial magnetic stimuli by subjectively electrosensitive subjects and general population controls. *Bioelectromagnetics;* 26(4):287-98.

Friedman J., Kraus S., Hauptman Y. *et al.* (2007). Mechanism of short-term ERK activation by electromagnetic fields at mobile phone frequencies. *Biochem J.;* 405(3):559-68.

Fritzer G., Goder R., Friege L. *et al.* (2007). Effects of short- and long-term pulsed radiofrequency electromagnetic fields on night sleep and cognitive functions in healthy subjects. *Bioelectromagnetics;* 28(4):316-25.

Frolen H., Svedenstal B.M., Paulsson L.E. (1993). Effects of pulsed magnetic fields on the developing mouse embryo. *Bioelectromagnetics*.;14(3):197-204. Erratum in: *Bioelectromagnetics* 1993;14(4):393.

Fuentes M.A., Trakic A., Wilson S.J. *et al.* (2008). Analysis and measurements of magnetic field exposures for healthcare workers in selected MR environments. *IEEE Trans Biomed Eng*.; 55(4):1355-64.

Fujita A., Hirota I., Kawahara Y. *et al.* (2007). Development and evaluation of intermediate frequency magnetic field exposure system for studies of in vitro biological effects. *Bioelectromagnetics*.; 28(7):538-45.

Funk R.H., Monsees T., Ozkucur N. (2009). Electromagnetic effects - From cell biology to medicine. *Prog Histochem Cytochem.;* 43(4):177-264.

Funk R.H., Monsees T.K. (2006). Effects of electromagnetic fields on cells: physiological and therapeutical approaches and molecular mechanisms of interaction. A review. *Cells Tissues Organs;* 182(2):59-78.

Furubayashi T., Ushiyama A., Terao Y. *et al.* (2009). Effects of short-term W-CDMA mobile phone base station exposure on women with or without mobile phone related symptoms. *Bioelectromagnetics;* 30(2):100-13.

Gaglio G. (2008). La dynamique des normes de consommation : le cas de l'avènement de la téléphonie mobile en France. *Revue Française de Socio-économie*; 2, (2): 181-198.

Gaber M.H., Abd El Halim N., Khalil W.A. (2005). Effect of microwave radiation on the biophysical properties of liposomes. *Bioelectromagnetics;* 26(3):194-200.

Gabriel C., Peyman A. (2006a). Dielectric measurement: error analysis and assessment of uncertainty. *Phys Med Biol.;* 51(23):6033-46.

Gallagher R.P., Elwood J.M., Rootman J. *et al.* (1985). Risk factors for ocular melanoma: Western Canada Melanoma Study. *J Natl Cancer Inst.;* 74(4):775-8.

Galloni P., Lopresto V., Parazzini M. *et al.* (2009). No effects of UMTS exposure on the function of rat outer hair cells. *Bioelectromagnetics;* 30(5):385-92.

Galloni P., Lovisolo G.A., Mancini S. *et al.* (2005a). Effects of 900 MHz electromagnetic fields exposure on cochlear cells' functionality in rats: evaluation of distortion product otoacoustic emissions. *Bioelectromagnetics;* 26(7):536-47.

Galloni P., Parazzini M., Piscitelli M. *et al.* (2005b). Electromagnetic fields from mobile phones do not affect the inner auditory system of Sprague-Dawley rats. *Radiat Res.;* 164(6):798-804.

Gandhi G., Gandhi A. (2005). Genetic damage in mobile phone users: some preliminary findings. *Indian J Human Genet.;* 11(2):99-104.

Gangi S., Johansson O. (2000a). A theoretical model based upon mast cells and histamine to explain the recently proclaimed sensitivity to electric and/or magnetic fields in humans. *Med Hypotheses;* 54(4):663-71.

Gannon C.J., Cherukuri P., Yakobson B.I. *et al.* (2007). Carbon nanotube-enhanced thermal destruction of cancer cells in a noninvasive radiofrequency field. *Cancer;* 110(12):2654-65.

Garcia Callejo F.J., Garcia Callejo F., Pena Santamaria J. *et al.* (2005). [Hearing level and intensive use of mobile phones]. *Acta Otorrinolaringol Esp.;* 56(5):187-91.

Garland F.C., Shaw E., Gorham E.D. *et al.* (1990). Incidence of leukemia in occupations with potential electromagnetic field exposure in United States Navy personnel. *Am J Epidemiol.;* 132(2):293-303.

Genuis S.J. (2008). Fielding a current idea: exploring the public health impact of electromagnetic radiation. *Public Health;* 122(2):113-24.

George D.F., Bilek M.M., McKenzie D.R. (2008). Non-thermal effects in the microwave induced unfolding of proteins observed by chaperone binding. *Bioelectromagnetics;* 29(4):324-30.

Gerald G. (2005). L'évolution de l'usage du téléphone mobile en public : de « l'inattention polie » à l'émergence d'un comportement moyen. In: *"C'est ma ville!"*. Paris:L'Harmattan.

Ghabili K., Shoja M.M., Agutter P.S. (2008). Piezoelectricity and prostate cancer: proposed interaction between electromagnetic field and prostatic crystalloids. *Cell Biol Int.;* 32(6):688-91.

Ghibelli L., Cerella C., Cordisco S. *et al.* (2006). NMR exposure sensitizes tumor cells to apoptosis. *Apoptosis;* 11(3):359-65.

Giladi M., Porat Y., Blatt A. *et al.* (2008). Microbial growth inhibition by alternating electric fields. Antimicrob Agents *Chemother*.; 52(10):3517-22.

Glushkova O.V., Novoselova E.G., Cherenkov D.A. *et al.* (2007). [Effects of centimeter waves on the immune system of mice in endotoxic shock]. *Biofizika;* 52(5):938-46.

Goater A.D., Pethig R. (1998). Electrorotation and dielectrophoresis. *Parasitology*.;117 Suppl:S177-89.

Goethe J.W., Fischer E.H. (1995). Functional impairment in depressed inpatients. *J Affect Disord.* ;33(1):23-9.

Goldberg M. (1990). L'épidémiologie sans peine. Paris: Frison-Roche. 194 p.

Goldstein B.D. (2007). Problems in applying the precautionary principle to public health. *Occup Environ Med.;* 64(9):571-4.

Gorlitz B.D., Muller M., Ebert S. *et al.* (2005). Effects of 1-week and 6-week exposure to GSM/DCS radiofrequency radiation on micronucleus formation in B6C3F1 mice. *Radiat Res.;* 164(4 Pt 1):431-9.

Gottwald E., Sontag W., Lahni B. *et al.* (2007). Expression of HSP72 after ELF-EMF exposure in three cell lines. *Bioelectromagnetics;* 28(7):509-18.

Goswami P.C., Albee L.D., Parsian A.J. *et al.* (1999). Proto-oncogene mRNA levels and activities of multiple transcription factors in C3H 10T 1/2 murine embryonic fibroblasts exposed to 835.62 and 847.74 MHz cellular phone communication frequency radiation. *Radiat Res.*; 151(3):300-9.

Grafstrom G., Nittby H., Brun A. *et al.* (2008). Histopathological examinations of rat brains after long-term exposure to GSM-900 mobile phone radiation. *Brain Res Bull.* [Sous presse].

Grajewski B., Cox C., Schrader S.M. *et al.* (2000). Semen quality and hormone levels among radiofrequency heater operators. *J Occup Environ Med.*; 42(10):993-1005.

Grancelli H.O., Ferrante D.C. (2007). Telephone interventions for disease management in heart failure. *BMJ;* 334(7600):910-1.

Grayson J.K., Lyons T.J. (1996). Brain cancer, flying, and socioeconomic status: a nested case-control study of USAF aircrew. *Aviat Space Environ Med.;* 67(12):1152-4.

Greenland S., Longnecker M.P. (1992). Methods for trend estimation from summarized dose-response data, with applications to meta-analysis. *Am J Epidemiol.;* 135(11):1301-9.

Gregory R., Flynn J., Slovic P. (1995). Technological Stigma. *Amercian Scientist;* 83(3):220-3.

Grigor'ev Iu G. (2000). [Delayed biological effect of electromagnetic fields action]. *Radiats Biol Radioecol.;* 40(2):217-25.

Grigor'ev Iu G. (2005). [The electromagnetic fields of cellular phones and the health of children and of teenagers (the situation requiring to take an urgent measure)]. *Radiats Biol Radioecol;* 45(4):442-50.

Groves F.D., Page W.F., Gridley G. *et al.* (2002). Cancer in Korean war navy technicians: mortality survey after 40 years. *Am J Epidemiol.*; 155(9):810-8.

Gurisik E., Warton K., Martin D.K. *et al.* (2006a). An in vitro study of the effects of exposure to a GSM signal in two human cell lines: monocytic U937 and neuroblastoma SK-N-SH. *Cell Biol Int.;* 30(10):793-9.

Ha M., Im H., Lee M. *et al.* (2007). Radio-frequency radiation exposure from AM radio transmitters and childhood leukemia and brain cancer. *Am J Epidemiol.*; 166(3):270-9.

Haarala C., Bergman M., Laine M. *et al.* (2005). Electromagnetic field emitted by 902 MHz mobile phones shows no effects on children's cognitive function. *Bioelectromagnetics;* Suppl 7:144-50.

Haarala C., Takio F., Rintee T. *et al.* (2007). Pulsed and continuous wave mobile phone exposure over left versus right hemisphere: effects on human cognitive function. *Bioelectromagnetics;* 28(4):289-95.

Hadjem A., Lautru D., Dale C. *et al.* (2005a). Study of specific absorption rate (SAR) induced in two child head models and in adult heads using mobile phones. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on;* 53(1):4-11.

Haga A., Kumagai Y., Mitsuki H. *et al.* (2005). Evaluation of damage in DNA molécules by VLF fields using bacterial cells. *IEICE trans Comm*.; E88:3249-3255.

Hall E.H., Schoenbach K.H., Beebe S.J. (2007). Nanosecond pulsed electric fields induce apoptosis in p53-wildtype and p53-null HCT116 colon carcinoma cells. *Apoptosis;* 12(9):1721-31.

Hallberg O., Oberfeld G. (2006). Letter to the editor: will we all become electrosensitive? *Electromagn. Biol Med.;* 25(3):189-91.

Hamann W., Abou-Sherif S., Thompson S. *et al.* (2006). Pulsed radiofrequency applied to dorsal root ganglia causes a selective increase in ATF3 in small neurons. *Eur J Pain;* 10(2):171-6.

Hamblin D.L., Anderson V., McIntosh R.L. *et al.* (2007a). EEG electrode caps can reduce SAR induced in the head by GSM900 mobile phones. *IEEE Trans Biomed. Eng;* 54(5):914-20.

Hamblin D.L., Croft R.J., Wood A.W. *et al.* (2006). The sensitivity of human event-related potentials and reaction time to mobile phone emitted electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics;* 27(4):265-73.

Hansson Mild K., Carlberg M., Wilen J. *et al.* (2005). How to combine the use of different mobile and cordless telephones in epidemiological studies on brain tumours? *Eur J Cancer Prev.;* 14(3):285-8.

Harakawa S., Nedachi T., Hori T. *et al.* (2008). Effect of electric field in conditioned aversion response. *J Vet Med Sci.;* 70(6):611-3.

Hardell L., Carlberg M. (2009). Mobile phones, cordless phones and the risk for brain tumours. *Int J Oncol.;* 35(1):5-17.

Hardell L., Carlberg M., Hansson Mild K. (2005a). Case-control study on cellular and cordless telephones and the risk for acoustic neuroma or meningioma in patients diagnosed 2000-2003. *Neuroepidemiology;* 25(3):120-8.

Hardell L., Carlberg M., Hansson Mild K. (2005b). Use of cellular telephones and brain tumour risk in urban and rural areas. *Occup Environ Med.;* 62(6):390-4

Hardell L., Carlberg M., Hansson Mild K. (2006a). Pooled analysis of two case-control studies on the use of cellular and cordless telephones and the risk of benign brain tumours diagnosed during 1997-2003. *Int J Oncol.;* 28(2):509-18.

Hardell L., Carlberg M., Hansson Mild K. (2009b). Epidemiological evidence for an association between use of wireless phones and tumor diseases. *Pathophysiology;* 16(2-3):113-22.

Hardell L., Carlberg M., Hansson M.K. (2006b). Pooled analysis of two case-control studies on use of cellular and cordless telephones and the risk for malignant brain tumours diagnosed in 1997-2003. *Int Arch Occup Environ Health;* 79(8):630-9.

Hardell L., Carlberg M., Mild K.H. (2006c). Case-control study of the association between the use of cellular and cordless telephones and malignant brain tumors diagnosed during 2000-2003. *Environ Res.;* 100(2):232-41.

Hardell L., Carlberg M., Ohlson C.G. *et al.* (2007a). Use of cellular and cordless telephones and risk of testicular cancer. *Int J Androl.;* 30(2):115-22.

Hardell L., Carlberg M., Soderqvist F. *et al.* (2008a). Meta-analysis of long-term mobile phone use and the association with brain tumours. *Int J Oncol.;* 32(5):1097-103.

Hardell L., Carlberg M., Soderqvist F. *et al.* (2008b). Increased concentrations of certain persistent organic pollutants in subjects with self-reported electromagnetic hypersensitivity--a pilot study. *Electromagn Biol Med;* 27(2):197-203.

Hardell L., Carlberg M., Soderqvist F. *et al.* (2007b). Long-term use of cellular phones and brain tumours: increased risk associated with use for > or =10 years. *Occup Environ Med.;* 64(9):626-32.

Hardell L., Eriksson M., Carlberg M. *et al.* (2005c). Use of cellular or cordless telephones and the risk for non-Hodgkin's lymphoma. *Int Arch Occup Environ Health;* 78(8):625-32.

Hardell L., Hansson Mild K. (2006c). Mobile phone use and risk of acoustic neuroma: results of the interphone case-control study in five North European countries. *Br J Cancer;* 94(9):1348-9.

Hardell L., Mild K.H. (2005d). Mobile phone use and acoustic neuromas. *Epidemiology;* 16(3):415; author reply 417-8.

Hardell L., Mild K.H., Carlberg M. (2003). Further aspects on cellular and cordless telephones and brain tumours. *Int J Oncol.*; 22(2):399-407.

Hardell L., Mild K.H., Carlberg M. *et al.* (2006d). Tumour risk associated with use of cellular telephones or cordless desktop telephones. *World J Surg Oncol;* 4:74.

Hardell L., Mild K.H., Kundi M. (2005e). Re: "Long-term mobile phone use and brain tumor risk". *Am J Epidemiol.;* 162(6):600-1.

Hardell L., Sage C. (2008c). Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards. *Biomed Pharmacother.;* 62(2):104-9.

Harris R.P., Helfand M., Woolf S.H. *et al.* (2001). Current methods of the US Preventive Services Task Force: a review of the process. *Am J Prev. Med.;* 20(3 Suppl):21-35.

Hartikka H., Heinavaara S., Mantyla R. *et al.* (2009). Mobile phone use and location of glioma: a case-case analysis. *Bioelectromagnetics;* 30(3):176-82.

Hata K., Yamaguchi H., Tsurita G. *et al.* (2005). Short term exposure to 1439 MHz pulsed TDMA field does not alter melatonin synthesis in rats. *Bioelectromagnetics;* 26(1):49-53

Hatta H., Tsuneyama K., Kumada T. *et al.* (2006). Freshly prepared immune complexes with intermittent microwave irradiation result in rapid and high-quality immunostaining. *Pathol Res Pract.* 202(6):439-45.

Haveman J., Sminia P., Wondergem J. *et al.* (2005). Effects of hyperthermia on the central nervous system: what was learnt from animal studies? *Int J Hyperthermia;* 21(5):473-87.

Hayes R.B., Brown L.M., Pottern L.M. *et al.* (1990). Occupation and risk for testicular cancer: a case-control study. *Int J Epidemiol;* 19(4):825-31.

Hazout A., Menezo Y., Madelenat P. *et al.* (2008). [Causes and clinical implications of sperm DNA damages]. *Gynecol Obstet Fertil.* 36(11):1109-17.

Health Council of the Netherlands. (2005). Electromagnetic fields: Annual Update 2005. The Hague: Health Council of the Netherlands. 136 p. (Publication no. 2005/14).

Health Council of the Netherlands. (2007). Electromagnetic fields: Annual Update 2006. The Hague: Health Council of the Netherlands. (publication no. 2007/06).

Heikkinen P., Ernst H., Huuskonen H. *et al.* (2006). No effects of radiofrequency radiation on 3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(5H)-furanone-induced tumorigenesis in female Wistar rats. *Radiat Res.;* 166(2):397-408.

Heinrich S., Ossig A., Schlittmeier S. *et al.* (2007). [Electromagnetic fields of a UMTS mobile phone base station and possible effects on health - results from an experimental field study]. *Umweltmed Forsch Prax*; 12(3):171-180.

Heitmann C., Greiser E., Doren M. (2005). The impact of the Women's Health Initiative Randomized Controlled Trial 2002 on perceived risk communication and use of postmenopausal hormone therapy in Germany. *Menopause;* 12(4):405-11.

Helfer J.L., Gray R.W., MacDonald S.G. *et al.* (2006). Bibens TW. Can pacemakers, neurostimulators, leads, or guide wires be MRI safe? Technological concerns and possible resolutions. *Minim Invasive Ther Allied Technol*.; 15(2):114-20.

Henson S., Annou M., Cranfield J. *et al.* (2008). Understanding consumer attitudes toward food technologies in Canada. *Risk Anal.;* 28(6):1601-17.

Hepworth S.J., Schoemaker M.J., Muir K.R. *et al.* (2006). Mobile phone use and risk of glioma in adults: case-control study. *BMJ;* 332(7546):883-7.

Higashikubo R., Ragouzis M., Moros E.G. *et al.* (2001). Radiofrequency electromagnetic fields do not alter the cell cycle progression of C3H 10T and U87MG cells. *Radiat Res.;* 156(6):786-95.

Higgins J.P., Thompson S.G. (2002). Quantifying heterogeneity in a meta-analysis. *Stat Med.;* 21(11):1539-58.

Hill D.L., McLeish K., Keevil S.F. (2005). Impact of electromagnetic field exposure limits in Europe: is the future of interventional MRI safe? Acad Radiol.; 12(9):1135-42.

Hillert L. (1998). Hypersensitivity to electricity: management and intervention programs. In: Leitgeb N. *Proceedings of the International Workshop on Electromagnetic Fields and Non-Specific Health Symptoms. COST Project 244. Graz, Austria, September 19-20*.

Hillert L., Akerstedt T., Lowden A. *et al.* (2008). The effects of 884 MHz GSM wireless communication signals on headache and other symptoms: an experimental provocation study. *Bioelectromagnetics;* 29(3):185-96.

Hillert L., Berglind N., Arnetz B.B. *et al.* (2002). Prevalence of self-reported hypersensitivity to electric or magnetic fields in a population-based questionnaire survey. *Scand. J Work Environ Health;* 28(1):33-41.

Hillert L., Kolmodin-Hedman B. (1997). Hypersensitivity to electricity: sense or sensibility? *J Psychosom Res.*; 42(5):427-32.

Hillert L., Kolmodin-Hedman B., Eneroth P. *et al.* (2001). The effect of supplementary antioxidant therapy in patients who report hypersensitivity to electricity: a randomized controlled trial. *MedGenMed*.;3(2):11.

Hilliges M., Wang L., Johansson O. (1995). Ultrastructural evidence for nerve fibers within all vital layers of the human epidermis. *J Invest Dermatol.;* 104(1):134-7.

Hinrikus H., Bachmann M., Lass J. *et al.* (2008a). Effect of low frequency modulated microwave exposure on human EEG: individual sensitivity. *Bioelectromagnetics;* 29(7):527-38.

Hinrikus H., Bachmann M., Lass J. *et al.* (2008b). Effect of 7, 14 and 21 Hz modulated 450 MHz microwave radiation on human electroencephalographic rhythms. *Int J Radiat Biol.;* 84(1):69-79.

Hirata A., Kodera S., Wang J. *et al.* (2007). Dominant factors influencing whole-body average SAR due to far-field exposure in whole-body resonance frequency and GHz regions. *Bioelectromagnetics*.; 28(6):484-7.

Hirata A., Sugiyama H., Kojima M. *et al.* (2008a). Computational model for calculating body-core temperature elevation in rabbits due to whole-body exposure at 2.45 GHz. *Phys. Med Biol.;* 53(12):3391-404.

Hirata A., Watanabe S., Kojima M. *et al.* (2006). Computational verification of anesthesia effect on temperature variations in rabbit eyes exposed to 2.45 GHz microwave energy. *Bioelectromagnetics;* 27(8):602-12.

Hirata A., Watanabe S., Taki M. *et al.* (2008b). Computation of temperature elevation in rabbit eye irradiated by 2.45-GHz microwaves with different field configurations. *Health Phys.;* 94(2):134-44.

Hirose H., Sakuma N., Kaji N. *et al.* (2007). Mobile phone base station-emitted radiation does not induce phosphorylation of Hsp27. *Bioelectromagnetics;* 28(2):99-108.

Hirose H., Sakuma N., Kaji N. *et al.* (2006). Phosphorylation and gene expression of p53 are not affected in human cells exposed to 2.1425 GHz band CW or W-CDMA modulated radiation allocated to mobile radio base stations. *Bioelectromagnetics;* 27(6):494-504.

Hirose H., Suhara T., Kaji N. *et al.* (2008). Mobile phone base station radiation does not affect neoplastic transformation in BALB/3T3 cells. *Bioelectromagnetics;* 29(1):55-6.4

Hocking B. (2006). Mobile phone use and risk of acoustic neuroma. *Br J Cancer;* 94(9):1350; author reply 1352-3.

Hocking B. (2008). Occupational exposure to ionizing and non-ionizing radiation and risk of glioma. *Occup Med. (Lond);* 58(2):148-9.

Holly E.A., Aston D.A., Ahn D.K. *et al.* (1996). Intraocular melanoma linked to occupations and chemical exposures. *Epidemiology;* 7(1):55-61.

Hook G.J., Spitz D.R., Sim J.E. *et al.* (2004). Evaluation of parameters of oxidative stress after in vitro exposure to FMCW- and CDMA-modulated radiofrequency radiation fields. *Radiat Res.;* 162(5):497-504.

Hountala C.D., Maganioti A.E., Papageorgiou C.C. *et al.* (2008). The spectral power coherence of the EEG under different EMF conditions. *Neurosci Lett.;* 441(2):188-92.

Hours M., Bernard M., Arslan M. *et al.* (2009). Can loud noise cause acoustic neuroma? Analysis of the INTERPHONE study in France. *Occup Environ Med*.; 66(7):480-6.

Hours M., Bernard M., Montestrucq L. *et al.* (2007). [Cell Phones and Risk of brain and acoustic nerve tumours: the French INTERPHONE case-control study]. *Rev Epidemiol Sante Publique;* 55(5):321-32.

Hoyto A., Juutilainen J., Naarala J. (2007a). Ornithine decarboxylase activity is affected in primary astrocytes but not in secondary cell lines exposed to 872 MHz RF radiation. *Int J Radiat Biol.;* 83(6):367-74.

Hoyto A., Juutilainen J., Naarala J. (2007b). Ornithine decarboxylase activity of L929 cells after exposure to continuous wave or 50 Hz modulated radiofrequency radiation--a replication study. *Bioelectromagnetics;* 28(7):501-8.

Hoyto A., Luukkonen J., Juutilainen J. *et al.* (2008a). Proliferation, oxidative stress and cell death in cells exposed to 872 MHz radiofrequency radiation and oxidants. *Radiat Res.;* 170(2):235-43.

Hoyto A., Sihvonen A.P., Alhonen L. *et al.* (2006). Modest increase in temperature affects ODC activity in L929 cells: Low-level radiofrequency radiation does not. *Radiat Environ Biophys.;* 45(3):231-5.

Hoyto A., Sokura M., Juutilainen J. *et al.* 2008b). Radiofrequency radiation does not significantly affect ornithine decarboxylase activity, proliferation, or caspase-3 activity of fibroblasts in different physiological conditions. *Int J Radiat Biol.;* 84(9):727-33.

Hruby R., Neubauer G., Kuster N. *et al.* (2008). Study on potential effects of "902-MHz GSM-type Wireless Communication Signals" on DMBA-induced mammary tumours in Sprague-Dawley rats. *Mutat Res.;* 649(1-2):34-44.

Hsieh C.H., Lee M.C., Tsai-Wu J.J. *et al.* (2008). Deleterious effects of MRI on chondrocytes. *Osteoarthritis Cartilage;* 16(3):343-51.

Huang T.Q., Lee J.S., Kim T.H. *et al.* (2005). Effect of radiofrequency radiation exposure on mouse skin tumorigenesis initiated by 7,12-dimethybenz[alpha]anthracene. *Int J Radiat Biol.;* 81(12):861-7.

Huang T.Q., Lee M.S., Oh E. *et al.* (2008a). Molecular responses of Jurkat T-cells to 1763 MHz radiofrequency radiation. *Int J Radiat Biol.;* 84(9):734-41.

Huang T.Q., Lee M.S., Oh E.H. *et al.* (2008b). Characterization of biological effect of 1763 MHz radiofrequency exposure on auditory hair cells. *Int J Radiat Biol.;* 84(11):909-15.

Huber R., Treyer V., Schuderer J. *et al.* (2005). Exposure to pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields affects regional cerebral blood flow. *Eur J Neurosci.;* 21(4):1000-6.

Hug K., Roosli M., Rapp R. (2006). Magnetic field exposure and neurodegenerative diseases--recent epidemiological studies. *Soz Praventivmed.;* 51(4):210-20.

Hung C.S., Anderson C., Horne J.A. *et al.* (2007). Mobile phone 'talk-mode' signal delays EEG-determined sleep onset. *Neurosci Lett.;* 421(1):82-6.

Huss A., Egger M., Hug K. *et al.* (2007). Source of funding and results of studies of health effects of mobile phone use: systematic review of experimental studies. *Environ Health Perspect.;* 115(1):1-4.

Huss A., Roosli M. (2006). Consultations in primary care for symptoms attributed to electromagnetic fields--a survey among general practitioners. *BMC Public Health;* 6:267.

Hutter H.P., Moshammer H., Wallner P. *et al.* (2006). Subjective symptoms, sleeping problems, and cognitive performance in subjects living near mobile phone base stations. *Occup Environ Med.;* 63(5):307-13.

Huuskonen H., Juutilainen J., Julkunen A. *et al.* (1998). Effects of low-frequency magnetic fields on fetal development in CBA/Ca mice. *Bioelectromagnetics*; 19(8):477-485.

Hyland G.J. (2008). Physical basis of adverse and therapeutic effects of low intensity microwave radiation. *Indian J Exp Biol.;* 46(5):403-19.

Ibrahim T.S., Abraham D., Rennaker R.L. (2007). Electromagnetic power absorption and temperature changes due to brain machine interface operation. Ann Biomed Eng.; 35(5):825-34.

ICES. (2005). IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. IEEE Std C95.1 - 2005. New York: IEEE.

ICNIRP. (2009). [Livre bleu]. Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz). Review of the scientific evidence on dosimetry, biological effects, epidemiological observations, and health consequences concerning exposure to high frequency electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Oberschleissheim: ICNIRP. 358 p. (ICNIRP 16/2009).

Igarashi A., Matsuki H., Endo G. *et al.* (2005). Evaluation of damage in DNA molécules by VLF fields by using bacterial mutation mutation repairing genetic system. *IEEE Trans on Magnetics*; 41:4368-4370.

Ilhan A., Gurel A., Armutcu F. *et al.* (2004). Ginkgo biloba prevents mobile phone-induced oxidative stress in rat brain. *Clin Chim Acta;* 340(1-2):153-62.

Ilvonen S., Sihvonen A.P., Karkkainen K. *et al.* (2005). Numerical assessment of induced ELF currents in the human head due to the battery current of a digital mobile phone. *Bioelectromagnetics;* 26(8):648-56.

Infas. (2006). Ermittlung der Befürchtungen und Ängste der breiten Öffentlichkeit hinsichtlich möglicher Gefahren der hochfrequenten elektromagnetischen Felder des Mobilfunks: Abschlussbericht über die Befragung im Jahr 2006. Bonn: Institut für Angewandte Sozialwissenschaft GmbH. 63 p.

Inomata-Terada S., Okabe S., Arai N. *et al.* (2007). Effects of high frequency electromagnetic field (EMF) emitted by mobile phones on the human motor cortex. *Bioelectromagnetics;* 28(7):553-61.

Inskip P.D., Tarone R.E., Hatch E.E. *et al.* (2001). Cellular-telephone use and brain tumors. *N Engl. J Med.;* 344(2):79-86.

Insuasty B., Orozco F., Quiroga J. *et al.* (2008). Microwave induced synthesis of novel 8,9-dihydro-7H-pyrimido[4,5-b][1,4]diazepines as potential antitumor agents. *Eur J Med Chem.;* 43(9):1955-62.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2002). General approach to protection against non-ionizing radiation. *Health Phys.;* 82(4):540-8.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2009). Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys.;* 96(4):504-14.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2009). Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz) - Review of the Scientific Evidence and Health Consequences. Munich: ICNIRP. 358 p. (ICNIRP 16/2009).

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2009). Icnirp Statement on the “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 Ghz)”.

Irlenbusch L., Bartsch B., Cooper J. *et al.* (2007). Influence of a 902.4 MHz GSM signal on the human visual system: investigation of the discrimination threshold. *Bioelectromagnetics;* 28(8):648-54.

Irvine N. (2005). Definition, Epidemiology and Management of Electrical Sensitivity. Chilton: Health Protection Agency, Radiation Protection Division. (HPA-RPD-010).

Israel M., Vangelova K., Ivanova M. (2007). Cardiovascular risk under electromagnetic exposure in physiotherapy. *Environmentalist*; 27:539–543.

Ito K., Kawai H. (2005). IWAT: Small Antennas and Novel Metamaterials. IEEE International Workshop on Antenna Technology.IWAT 2005.

Janssen T., Boege P., von Mikusch-Buchberg J. *et al.* (2005). Investigation of potential effects of cellular phones on human auditory function by means of distortion product otoacoustic emissions. *J Acoust Soc Am.;* 117(3 Pt 1):1241-7.

Jasanoff S. (2005). Designs on Nature: Science and Democracy in Europe and the United States. Princeton, N.J.: Princeton University Press. 374 p.

Jauchem J.R. (2006). The role of autacoids and the autonomic nervous system in cardiovascular responses to radio-frequency energy heating. *Auton Autacoid Pharmacol;* 26(2):121-40

Jauchem J.R. (2008). Effects of low-level radio-frequency (3kHz to 300GHz) energy on human cardiovascular, reproductive, immune, and other systems: a review of the recent literature. *Int J Hyg Environ Health;* 211(1-2):1-29.

Jauchem J.R. (2003). A literature review of medical side effects from radio-frequency energy in the human environment: involving cancer, tumors, and problems of the central nervous system. *J Microw Power Electromagn Energy;* 38(2):103-23.

Jaureguiberry F. (2003). Les branchés du portable. Paris: P.U.F. 160 p.

Johansen C., Boice J., Jr., McLaughlin J. *et al.* (2001). Cellular telephones and cancer--a nationwide cohort study in Denmark. *J Natl. Cancer Inst.;* 93(3):203-7.

Johansson A., Forsgren S., Stenberg B. *et al.* (2008). No effect of mobile phone-like RF exposure on patients with atopic dermatitis. *Bioelectromagnetics;* 29(5):353-62.

Johansson O. (2006). Electrohypersensitivity: state-of-the-art of a functional impairment. *Electromagn. Biol Med.;* 25(4):245-58.

Johansson O. (2009). Disturbance of the immune system by electromagnetic fields-A potentially underlying cause for cellular damage and tissue repair reduction which could lead to disease and impairment. *Pathophysiology;* 16(2-3):157-77.

Johansson O., Gangi S., Liang Y. *et al.* (2001). Cutaneous mast cells are altered in normal healthy volunteers sitting in front of ordinary TVs/PCs--results from open-field provocation experiments. *J Cutan Pathol.;* 28(10):513-9.

Johansson O., Hilliges M., Bjornhagen V. *et al.* (1994). Skin changes in patients claiming to suffer from "screen dermatitis": a two-case open-field provocation study. *Exp. Dermatol.;* 3(5):234-8.

Johansson O., Hilliges M., Han S.W. (1996). A screening of skin changes, with special emphasis on neurochemical marker antibody evaluation, in patients claiming to suffer from "screen dermatitis" as compared to normal healthy controls. *Exp. Dermatol.;* 5(5):279-85.

Johansson O., Liu P.Y. (1995). "Electrosensitivity", "electrosupersensibility" and "screen dermatitis": preliminary observations from on-going studies. In: Simunic D. *Proceedings of the COST 244: Biomedical Effects of Electromagnetic Fields - Workshop on Electromagnetic Hypersensitivity. Brussels/Graz. EU/EC (DG XIII)*.

Johansson O., Wang L., Hilliges M. *et al.* (1999). Intraepidermal nerves in human skin: PGP 9.5 immunohistochemistry with special reference to the nerve density in skin from different body regions. *J Peripher. Nerv. Syst.;* 4(1):43-52.

Johnston S.A., Scherb H. (2005). Mobile phone use and acoustic neuromas. *Epidemiology;* 16(3):416-7.

Jokela K. (2007). Assessment of complex EMF exposure situations including inhomogeneous field distribution. *Health Phys*.; 92(6):531-40.

Joly P.-J. (2005). La sociologie de l'expertise scientifique: les recherches françaises au milieu du gué. *Risques, crises et incertitudes: pour une analyse critique. Cahiers du GIS Risques Collectifs et Situations de Crise*; (3):117-74.

Joseph W., Vermeeren G., Verloock L. *et al.* (2008). Characterization of personal RF electromagnetic field exposure and actual absorption for the general public. *Health Phys.;* 95(3):317-30.

Joubert V., Bourthoumieu S., Leveque P. *et al.* (2008). Apoptosis is induced by radiofrequency fields through the caspase-independent mitochondrial pathway in cortical neurons. *Radiat Res.;* 169(1):38-45.

Joubert V., Leveque P., Cueille M. *et al.* (2007). No apoptosis is induced in rat cortical neurons exposed to GSM phone fields. *Bioelectromagnetics;* 28(2):115-21.

Joubert V., Leveque P., Rametti A. *et al.* (2006). Microwave exposure of neuronal cells in vitro: Study of apoptosis. *Int J Radiat Biol.;* 82(4):267-75.

Juutilainen J., Heikkinen P., Soikkeli H. *et al.* (2007). Micronucleus frequency in erythrocytes of mice after long-term exposure to radiofrequency radiation. *Int J Radiat Biol.;* 83(4):213-20.

Kainz W., Chan D.D., Casamento J.P. *et al.* (2003). Calculation of induced current densities and specific absorption rates (SAR) for pregnant women exposed to hand-held metal detectors. *Phys Med Biol.*; 48(15):2551-60.

Kainz W., Christ A., Kellom T. *et al.* (2005). Dosimetric comparison of the specific anthropomorphic mannequin (SAM) to 14 anatomical head models using a novel definition for the mobile phone positioning. *Phys Med Biol.;* 50(14):3423-45.

Kalinin L.G., Boshkova I.L., Panchenko G.I. *et al.* (2005). [The influence of a low- and high-frequency electromagnetic fields on seeds]. *Biofizika;* 50(2):361-6.

Kalugina A.V., Petin V.G.. (2007). [Animal death after exposure to ultra-high frequency waves in the dependence of power flux density and specific absorption rate]. *Radiats Biol Radioecol.;* 47(3):333-8.

Kan P., Simonsen S.E., Lyon J.L. *et al.* (2008). Cellular phone use and brain tumor: a meta-analysis. *J Neurooncol.;* 86(1):71-8.

Kantz J., Muller J., Hadeler K.P. *et al.* (2005). Insensitivity of cardiovascular function to low power cm-/mm-microwaves. *Int J Environ Health Res.;* 15(3):207-15.

Karger C.P. (2005). Mobile phones and health: a literature overview. *Z Med Phys.;* 15(2):73-85.

Karinen A., Heinavaara S., Nylund R. *et al.* (2008). Mobile phone radiation might alter protein expression in human skin. *BMC Genomics;* 9:77.

Karipidis K.K. Is the Risk Comparison Made by the Public Between EMF and Smoking or Asbestos a Valid One? *Journal of Risk Research*; 10 (3): 307–322.

Karpowicz J., Gryz K. (2006). Health risk assessment of occupational exposure to a magnetic field from magnetic resonance imaging devices. *Int J Occup Saf Ergon*.; 12(2):155-67.

Kaszuba-Zwoinska J., Gil K., Ziomber A. *et al.* (2005). Loss of interstitial cells of Cajal after pulsating electromagnetic field (PEMF) in gastrointestinal tract of the rats. *J Physiol Pharmacol.;* 56(3):421-32.

Keetley V., Wood A.W., Spong J. *et al.* (2006). Neuropsychological sequelae of digital mobile phone exposure in humans. *Neuropsychologia;* 44(10):1843-8.

Kerekhanjanarong V., Supiyaphun P., Naratricoon J. *et al.* (2005). The effect of mobile phone to audiologic system. *J Med Assoc Thai;* 88 Suppl 4:231-4.

Kim S.H., Song J.E., Kim S.R. *et al.* (2004). Teratological studies of prenatal exposure of mice to a 20 kHz sawtooth magnetic field. *Bioelectromagnetics*; 25(2):114-7.

Kirson E.D., Dbaly V, Tovarys F. *et al.* (2007). Alternating electric fields arrest cell proliferation in animal tumor models and human brain tumors. *PNAS;* 104(24):10152-7.

Khalil S., Nunez D.A. (2006). Do mobile 'phones have a detrimental impact on auditory function? *J Laryngol Otol.;* 120(10):822-6.

Kheifets L., Oksuzyan S. (2008). Exposure Assessment and Other Challenges in Non-Ionising Radiation Studies of Childhood Leukaemia. *Radiat Prot Dosimetry;* 132(2):139-47.

Kheifets L., Ritz B. (2006). Electromagnetic fields, science and public concern. *Soz Praventivmed.;* 51(4):183-4.

Khiat A., Boulanger Y., Breton G. (2006a). Monitoring the effects of mobile phone use on the brain by proton magnetic resonance spectroscopy. *Int J Radiat Biol.;* 82(9):681-5.

Khiat A., Gianfelice D., Amara M. *et al.* (2006b). Influence of post-treatment delay on the evaluation of the response to focused ultrasound surgery of breast cancer by dynamic contrast enhanced MRI. *Br J Radiol.;* 79(940):308-14.

Khurana V.G., Teo C., Kundi M. *et al.* (2009). Cell phones and brain tumors: a review including the long-term epidemiologic data. *Surg Neurol;* 72(3):205-14; discussion 214-5.

Kim D.W., Lee J.H., Ji H.C. *et al.* (2008). Physiological effects of RF exposure on hypersensitive people by a cell phone. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.;* 1:2322-5.

Kim J., Youn C.H., Woo J.M. *et al.* (2007). Association of heart rates with stress response inventory scores in different age groups. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc;* 2007:5752-4.

Kim J.Y., Hong S.Y., Lee Y.M. *et al.* (2008). In vitro assessment of clastogenicity of mobile-phone radiation (835 MHz) using the alkaline comet assay and chromosomal aberration test. *Environ Toxicol.;* 23(3):319-27.

Kim S.Y., Jo E.K., Kim H.J. *et al.* (2008). The effects of high-power microwaves on the ultrastructure of Bacillus subtilis. *Lett Appl Microbiol.;* 47(1):35-40.

Kim T.H., Huang T.Q., Jang J.J. *et al.* (2008). Local exposure of 849 MHz and 1763 MHz radiofrequency radiation to mouse heads does not induce cell death or cell proliferation in brain. *Exp Mol Med.;* 40(3):294-303.

Kimata H. (2002). Enhancement of allergic skin wheal responses by microwave radiation from mobile phones in patients with atopic eczema/dermatitis syndrome. *Int Arch Allergy Immunol.*;129(4):348-50.

Kirson E.D., Dbaly V., Tovarys F. *et al.* (2007). Alternating electric fields arrest cell proliferation in animal tumor models and human brain tumors. *PNAS;* 104(24):10152-7.

Kirson E.D., Schneiderman R.S., Dbalý V. *et al.* (2008). Chemotherapeutic treatment efficacy and sensitivity are increased by adjuvant alternating electric fields (TTFields). *BMC Med Phys.*; 9:1.

Kirson E.D., Gurvich Z., Schneiderman R. *et al.* (2004). Disruption of cancer cell replication by alternating electric fields. *Cancer Res.*; 64(9):3288-95.

Kirson E.D., Dbaly V., Rochlys C. *et al.* (2006). Treatment of locally advanced solid tumors using alternative electric fields: a translational study. *Proc Amer Assoc Cancer Res.;* 47: 5259-60.

Klaeboe L., Blaasaas K.G., Tynes T. (2007). Use of mobile phones in Norway and risk of intracranial tumours. *Eur J Cancer Prev.;* 16(2):158-64.

Kleinlogel H., Dierks T., Koenig T. *et al.* (2008a). Effects of weak mobile phone - electromagnetic fields (GSM, UMTS) on event related potentials and cognitive functions. *Bioelectromagnetics;* 29(6):488-97.

Kleinlogel H., Dierks T., Koenig T. *et al.* (2008b). Effects of weak mobile phone - electromagnetic fields (GSM, UMTS) on well-being and resting EEG. *Bioelectromagnetics;* 29(6):479-87

Klinke A., Renn O. (2002). A new approach to risk evaluation and management: risk-based, precaution-based, and discourse-based strategies. *Risk Anal.;* 22(6):1071-94.

Knave B. (2001). Electromagnetic fields and health outcomes. *Ann Acad Med Singapore;* 30(5):489-93.

Kobbert C., Berndt A., Bierbaum T. *et al.* (2008). Low-energy electromagnetic fields promote proliferation of vascular smooth muscle cells. *Electromagn Biol Med.;* 27(1):41-53.

Kohli D.R., Sachdev A., Vats H.S. (2009). Cell phones and tumor: Still in no man's land. *Indian J Cancer;* 46(1):5-12.

Kojima M., Hata I., Wake K. *et al.* (2004). Influence of anesthesia on ocular effects and temperature in rabbit eyes exposed to microwaves. *Bioelectromagnetics;* 25(3):228-33.

Kolesnyk Iu M., Zhulins'kyi V.O., Abramov A.V. *et al.* (2008). [Effect of mobile phone electromagnetic emission on characteristics of cerebral blood circulation and neurohumoral regulations in humans]. *Fiziol Zh.;* 54(2):90-3.

Komatsubara Y., Hirose H., Sakurai T. *et al.* (2005). Effect of high-frequency electromagnetic fields with a wide range of SARs on chromosomal aberrations in murine m5S cells. *Mutat Res.;* 587(1-2):114-9.

Konings M.K., Bartels L.W., Smits H.F. *et al.* (2000). Heating around intravascular guidewires by resonating RF waves. *J Magn Reson Imaging*. 2000 Jul;12(1):79-85.

Korenstein-Ilan A., Barbul A., Hasin P. *et al.* (2008). Terahertz radiation increases genomic instability in human lymphocytes. *Radiat Res.;* 170(2):224-34.

Koyama S., Takashima Y., Sakurai T. *et al.* (2007). Effects of 2.45 GHz electromagnetic fields with a wide range of SARs on bacterial and HPRT gene mutations. *J Radiat Res. (Tokyo);* 48(1):69-75.

Kramer A., Kuhn S., Lott U. *et al.* (2005). Development of Procedures for the Assessment of Human Exposure to EMF from Wireless Devices in Home and Office Environments. Final report. Zurich: IT'IS Foundation. 64 p. (Etude effectuée par la Fondation IT'IS sur mandat de l'OFSP).

Krause C.M., Bjornberg C.H., Pesonen M. *et al.* (2006). Mobile phone effects on children's event-related oscillatory EEG during an auditory memory task. *Int J Radiat Biol.;* 82(6):443-50.

Krause C.M., Pesonen M., Haarala Bjornberg C. *et al.* (2007). Effects of pulsed and continuous wave 902 MHz mobile phone exposure on brain oscillatory activity during cognitive processing. *Bioelectromagnetics;* 28(4):296-308.

Krewski D., Glickman B.W., Habash R.W. *et al.* (2007). Recent advances in research on radiofrequency fields and health: 2001-2003. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev.;* 10(4):287-318.

Kucer N. (2008). Some ocular symptoms experienced by users of mobile phones. *Electromagn Biol Med.;* 27(2):205-9.

Kuhn S. (2006). Development of Procedures for the EMF Exposure Evaluation from Wireless Devices in Home and Office Environments. Supplement 1: Close-to-Body and Base Station Wireless Data Communication Devices. Zurich: IT'IS Foundation. (Étude effectuée par la Fondation IT'IS sur mandat de l'OFSP).

Kumar V., Vats R.P., Pathak P.P. (2008). Harmful effects of 41 and 202 MHz radiations on some body parts and tissues. *Indian J biochem biophys.*; 45(4):269-274.

Kumlin T., Iivonen H., Miettinen P. *et al.* (2007). Mobile phone radiation and the developing brain: behavioral and morphological effects in juvenile rats. *Radiat Res.;* 168(4):471-9.

Kundi M. (2004). Re: "cellular telephone use and risk of acoustic neuroma". *Am J Epidemiol.;* 160(9):923-4.

Kundi M. (2005). "Epidemiology of health effects of radiofrequency exposure". *Environ Health Perspect.;* 113(3):A151; author reply A151-2.

Kundi M. (2006). Mobile phone use and risk of glioma in adults: conclusions are questionable. *BMJ;* 332(7548):1035-6

Kundi M. (2008). What can be learned from the Japanese study of mobile phone use and acoustic neuroma? *Occup Environ Med.;* 65(6):428; author reply 428.

Kundi M. (2009). The controversy about a possible relationship between mobile phone use and cancer. *Environ Health Perspect.;* 117(3):316-24.

Kundi M., Hutter H.P. (2009). Mobile phone base stations-Effects on wellbeing and health. *Pathophysiology;* 16(2-3):123-35.

Kuo Y.C., Kuo C.Y. (2008). Electromagnetic interference in the permeability of saquinavir across the blood-brain barrier using nanoparticulate carriers. *Int J Pharm.;* 351(1-2):271-81.

Kuribayashi M., Wang J., Fujiwara O. *et al.* (2005). Lack of effects of 1439 MHz electromagnetic near field exposure on the blood-brain barrier in immature and young rats. *Bioelectromagnetics;* 26(7):578-88.

Kuzma J., Paradise J., Ramachandran G. *et al.* (2008). An integrated approach to oversight assessment for emerging technologies. *Risk Anal.;* 28(5):1197-220.

Kwon M.S., Koivisto M., Laine M. *et al.* (2008). Perception of the electromagnetic field emitted by a mobile phone. *Bioelectromagnetics;* 29(2):154-9.

Lahkola A., Auvinen A., Raitanen J. *et al.* (2007). Mobile phone use and risk of glioma in 5 North European countries. *Int J Cancer;* 120(8):1769-75.

Lahkola A., Salminen T., Auvinen A. (2005). Selection bias due to differential participation in a case-control study of mobile phone use and brain tumors. *Ann Epidemiol.;* 15(5):321-5.

Lahkola A., Salminen T., Raitanen J. *et al.* (2008). Meningioma and mobile phone use--a collaborative case-control study in five North European countries. *Int J Epidemiol.;* 37(6):1304-13.

Lahkola A., Tokola K., Auvinen A. (2006). Meta-analysis of mobile phone use and intracranial tumors. *Scand. J Work Environ Health;* 32(3):171-7.

Lai H. , Singh N.P. (2005). Interaction of Microwaves and a Temporally Incoherent Magnetic Field on Single and Double DNA Strand Breaks in Rat Brain Cells. *Electromagn Biol Med.;* 24(1):23-9.

Landgrebe M., Barta W., Rosengarth K. *et al.* (2008a). Neuronal correlates of symptom formation in functional somatic syndromes: a fMRI study. *Neuroimage;* 41(4):1336-44.

Landgrebe M., Frick U., Hauser S. *et al.* (2008b). Cognitive and neurobiological alterations in electromagnetic hypersensitive patients: results of a case-control study. *Psychol Med.;* 38(12):1781-91.

Landgrebe M., Hauser S., Langguth B. *et al.* (2007). Altered cortical excitability in subjectively electrosensitive patients: results of a pilot study. *J Psychosom. Res.;* 62(3):283-8.

Lantow M., Lupke M., Frahm J. *et al.* (2006a). ROS release and Hsp70 expression after exposure to 1,800 MHz radiofrequency electromagnetic fields in primary human monocytes and lymphocytes. *Radiat Environ Biophys.;* 45(1):55-62.

Lantow M., Schuderer J., Hartwig C. *et al.* (2006b). Free radical release and HSP70 expression in two human immune-relevant cell lines after exposure to 1800 MHz radiofrequency radiation. *Radiat Res.;* 165(1):88-94.

Lantow M., Viergutz T., Weiss D.G. *et al.* (2006c). Comparative study of cell cycle kinetics and induction of apoptosis or necrosis after exposure of human mono mac 6 cells to radiofrequency radiation. *Radiat Res.;* 166(3):539-43.

Larson K., Russ S.A., Crall J.J. *et al.* (2008). Influence of multiple social risks on children's health. *Pediatrics;* 121(2):337-44.

Laszlo A., Moros E.G., Davidson T. *et al.* (2005). The heat-shock factor is not activated in mammalian cells exposed to cellular phone frequency microwaves. *Radiat Res.;* 164(2):163-72.

Laulan A.-M. (1985). La Résistance aux systèmes d'information. Paris: Retz.

Leclerc A., Papoz L., Breart G. *et al.* (1990). Dictionnaire d'épidémiologie. Paris : Frison Roche. 143 p.

Lee A.-K., Choi H.-D., Choi J.-I. (2007). Study on SARs in Head Models With Different Shapes by Age Using SAM Model for Mobile Phone Exposure at 835 MHz. *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on;* 49(2):302-12.

Lee H.J., Choi S.Y., Jang J.J. *et al.* (2007). Lack of promotion of mammary, lung and skin tumorigenesis by 20 kHz triangular magnetic fields. *Bioelectromagnetics*; 28(6):446-53.

Lee H.J., Pack J.K., Gimm Y.M. *et al.* (2009). Teratological evaluation of mouse fetuses exposed to a 20 kHz EMF. *Bioelectromagnetics*; 30(4):330-3.

Lee J.S., Huang T.Q., Kim T.H. *et al.* (2006). Radiofrequency radiation does not induce stress response in human T-lymphocytes and rat primary astrocytes. *Bioelectromagnetics;* 27(7):578-88.

Lee J.S., Huang T.Q., Lee J.J. *et al.* (2005). Subchronic exposure of hsp70.1-deficient mice to radiofrequency radiation. *Int J Radiat Biol.;* 81(10):781-92.

Lee S., Johnson D., Dunbar K. *et al.* (2005). 2.45 GHz radiofrequency fields alter gene expression in cultured human cells. *FEBS Lett.;* 579(21):4829-36.

Lefaure C., Moatti J.P. (1983). Les ambiguïtés de de l'acceptable. *Culture Technique;* 11(1):10-25.

Legout C. (2008). Numéro thématique - Pollution des sols : de l'exposition des populations à la santé publique: *BEH*; 47-48.

Leitgeb N. (1998). Proceedings of the International Workshop on Electromagnetic Fields and Non-Specific Health Symptoms. COST Project 244. Graz, Austria, September 19-20.

Leitgeb N. (2008). Mobile phones: are children at higher risk? *Wien Med Wochenschr.;* 158(1-2):36-41.

Leitgeb N., Schrottner J. (2003). Electrosensibility and electromagnetic hypersensitivity. *Bioelectromagnetics;* 24(6):387-94.

Leitgeb N., Schrottner J., Bohm M. (2005). Does "electromagnetic pollution" cause illness? An inquiry among Austrian general practitioners. *Wien Med Wochenschr.;* 155(9-10):237-41.

Leitgeb N., Schrottner J., Cech R. (2007). Perception of ELF electromagnetic fields: excitation thresholds and inter-individual variability. *Health Phys.;* 92(6):591-5.

Lerchl A. (2008). Comments on "Effects of a 2450 MHz high-frequency electromagnetic field with a wide range of SARs on the induction of heat-shock proteins in A172 cells" by Wang et al. (Bioelectromagnetics 27: 479-486, 2006). *Bioelectromagnetics;* 29(7):583-4.

Lerchl A. (2009). Comments on "Radiofrequency electromagnetic fields (UMTS, 1,950 MHz) induce genotoxic effects in vitro in human fibroblasts but not in lymphocytes" by Schwarz et al. (Int Arch Occup Environ Health 2008: doi: 10.1007/s00420-008-0305-5). *Int Arch Occup Environ Health;* 82(2):275-8.

Lerchl A., Kruger H., Niehaus M. *et al.* (2008). Effects of mobile phone electromagnetic fields at nonthermal SAR values on melatonin and body weight of Djungarian hamsters (Phodopus sungorus). *J Pineal Res.;* 44(3):267-72.

Leszczynski D. (2007). Mobile phone radiation and gene expression. *Radiat Res.;* 167(1):121; author reply 121-3.

Leszczynski D., Joenvaara S., Reivinen J. *et al.* (2002). Non-thermal activation of the hsp27/p38MAPK stress pathway by mobile phone radiation in human endothelial cells: molecular mechanism for cancer- and blood-brain barrier-related effects. *Differentiation;* 70(2-3):120-9.

Levallois P. (2002). Hypersensitivity of human subjects to environmental electric and magnetic field exposure: a review of the literature. *Environ Health Perspect.;* 110 Suppl 4:619-23.

Levallois P., Neutra R., Lee G. *et al.* (2002). Study of self-reported hypersensitivity to electromagnetic fields in California. *Environ Health Perspect.;* 110 Suppl 4:619-23.

Leventhal A., Karsenty E., Sadetzki S. (2004). [Cellular phones and public health]. *Harefuah;* 143(8):614-8.

Leventhal H., Meyer D., Nerenz D. (1980). The common sense representation of illness danger. In: Rachman S.J. *Contributions to Medical Psychology, Vol. 2*. New York:Pergamon. pp. 7-30.

Levinson P. (2004). Cellphone: The Story of the World's Most Mobile Medium and How It Has Transformed Everything. New York. Palgrave Macmillan. 221p.

Lewer N., Davison N. (2005). Tour d'horizon des technologies non létales. *Forum du désarmement;* 1:41-57.

Li C., Xiao Y., Lin J. (2007). Design guidelines for radio frequency non-contact vital sign detection. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.;* 2007:1651-4.

Li H.W., Yao K., Jin H.Y. *et al.* (2007). Proteomic analysis of human lens epithelial cells exposed to microwaves. *Jpn J Ophthalmol.;* 51(6):412-6.

Li J.K., Lin J.C., Liu H.C. *et al.* (2006). Comparison of ultrasound and electromagnetic field effects on osteoblast growth. *Ultrasound Med Biol.;* 32(5):769-75.

Liden S. (1996). "Sensitivity to electricity"--a new environmental epidemic. *Allergy*.; 51(8):519-24.

Lim H.B., Cook G.G., Barker A.T. *et al.* (2005). Effect of 900 MHz electromagnetic fields on nonthermal induction of heat-shock proteins in human leukocytes. *Radiat Res.;* 163(1):45-52.

Limoges C. (1993). Expert knowledge and decision-making in controversy contexts. *Public Underst Sci.;* 2(4):417-26.

Lin C.J., Chen H.J. (2006). Verbal and cognitive distractors in driving performance while using hands-free phones. *Percept Mot Skills;* 103(3):803-10.

Lin J.C. (2004). Studies on microwaves in medicine and biology: from snails to humans. *Bioelectromagnetics;* 25(3):146-59.

Lin J.C. (2007). Dosimetric comparison between different quantities for limiting exposure in the RF band: rationale and implications for guidelines. *Health Phys.;* 92(6):547-53.

Lin J.C., Wang Z. (2007). Hearing of microwave pulses by humans and animals: effects, mechanism, and thresholds. *Health Phys.;* 92(6):621-8.

Lin J.L., Carreira D., Ponnappan R. *et al.* (2007). Use of bipolar radiofrequency energy in delayed repair of acute supraspinatus tears in rats. *J Shoulder Elbow Surg.;* 16(5):640-8.

Lindbohm M.L., Hietanen M., Kyyronen P. *et al.* (1992). Magnetic fields of video display terminals and spontaneous abortion. *Am J Epidemiol.;* 136(9):1041-51.

Linder S.H. (1995). Contending discourses in the electric and magnetic fields controversy: The social construction of EMF risk as a public problem. *Policy Sciences;* 28(2):209-30.

Litvak E., Foster K.R., Repacholi M.H. (2002). Health and safety implications of exposure to electromagnetic fields in the frequency range 300 Hz to 10 MHz. *Bioelectromagnetics*; 23(1):68-82.

Liu X.Y., Bian X.M., Han J.X. *et al.* (2007). [Risk factors in the living environment of early spontaneous abortion pregnant women]. *Zhongguo Yi Xue Ke Xue Yuan Xue Bao;* 29(5):661-4.

Liu Z., Ahmed M., Gervais D. *et al.* (2008). Computer modeling of factors that affect the minimum safety distance required for radiofrequency ablation near adjacent nontarget structures. *J Vasc Interv Radiol*.; 19(7):1079-86.

Livideanu C., Giordano-Labadie F., Paul C. (2007). Cellular phone addiction and allergic contact dermatitis to nickel. *Contact Dermatitis;* 57(2):130-1.

Lixia S., Yao K., Kaijun W. *et al.* (2006). Effects of 1.8 GHz radiofrequency field on DNA damage and expression of heat shock protein 70 in human lens epithelial cells. *Mutat Res.;* 602(1-2):135-42.

Logani M.K., Szabo I., Makar V. *et al.* (2006). Effect of millimeter wave irradiation on tumor metastasis. *Bioelectromagnetics;* 27(4):258-64.

Lonn S., Ahlbom A., Christensen H.C. *et al.* (2006a). Mobile phone use and risk of parotid gland tumor. *Am J Epidemiol.;* 164(7):637-43.

Lonn S., Ahlbom A., Hall P. *et al.* (2004a). Mobile phone use and the risk of acoustic neuroma. *Epidemiology;* 15(6):653-9.

Lonn S., Ahlbom A., Hall P. *et al.* (2005). Long-term mobile phone use and brain tumor risk. *Am J Epidemiol.;* 161(6):526-35.

Lonn S., Klaeboe L., Hall P. *et al.* (2004b). Incidence trends of adult primary intracerebral tumors in four Nordic countries. *Int J Cancer;* 108(3):450-5.

Lonne-Rahm S., Andersson B., Melin L. *et al.* (2000). Provocation with stress and electricity of patients with "sensitivity to electricity". *J Occup Environ Med.;* 42(5):512-6.

Lopez-Martin E., Relova-Quinteiro J.L., Gallego-Gomez R. *et al.* (2006). GSM radiation triggers seizures and increases cerebral c-Fos positivity in rats pretreated with subconvulsive doses of picrotoxin. *Neurosci Lett;* 398(1-2):139-44

Lopresto V., Pinto R., De Vita A. *et al.* (2007). Exposure setup to study potential adverse effects at GSM 1800 and UMTS frequencies on the auditory systems of rats. *Radiat Prot Dosimetry;* 123(4):473-82.

Loughran S.P., Wood A.W., Barton J.M. *et al.* (2005). The effect of electromagnetic fields emitted by mobile phones on human sleep. *Neuroreport;* 16(17):1973-6.

Lukasiewicz M., Fareng M., Benyamina A. *et al.* (2007). Ecological momentary assessment in addiction. *Expert Rev Neurother.;* 7(8):939-50.

Lundqvist A., Alinder J., Ronnberg J. (2008). Factors influencing driving 10 years after brain injury: *Brain Inj.*; 22(4):304 p.

Luo B.M., Wen Y.L., Yang H.Y. *et al.* (2005). Percutaneous ethanol injection, radiofrequency and their combination in treatment of hepatocellular carcinoma. *World J Gastroenterol.;* 11(40):6277-80.

Luukkonen J., Hakulinen P., Maki-Paakkanen J. *et al.* (2009). Enhancement of chemically induced reactive oxygen species production and DNA damage in human SH-SY5Y neuroblastoma cells by 872 MHz radiofrequency radiation. *Mutat Res.;* 662(1-2):54-8.

Lyskov E., Sandstrom M., Hansson M.K. (2001). Neurophysiological study of patients with perceived 'electrical hypersensitivity'. *Int J Psychophysiol.;* 42(3):233-41.

Maby E., Jeannes Rle B., Faucon G. (2006). Scalp localization of human auditory cortical activity modified by GSM electromagnetic fields. *Int J Radiat Biol.;* 82(7):465-72.

Maby E., Le Bouquin Jeannes R., Faucon G. *et al.* (2005). Effects of GSM signals on auditory evoked responses. *Bioelectromagnetics;* 26(5):341-50.

Maeda K., Maeda T., Qi Y. (2004). In vitro and in vivo induction of human LoVo cells into apoptotic process by non-invasive microwave treatment: a potentially novel approach for physical therapy of human colorectal cancer. *Oncol Rep.;* 11(4):771-5.

Maes A., Collier M., Verschaeve L. (2001). Cytogenetic effects of 900 MHz (GSM) microwaves on human lymphocytes. *Bioelectromagnetics;* 22(2):91-6.

Maes A., Van G.U., Verschaeve L. (2006). Cytogenetic investigation of subjects professionally exposed to radiofrequency radiation. *Mutagenesis;* 21(2):139-42.

Mahrour N., Pologea-Moraru R., Moisescu M.G. *et al.* (2005). In vitro increase of the fluid-phase endocytosis induced by pulsed radiofrequency electromagnetic fields: importance of the electric field component. *Biochim Biophys Acta;* 1668(1):126-37.

Makar V.R., Logani M.K., Bhanushali A. *et al.* (2006). Effect of cyclophosphamide and 61.22 GHz millimeter waves on T-cell, B-cell, and macrophage functions. *Bioelectromagnetics;* 27(6):458-66.

Makker K., Varghese A., Desai N.R. *et al.* (2009). Cell phones: modern man's nemesis? *Reprod Biomed Online;* 18(1):148-57.

Makris N., Angelone L., Tulloch S. *et al.* (2008). MRI-based anatomical model of the human head for specific absorption rate mapping. *Med Biol Eng Comput.*; 46(12):1239-51.

Malmer B.S., Feychting M., Lonn S. *et al.* (2007). Genetic variation in p53 and ATM haplotypes and risk of glioma and meningioma. *J Neurooncol.;* 82(3):229-37.

Mann K., Roschke J. (1996). Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep. *Neuropsychobiology;* 33(1):41-7.

Mann K., Roschke J. (2004). Sleep under exposure to high-frequency electromagnetic fields. *Sleep Med Rev.;* 8(2):95-107.

Mann K., Roschke J., Connemann B. *et al.* (1998). No effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on heart rate variability during human sleep. *Neuropsychobiology;* 38(4):251-6.

Mann S.M., Addison D.S., Blackwell R.P. *et al.* (2005). Personnal dosimetry of RF radiation. Chilton: Health Protection Agency. (HPA-RPD-008).

Manti L., Braselmann H., Calabrese M.L. *et al.* (2008). Effects of modulated microwave radiation at cellular telephone frequency (1.95 GHz) on X-ray-induced chromosome aberrations in human lymphocytes in vitro. *Radiat Res.;* 169(5):575-83.

Marchionni I., Paffi A., Pellegrino M. *et al.* (2006). Comparison between low-level 50 Hz and 900 MHz electromagnetic stimulation on single channel ionic currents and on firing frequency in dorsal root ganglion isolated neurons. *Biochim Biophys Acta;* 1758(5):597-605.

Marcus M., McChesney R., Golden A. *et al.* (2002). Video display terminals and miscarriage. J *Am Med Womens Assoc.*; 55(2):84-8, 105.

Marinelli F., La Sala D., Cicciotti G. *et al.* (2004). Exposure to 900 MHz electromagnetic field induces an unbalance between pro-apoptotic and pro-survival signals in T-lymphoblastoid leukemia CCRF-CEM cells. *J Cell Physiol.;* 198(2):324-32.

Markkanen A., Penttinen P., Naarala J. *et al.* (2004). Apoptosis induced by ultraviolet radiation is enhanced by amplitude modulated radiofrequency radiation in mutant yeast cells. *Bioelectromagnetics;* 25(2):127-33.

Markova E., Hillert L., Malmgren L. *et al.* (2005). Microwaves from GSM mobile telephones affect 53BP1 and gamma-H2AX foci in human lymphocytes from hypersensitive and healthy persons. *Environ Health Perspect.;* 113(9):1172-7.

Martens L. (2005). Electromagnetic safety of children using wireless phones: a literature review. *Bioelectromagnetics;* Suppl 7:133-7.

Martha C., Coulorr M., Souville M. *et al.* (2006). [Risks linked to mobile phone use and how they are portrayed in the media: examples from three daily newspapers]. *Sante Publique;* 18(2):275-88.

Masuda H., Ishiyama A., Takahashi M. *et al.* (2008). Effect of 915 MHz electromagnetic field irradiated in TEM-cell on blood-brain barrier and neurons in the rat brain. 30th International Meeting of the Bioelectromagnetics Society. San Diego, USA.

Masuda H., Sanchez S., Dulou P.E. *et al.* (2006). Effect of GSM-900 and -1800 signals on the skin of hairless rats. I: 2-hour acute exposures. *Int J Radiat Biol.;* 82(9):669-74.

Matanoski G.M., Breysse P.N., Elliott E.A. (1991). Electromagnetic field exposure and male breast cancer. *Lancet;* 337(8743):737.

Mattei E., Calcagnini G., Triventi M. *et al.* (2006). MRI induced heating of pacemaker leads: effect of temperature probe positioning and pacemaker placement on lead tip heating and local SAR. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*.; 1:1889-92.

Mattei E., Triventi M., Calcagnini G. *et al.* (2008).Complexity of MRI induced heating on metallic leads: experimental measurements of 374 configurations. *Biomed Eng Online*.; 7:11.

Mayo M.S., Gajewski B.J. Morris J.S. (2006). Some statistical issues in microarray gene expression data. *Radiat Res*.;165(6):745-8.

Mazor R., Korenstein-Ilan A., Barbul A. *et al.* (2008). Increased levels of numerical chromosome aberrations after in vitro exposure of human peripheral blood lymphocytes to radiofrequency electromagnetic fields for 72 hours. *Radiat Res.;* 169(1):28-37.

McIntosh R.L., Iskra S., McKenzie R.J. *et al.* (2008). Assessment of SAR and thermal changes near a cochlear implant system for mobile phone type exposures. *Bioelectromagnetics;* 29(1):71-80.

McIntosh R.L., Anderson V., McKenzie R.J. (2005). A numerical evaluation of SAR distribution and temperature changes around a metallic plate in the head of a RF exposed worker. *Bioelectromagnetics*.; 26(5):377-88.

McDonough C. (2003). The Impact of Wireless Towers on Residential Property Values. *Assessment Journal; Summer 2003: 25-32.*

McKinlay A.F. (1997). Radiotelephones and Human Health - A European Research Initiative. *Radiation Protection Dosimetry;* 72(3-4):313-20.

Mead M.N. (2008). Strong signal for cell phone effects. *Environ Health Perspect.;* 116(10):A422.

Mechanic D. (1972). Social psychologic factors affecting the presentation of bodily complaints. *N Engl. J Med.;* 286(21):1132-9.

Meltz M.L. (2003). Radiofrequency exposure and mammalian cell toxicity, genotoxicity, and transformation. *Bioelectromagnetics;* Suppl 6:196-213.

Meng L., Peng R.Y., Gao Y.B. *et al.* (2006). [Changes of apoptosis, mitochondrion membrane potential and Ca2+ of hypothalamic neurons induced by high power microwave]. *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi;* 24(12):739-41.

Meo S.A., Al-Drees A.M. (2005a). Do mobile phones cause hearing and vision complaints? A preliminary report. *Saudi Med J.;* 26(5):882-3.

Meo S.A., Al-Drees A.M. (2005b). Mobile phone related-hazards and subjective hearing and vision symptoms in the Saudi population. *Int J Occup Med Environ Health;* 18(1):53-7

Merola P., Marino C., Lovisolo G.A. *et al.* (2006). Proliferation and apoptosis in a neuroblastoma cell line exposed to 900 MHz modulated radiofrequency field. *Bioelectromagnetics;* 27(3):164-71.

Merritt J.H., Chamness A.F., Allen S.J. (1978). Studies on blood-brain barrier permeability after microwave-radiation. *Radiat Environ Biophys.;* 15(4):367-77.

Merzenich H., Schmiedel S., Bennack S. *et al.* (2008). Childhood leukemia in relation to radio frequency electromagnetic fields in the vicinity of TV and radio broadcast transmitters. *Am J Epidemiol.*; 168(10):1169-78.

Metz S.M., Wyrwich K.W., Babu A.N. *et al.* (2007). Validity of patient-reported health-related quality of life global ratings of change using structural equation modeling. *Qual Life Res.;* 16(7):1193-202.

Mezei G., Kheifets L. (2006). Selection bias and its implications for case-control studies: a case study of magnetic field exposure and childhood leukaemia. *Int J Epidemiol.;* 35(2):397-406.

Michelozzi P., Kirchmayer U., Capon A. (2001). [Leukemia mortality and incidence of infantile leukemia near the Vatican Radio Station of Rome]. *Epidemiol Prev*.; 25(6):249-55.

Mild H.K., Alanko T., Decat G. *et al.* (2009). Exposure of workers to electromagnetic fields. A review of open questions on exposure assessment techniques. *Int J Occup Saf Ergon.;* 15(1):3-33.

Mild K.H. (1981). Radiofrequency electromagnetic fields in Swedish radio stations and tall FM/TV towers. *Bioelectromagnetics*.; 2(1):61-9.

Mild K.H., Hardell L., Carlberg M. (2007). Pooled analysis of two Swedish case-control studies on the use of mobile and cordless telephones and the risk of brain tumours diagnosed during 1997-2003. *Int J Occup Saf Ergon.;* 13(1):63-71.

Mild K.H., Repacholi M., van Deventer E. *et al.* (2006). Electromagnetic hypersensitivity. Proceedings of the International Workshop on EMF Hypersensitivity. Prague, Czech Republic, October 25-27, 2004. Geneva: WHO.

Miller C. (2000). The dynamics of framing environmental values and policy: four models of societal processes. *Environ Values;* 9(2):211-33.

Minelli T.A., Balduzzo M., Milone F.F. *et al.* (2007). Modeling cell dynamics under mobile phone radiation. *Nonlinear Dynamics Psychol Life Sci;* 11(2):197-218.

Mitchell L.M., Cambrosio A. (1997). The Invisible Topography of Power: Electromagnetic Fields, Bodies and the Environment. *Soc Stud Sci.;* 27(2):221-71.

Miyakoshi J., Takemasa K., Takashima Y. *et al.* (2005). Effects of exposure to a 1950 MHz radio frequency field on expression of Hsp70 and Hsp27 in human glioma cells. *Bioelectromagnetics;* 26(4):251-7.

Miyakoshi J., Horiuchi E., Nakahara T. *et al.* (2007). Magnetic fields generated by an induction heating (IH) cook top do not cause genotoxicity in vitro. *Bioelectromagnetics*.; 28(7):529-37.

Moisescu M.G., Leveque P., Bertrand J.R. *et al.* (2008). Microscopic observation of living cells during their exposure to modulated electromagnetic fields. *Bioelectrochemistry;* 74(1):9-15.

Moisescu M.G., Leveque P., Verjus M.A. *et al.* (2009). 900 MHz modulated electromagnetic fields accelerate the clathrin-mediated endocytosis pathway. *Bioelectromagnetics;* 30(3):222-30.

Mollerlokken O.J., Moen B.E. (2008). Is fertility reduced among men exposed to radiofrequency fields in the Norwegian Navy? *Bioelectromagnetics;* 29(5):345-52.

Monnery P.M., Srouji E.I., Bartlett J. (2004). Is cochlear outer hair cell function affected by mobile telephone radiation? *Clin Otolaryngol Allied Sci.;* 29(6):747-9.

Moquet J., Ainsbury E., Bouffler S. *et al.* (2008). Exposure to low level GSM 935 MHZ radiofrequency fields does not induce apoptosis in proliferating or differentiated murine neuroblastoma cells. *Radiat Prot Dosimetry;* 131(3):287-96.

Mora R., Crippa B., Mora F. *et al.* (2006). A study of the effects of cellular telephone microwave radiation on the auditory system in healthy men. *Ear Nose Throat J;* 85(3):160, 162-3.

Morandi M.A., Pak C.M., Caren R.P., Caren LD. *et al.* (1996). Lack of an EMF-induced genotoxic effect in the Ames assay. *Life Sci.*; 59(3):263-71.

Morel J. (2002). Une ethnographie de la telephonie mobile dans les lieux publics, *Réseaux;* 2-3 (112-113): 50-77.

Morgan L.L. (2006). Re: "Cellular phones, cordless phones, and the risks of glioma and meningioma (Interphone Study Group, Germany)". *Am J Epidemiol.;* 164(3):294-5.

Morimoto S., Takahashi T., Shimizu K. *et al.* (2005). Electromagnetic fields inhibit endothelin-1 production stimulated by thrombin in endothelial cells. *J Int Med Res.;* 33(5):545-54.

Moulder J.E., Erdreich L.S., Malyapa R.S. *et al.* (1999). Cell phones and cancer: what is the evidence for a connection? *Radiat Res.;* 151(5):513-31.

Moulder J.E., Foster K.R., Erdreich L.S. *et al.* (2005). Mobile phones, mobile phone base stations and cancer: a review. *Int J Radiat Biol.;* 81(3):189-203.

Mousavy S.J., Riazi G.H., Kamarei M. *et al.* (2009). Effects of mobile phone radiofrequency on the structure and function of the normal human hemoglobin. *Int J Biol Macromol.;* 44(3):278-85.

MTHR. (2007). Mobile Telecommunications and Health Research Programme - Report 2007. 57 p.

Mulhall J., King R., Glina S. *et al.* (2008). Importance of and satisfaction with sex among men and women worldwide: results of the global better sex survey. *J Sex Med.;* 5(4):788-95.

Musaev A.V., Ismailova L.F., Shabanova A.B. *et al.* (2004). [Pro- and antioxidant effect of electromagnetic fields of extremely high frequency (460 MHz) on brain tissues in experiment]. *Vopr Kurortol Fizioter Lech Fiz Kult;* 2):19-23.

Muscat J.E., Hinsvark M., Malkin M. (2006). Mobile telephones and rates of brain cancer. *Neuroepidemiology;* 27(1):55-6.

N.Y.T. (1914). Persistent Theory of Wireless Peril; French Press Attributes Many Explosions to Hertzian Waves: *New York Times*; 10 mai 1914.

Naarala J., Hoyto A., Markkanen A. (2004). Cellular effects of electromagnetic fields. *Altern Lab Anim.;* 32(4):355-60.

Nadareishvili G.G. (2006a). [Comparative analysis of the influence of various factors in different combinations on the ionic homeostasis of a cell]. *Georgian Med News;* 137:109-11.

Nadareishvili G.G. (2006b). [Influence of electromagnetic radiation of different ranges on the transmembrane transport of Na+, K+, and Ca2+ ions in normal and tumor cells]. *Georgian Med News;* 134:104-6.

Nakasono S., Nishimura I. (2005). Evaluation of biological effects of intermediate frequency magnetic fields – micronucleus formation and chick embryo development. *CRIEPY Reports*; V06007:44-45; V04008:62-63.

Nam K.C., Kim S.W., Kim S.C. *et al.* (2006). Effects of RF exposure of teenagers and adults by CDMA cellular phones. *Bioelectromagnetics;* 27(7):509-14.

Narayanan S.N., Kumar R.S., Potu B.K. *et al.* (2009). Spatial memory performance of Wistar rats exposed to mobile phone. *Clinics;* 64(3):231-4.

Nasta F., Prisco M.G., Pinto R. *et al.* (2006). Effects of GSM-modulated radiofrequency electromagnetic fields on B-cell peripheral differentiation and antibody production. *Radiat Res.;* 165(6):664-70.

National Research Council, Committee on Identification of Research Needs Relating to Potential Biological or Adverse Health Effects of Wireless Communications Devices (2008). Identification of Research Needs Relating to Potential Biological or Adverse Health Effects of Wireless Communication. The National Academies Press.

NCCEH. (2008). Utilisation du téléphone cellulaire ou mobile et tumeurs intracrâniennes. Vancouver: Centre de collaboration nationale en santé environnementale.

Nebeker J.R., Virmani R., Bennett C.L. *et al.* (2006). Hypersensitivity cases associated with drug-eluting coronary stents: a review of available cases from the Research on Adverse Drug Events and Reports (RADAR) project. *J Am Coll Cardiol.;* 47(1):175-81.

Nelson P.D., Toledano M.B., McConville J. *et al.* (2006). Trends in acoustic neuroma and cellular phones: is there a link? *Neurology;* 66(2):284-5.

Neubauer G. (2006). Evaluation of the correlation between RF dosimeter reading and real human exposure. Swiss Research Foundation on Mobile Communication. (Project reference: C2006-07).

Neubauer G., Cecil S., Giczi W. *et al.* (2008). Evaluation of the Correlation between RF Dosimeter reading and Real Human Exposure. Final report on the project C2006-07. (ARC-report ARC-IT-0218).

Neubauer G., Feychting M., Hamnerius Y. *et al.* (2007). Feasibility of future epidemiological studies on possible health effects of mobile phone base stations. *Bioelectromagnetics;* 28(3):224-30.

Neyens D.M., Boyle L.N. (2007). The effect of distractions on the crash types of teenage drivers. *Accid Anal Prev.;* 39(1):206-12.

Nicolas Nicolaz C., Zhadobov M., Desmots F. *et al.* (2008). Absence of direct effect of low-power millimeter-wave radiation at 60.4 GHz on endoplasmic reticulum stress. *Cell Biol Toxicol;* 25(5):471-478.

Nieto-Hernandez R., Rubin G.J., Cleare A.J. *et al.* (2008). Can evidence change belief? Reported mobile phone sensitivity following individual feedback of an inability to discriminate active from sham signals. *J Psychosom. Res.;* 65(5):453-60.

Nikolova T., Czyz J., Rolletsch. *al.* (2005). Electromagnetic fields affect transcript levels of apoptosis-related genes in embryonic stem cell-derived neural progenitor cells. *Faseb J.;* 19(12):1686-8.

Nittby H., Brun A., Eberhardt J. *et al.* (2009). Increased blood-brain barrier permeability in mammalian brain 7 days after exposure to the radiation from a GSM-900 mobile phone. *Pathophysiology;* 16(2-3):103-12.

Nittby H., Grafstrom G., Eberhardt J.L. *et al.* (2008a). Radiofrequency and extremely low-frequency electromagnetic field effects on the blood-brain barrier. *Electromagn Biol Med.;* 27(2):103-26.

Nittby H., Grafstrom G., Tian D.P. *et al.* (2008b). Cognitive impairment in rats after long-term exposure to GSM-900 mobile phone radiation. *Bioelectromagnetics;* 29(3):219-32.

Nittby H., Widegren B., Krogh M. *et al.* (2008c). Exposure to radiation from global system for mobile communications at 1,800 MHz significantly changes gene expression in rat hippocampus and cortex. *Environmentalist; 28(4):*458-465.

Nitz W.R., Oppelt A., Renz W. *et al.* (2001). On the heating of linear conductive structures as guide wires and catheters in interventional MRI. *J Magn Reson Imaging*.; 13(1):105-14.

Niwa T., Takemura Y., Inoue T. *et al.* (2008). Implant hyperthermia resonant circuit produces heat in response to MRI unit radiofrequency pulses. *Br J Radiol.*; 81(961):69-72.

Norstöm G. (2004). The invisible disease - The Dangers of Environmental Illnesses caused by Electromagnetic Fields and Chemical Emissions. O Books.

Nouis A. (2009). Bannissons les portables de l'école ! - Une mesure d'urgence pédagogique: *Le Monde*, 10 juin 2009.

Nutt J.G., Anderson V.C., Peacock J.H. *et al.* (2001). DBS and diathermy interaction induces severe CNS damage. Neurology.; 56(10):1384-6.

Nylund R., Leszczynski D. (2006). Mobile phone radiation causes changes in gene and protein expression in human endothelial cell lines and the response seems to be genome- and proteome-dependent. *Proteomics;* 6(17):4769-80.

O'Carroll M.J., Henshaw D.L. (2008). Aggregating disparate epidemiological evidence: comparing two seminal EMF reviews. *Risk Anal.;* 28(1):225-34.

Obelenis V., Malinauskiene V. (2007). [The influence of occupational environment and professional factors on the risk of cardiovascular disease]. *Medicina (Kaunas);* 43(2):96-102.

Oberfeld G. Umweltepidemiologische Untersuchung der Krebsinzidenz in den Gemeinden Hausmannstätten & Vasoldsberg. Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung für das Gesundheitswesen (Landessanitätsdirektion), Graz, 2008.

Oberto G., Rolfo K., Yu P. *et al.* (2007). Carcinogenicity study of 217 Hz pulsed 900 MHz electromagnetic fields in Pim1 transgenic mice. *Radiat Res.;* 168(3):316-26.

OCDE. (2008). L'OCDE en chiffres - Edition 2008. Paris: Les éditions de l'OCDE. 92 p.

Ockerman P.A. (1999). [Article en ligne]. Treatment of electrical hypersensitivity by high-dose, broad-spectrum antioxidants and pulsed magnetic fields. En ligne : http://www.papimi.gr/cases/ockerman/ockerman2.htm. [dernière mise à jour 25/01/1999].

Odaci E., Bas O., Kaplan S. (2008). Effects of prenatal exposure to a 900 MHz electromagnetic field on the dentate gyrus of rats: a stereological and histopathological study. *Brain Res.;* 1238:224-9.

OFEV. (2007). Disposition à payer pour une meilleure qualité de l'environnement sur le lieu d'habitation. Estimations pour les villes de Zurich et Lugano dans les domaines de la pollution de l'air, de l'exposition au bruit et de l'électrosmog dû aux antennes de téléphonie mobile. Berne: OFEV. 40 p. (UW-0717-F).

Oftedal G., Nyvang A., Moen B.E. (1999). Long-term effects on symptoms by reducing electric fields from visual display units. Scand J Work Environ Health.; 25(5):415-21.

Oftedal G., Straume A., Johnsson A. *et al.* (2007). Mobile phone headache: a double blind, sham-controlled provocation study. *Cephalalgia;* 27(5):447-55.

Oftedal G., Vistnes A.I., Rygge K. (1995). Skin symptoms after the reduction of electric fields from visual display units. *Scand J Work Environ Health*.; 21(5):335-44. Erratum in: *Scand J Work Environ Health*;21(6):536.

Ogawa K., Nabae K., Wang J. *et al.* (2009). Effects of gestational exposure to 1.95-GHz W-CDMA signals for IMT-2000 cellular phones: Lack of embryotoxicity and teratogenicity in rats. *Bioelectromagnetics;* 30(3):205-12.

Ohmori S., Masuda K., Arai T. (2005a). Characteristics of Photocytotoxicity with high peak power pulsed irradiation: Comparison of Photodynamic Therapy with two photosensitizers, Photofrin® and mono-L-aspartyl chlorin e6 on prostate cancer cell in vitro. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.;* 1(1):217-9.

Ohmori S., Masuda K., Yoshida M. *et al.* (2005b). The study of the characteristic of photocytotoxicity under high peak power pulsed irradiation with ATX-S10Na(II) in vitro. *Lasers Med Sci.;* 20(2):54-61.

Oktay M.F., Dasdag S. (2006). Effects of intensive and moderate cellular phone use on hearing function. *Electromagn Biol Med.;* 25(1):13-21.

Oktem F., Ozguner F., Mollaoglu H. *et al.* (2005). Oxidative damage in the kidney induced by 900-MHz-emitted mobile phone: protection by melatonin. *Arch Med Res.;* 36(4):350-5.

Olsen R.G. (1999). Exposure to EMF in the range 300Hz to 10MHz: exposures in the military settings. *Matthes*; 45-51.

OMS. (2005). Electromagnetic fields and public health: Electromagnetic Hypersensitivity. Geneva: WHO. (Fact sheet N°296).

OMS. (2009). Electromagnetic fields and public health: effects of radiofrequency fields. (Fact sheet n°183).

OMS. (2007). "The International EMF project". Rapport d'avancement 2006-2007. Geneva: OMS. 22 p.

Ono T., Saito Y., Komura J. *et al.* (2004). Absence of mutagenic effects of 2.45 GHz radiofrequency exposure in spleen, liver, brain, and testis of lacZ-transgenic mouse exposed in utero. *Tohoku J Exp Med.;* 202(2):93-103.

Oral B., Guney M., Ozguner F. *et al.* (2006). Endometrial apoptosis induced by a 900-MHz mobile phone: preventive effects of vitamins E and C. *Adv Ther.;* 23(6):957-73.

Orendacova J., Orendac M., Racekova E. *et al.* (2007). Neurobiological effects of microwave exposure: a review focused on morphological findings in experimental animals. *Arch Ital Biol.;* 145(1):1-12.

Orendacova J., Racekova E., Orendac M. *et al.* (2009). Immunohistochemical Study of Postnatal Neurogenesis After Whole-body Exposure to Electromagnetic Fields: Evaluation of Age- and Dose-Related Changes in Rats. *Cell Mol Neurobiol;* 29(6-7):981-90.

Otto M., von Muhlendahl K.E. (2007). Electromagnetic fields (EMF): do they play a role in children's environmental health (CEH)? *Int J Hyg Environ Health;* 210(5):635-44.

Ouyang G., Song B., Zhang H. *et al.* (2005). A novel synthesis of (E)-3-methylthio-3-substituted arylamino-2-cyanoacrylates under microwave irradiation. *Molecules;* 10(10):1351-7.

Oysu C., Topak M., Celik O. *et al.* (2005). Effects of the acute exposure to the electromagnetic field of mobile phones on human auditory brainstem responses. *Eur Arch Otorhinolaryngol.;* 262(10):839-43.

Ozaki T., Tabuse K., Tsuji T. *et al.* (2003). Microwave cell death: Enzyme histochemical evaluation for metastatic carcinoma of the liver. *Pathol Int.;* 53(12):837-45.

Ozguner F., Altinbas A., Ozaydin M. *et al.* (2005a). Mobile phone-induced myocardial oxidative stress: protection by a novel antioxidant agent caffeic acid phenethyl ester. *Toxicol Ind Health;* 21(9):223-30.

Ozguner F., Oktem F., Armagan A. *et al.* (2005b). Comparative analysis of the protective effects of melatonin and caffeic acid phenethyl ester (CAPE) on mobile phone-induced renal impairment in rat. *Mol Cell Biochem.;* 276(1-2):31-7.

Paglialonga A., Tognola G., Parazzini M. *et al.* (2007). Effects of mobile phone exposure on time frequency fine structure of transiently evoked otoacoustic emissions. *J Acoust Soc Am.;* 122(4):2174-82.

Pallesen S., Nordhus I.H., Omvik S. *et al.* (2007). Prevalence and risk factors of subjective sleepiness in the general adult population. *Sleep;* 30(5):619-24.

Palumbo R., Brescia F., Capasso D. *et al.* (2008). Exposure to 900 MHz radiofrequency radiation induces caspase 3 activation in proliferating human lymphocytes. *Radiat Res.;* 170(3):327-34.

Panagopoulos D.J., Chavdoula E.D., Nezis I.P. *et al.* (2007). Cell death induced by GSM 900-MHz and DCS 1800-MHz mobile telephony radiation. *Mutat Res.;* 626(1-2):69-78.

Papageorgiou C.C., Nanou E.D., Tsiafakis V.G. *et al.* (2006). Acute mobile phone effects on pre-attentive operation. *Neurosci Lett.;* 397(1-2):99-103.

Paparini A., Rossi P., Gianfranceschi G. *et al.* No evidence of major transcriptional changes in the brain of mice exposed to 1800 MHz GSM signal. *Bioelectromagnetics*.; 29(4):312-23.

Parazzini M., Bell S., Thuroczy G. *et al.* (2005). Influence on the mechanisms of generation of distortion product otoacoustic emissions of mobile phone exposure. *Hear Res.;* 208(1-2):68-78.

Parazzini M., Brazzale A.R., Paglialonga A. *et al.* (2007a). Effects of GSM cellular phones on human hearing: the European project "GUARD". *Radiat Res.;* 168(5):608-13.

Parazzini M., Galloni P., Piscitelli M. *et al.* (2007b). Possible combined effects of 900 MHZ continuous-wave electromagnetic fields and gentamicin on the auditory system of rats. *Radiat Res.;* 167(5):600-5.

Parazzini M., Ravazzani P., Tognola G. *et al.* (2007c). Electromagnetic fields produced by GSM cellular phones and heart rate variability. *Bioelectromagnetics;* 28(2):122-9.

Parazzini M., Tognola G., Franzoni C. *et al.* (2007d). Modeling of the internal fields distribution in human inner hearing system exposed to 900 and 1800 MHz. *IEEE Trans Biomed Eng;* 54(1):39-48.

Paulraj R., Behari J. (2006). Single strand DNA breaks in rat brain cells exposed to microwave radiation. *Mutat Res.;* 596(1-2):76-80.

Pavicic I. (2004). [Impact of radiofrequency/microwave radiation on cell and cytoskeleton structure]. *Arh Hig Rada Toksikol.;* 55(4):321-8.

Pavicic I., Trosic I. (2008a). Impact of 864 MHz or 935 MHz radiofrequency microwave radiation on the basic growth parameters of V79 cell line. *Acta Biol Hung;* 59(1):67-76.

Pavicic I., Trosic I. (2008b). In vitro testing of cellular response to ultra high frequency electromagnetic field radiation. *Toxicol In Vitro;* 22(5):1344-8.

Pearce N., Reif J., Fraser J. (1989). Case-control studies of cancer in New Zealand electrical workers. *Int J Epidemiol.;* 18(1):55-9.

Pennebaker J.W. (1982). Perceptual processes I: Competition of cues. In: *The Psychology of Physical Symptoms*. New York: Springer-Verlag. pp. 169-71.

Perentos N., Croft R.J., McKenzie R.J. *et al.* (2007). Comparison of the effects of continuous and pulsed mobile phone like RF exposure on the human EEG. *Australas Phys Eng Sci Med.;* 30(4):274-80.

Perentos N., Croft R.J., McKenzie R.J. *et al.* (2008a). The effect of GSM-like ELF radiation on the alpha band of the human resting EEG. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc;* 1:5680-3.

Perentos N., Iskra S., McKenzie R.J. *et al.* (2008b). Simulation of pulsed ELF magnetic fields generated by GSM mobile phone handsets for human electromagnetic bioeffects research. *Australas Phys Eng Sci Med.;* 31(3):235-42.

Perez-Cadahia B., Laffon B., Pasaro E. *et al.* (2006). Genetic damage induced by accidental environmental pollutants. *ScientificWorldJournal;* 6:1221-37.

Pevzner E., David R., Leitner Y. *et al.* (2005). [Pulsed radiofrequency treatment of severe radicular pain]. *Harefuah;* 144(3):178-80.

Peyman A., Holden S.J., Watts S. *et al.* (2007). Dielectric properties of porcine cerebrospinal tissues at microwave frequencies: in vivo, in vitro and systematic variation with age. *Phys Med Biol.;* 52(8):2229-45.

Philips A., Philips J. (2003). Electrical Hypersensitivity. A modern illness.

Phillips J.L., Singh N.P., Lai H. (2009). Electromagnetic fields and DNA damage. *Pathophysiology;* 16(2-3):79-88.

Pidgeon N.F., Kasperson R., Slovic P. (2003). The social amplification of risk. Cambridge: Cambridge University Press. 448 p.

Pidgeon N.F., Lorenzoni I., Poortinga W. (2008). Climate change or nuclear power--No thanks! A quantitative study of public perceptions and risk framing in Britain. *Glob Environ Change;* 18(1):69-85.

Pirkkala L., Nykanen P., Sistonen L. (2001). Roles of the heat shock transcription factors in regulation of the heat shock response and beyond. *Faseb J.;* 15(7):1118-31.

Platano D., Mesirca P., Paffi A. *et al.* (2007). Acute exposure to low-level CW and GSM-modulated 900 MHz radiofrequency does not affect Ba 2+ currents through voltage-gated calcium channels in rat cortical neurons. *Bioelectromagnetics;* 28(8):599-607.

Podgorskii V.S., Voichuk S.I., Gromozova E.N. *et al.* (2004). [Protective action of electromagnetic radiation (40.68 MHz) on Saccharomyces cerevisiae UCM Y-517]. *Mikrobiol Z.;* 66(5):48-56.

Polk C. (1995). Electric and magnetic fields for bone and soft tissue repair. In: *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*. CRC Press. pp. 231-44.

Poole C., Greenland S., Luetters C. *et al.* (2004). Socioeconomic status and childhood leukaemia: a review. *Int J Epidemiol.;* 35(2):370-84.

Poortinga W., Cox P., Pidgeon N. (2008) The Perceived Health Risks of Indoor Radon Gas and Overhead Powerlines: A Comparative Multilevel Approach. *Risk Analysis*; 28 (1): 235 - 248.

PoP M., Molchovski A., Chin L. *et al.* (2003). Changes in dielectric properties at 460MHz of kidney and fat during heating : importance for RF thermal therapy. *Phys Med Biol.*; 48(15): 2509-2525

Poulletier de Gannes F., Billaudel B., Taxile M. *et al.* (2009). Effects of head-only exposure of rats to GSM-900 on blood-brain barrier permeability and neuronal degeneration. *Radiat Res;* 172(3):359-67

Poumadere M., Mays C. (2003). The dynamics of risk amplification and attenuation in context: A French case study. In: Pidgeon N., Kasperson R., Slovic P. *Risk Communication and social amplification of risk*. Cambridge:Cambridge University Press. pp. 209-42.

Pourlis A.F. (2009). Reproductive and developmental effects of EMF in vertebrate animal models. *Pathophysiology;* 16(2-3):179-89.

Power D., Power M. R., Rehling B. (2007). German Deaf People Using Text Communication: Short Message Service, Tty, Relay Services, Fax, And E-Mail. *American Annals Of The Deaf;* 152 (3): 291-301

Pradier A., Hadjem A., Lautru D. *et al.* (2008a). Evaluation of the SAR induced in a multilayer biological structure and comparison with SAR in homogeneous tissues. *Ann Telecomm.;* 63(1):79-86.

Pradier A., Lautru D., Wong M.F. *et al.* (2008b). Rigorous Evaluation of Specific Absorption Rate (SAR) Induced in a Multilayer Biological Structure. *IEEE Microwave Conference, 2005 European.* 4 p.

Preece A.W., Georgiou A.G., Dunn E.J. *et al.* (2007). Health response of two communities to military antennae in Cyprus. *Occup Environ Med.;* 64(6):402-8.

Preece A.W., Goodfellow S., Wright M.G. *et al.* (2005). Effect of 902 MHz mobile phone transmission on cognitive function in children. *Bioelectromagnetics;* Suppl 7:138-43.

Prisco M.G., Nasta F., Rosado M.M. *et al.* (2008). Effects of GSM-modulated radiofrequency electromagnetic fields on mouse bone marrow cells. *Radiat Res.;* 170(6):803-10.

Qian X.W., Luo W.H., Zheng O.X. (2006). Joint effects of microwave and chromium trioxide on root tip cells of Vicia faba. *J Zhejiang Univ Sci B.;* 7(3):221-7.

Qutob S.S., Chauhan V., Bellier P.V. *et al.* (2006). Microarray gene expression profiling of a human glioblastoma cell line exposed in vitro to a 1.9 GHz pulse-modulated radiofrequency field. *Radiat Res.;* 165(6):636-44.

Radman T., Datta A., Peterchev A.V. (2007). In vitro modulation of endogenous rhythms by AC electric fields: Syncing with clinical brain stimulation. *J Physiol.;* 584(Pt 2):369-70.

Radzievsky A.A., Gordiienko O.V., Alekseev S. *et al.* (2008). Electromagnetic millimeter wave induced hypoalgesia: frequency dependence and involvement of endogenous opioids. *Bioelectromagnetics;* 29(4):284-95

Rai R., Richardson C., Flecknell P. *et al.* (2005). Study of apoptosis and heat shock protein (HSP) expression in hepatocytes following radiofrequency ablation (RFA). *J Surg Res.;* 129(1):147-51.

Rajkovic V., Matavulj M., Johansson O. (2006). Light and electron microscopic study of the thyroid gland in rats exposed to power-frequency electromagnetic fields. *J Exp Biol.;* 209(Pt 17):3322-8.

Rasmussen N.C. (1981). The Application of probabilistic risk assessment techniques to energy technologies. *Annu Rev Energy;* 6(1):123-38.

Ravindra T., Lakshmi N.K., Ahuja Y.R. (2006). Melatonin in pathogenesis and therapy of cancer. *Indian J Med Sci.;* 60(12):523-35.

Regel S.J., Gottselig J.M., Schuderer J. *et al.* (2007a). Pulsed radio frequency radiation affects cognitive performance and the waking electroencephalogram. *Neuroreport;* 18(8):803-7.

Regel S.J., Negovetic S., Roosli M. *et al.* (2006a). UMTS base station-like exposure, well-being, and cognitive performance. *Environ Health Perspect.;* 114(8):1270-5.

Regel S.J., Tinguely G., Schuderer J. *et al.* (2007b). Pulsed radio-frequency electromagnetic fields: dose-dependent effects on sleep, the sleep EEG and cognitive performance. *J Sleep Res.;* 16(3):253-8.

Reinhardt T., Bitz A., El Ouardi A. *et al.* (2007). Exposure set-ups for in vivo experiments using radial waveguides. *Radiat Prot Dosimetry;* 124(1):21-6.

Rejt L., Mazgajski T., Kubacki R. *et al.* (2007). Influence of radar radiation on breeding biology of tits (Parus sp.). *Electromagn Biol Med.;* 26(3):235-8.

Remondini D., Nylund R., Reivinen J. *et al.* (2006). Gene expression changes in human cells after exposure to mobile phone microwaves. *Proteomics;* 6(17):4745-54.

Repacholi M.H. (1997). Radiofrequency field exposure and cancer: what do the laboratory studies suggest? *Environ Health Perspect.;* 105 Suppl 6:1565-8.

Repacholi M.H. (1998). Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics;* 19(1):1-19.

Rezk A.Y., Abdulqawi K., Mustafa R.M. *et al.* (2008). Fetal and neonatal responses following maternal exposure to mobile phones. *Saudi Med J.;* 29(2):218-23.

Riddervold I.S., Pedersen G.F., Andersen N.T. *et al.* (2008). Cognitive function and symptoms in adults and adolescents in relation to rf radiation from UMTS base stations. *Bioelectromagnetics;* 29(4):257-67.

Rip A. (1986). Controversies as Informal Technology Assessment. *Science Communication;* 8(2):349-71.

Robinette C.D., Silverman C., Jablon S. (1980). Effects upon health of occupational exposure to microwave radiation (radar). *Am J Epidemiol.*; 112(1):39-53.

Romanowicz-Makowska H., Smolarz B. (2006). [Analysis of loss of heterozygosity and microsatellite instability RAD52, RAD54 and RAD54B gene and BRCA1 gene mutation in breast cancer]. *Pol Merkur Lekarski;* 21(126):548-50.

Roosli M. (2008a). Radiofrequency electromagnetic field exposure and non-specific symptoms of ill health: a systematic review. *Environ Res.;* 107(2):277-87.

Roosli M., Frei P., Mohler E. *et al.* (2008b). Statistical analysis of personal radiofrequency electromagnetic field measurements with nondetects. *Bioelectromagnetics;* 29(6):471-8.

Röösli M, Huss A. (2008). Mobile phone base station exposure and symptoms. *Environ Health Perspect.*;116(2):A62-3; author reply A64-5.

Roosli M., Juni P., Braun-Fahrlander C. *et al.* (2006). Sleepless night, the moon is bright: longitudinal study of lunar phase and sleep. *J Sleep Res.;* 15(2):149-53.

Roosli M., Michel G., Kuehni C.E. *et al.* (2007). Cellular telephone use and time trends in brain tumour mortality in Switzerland from 1969 to 2002. *Eur J Cancer Prev.;* 16(1):77-82.

Roosli M., Moser M., Baldinini Y. *et al.* (2004). Symptoms of ill health ascribed to electromagnetic field exposure--a questionnaire survey. *Int J Hyg Environ Health;* 207(2):141-50.

Rothman K.J. (2002). Epidemiology: An introduction. Oxford: Oxford University Press. 240 p.

Roti Roti J.L., Malyapa R.S., Bisht K.S. *et al.* (2001). Neoplastic transformation in C3H 10T(1/2) cells after exposure to 835.62 MHz FDMA and 847.74 MHz CDMA radiations. *Radiat Res.;* 155(1 Pt 2):239-47.

Roushangar L., Rad J.S. (2007). Ultrastructural alterations and occurrence of apoptosis in developing follicles exposed to low frequency electromagnetic field in rat ovary. *Pak J Biol Sci.;* 10(24):4413-9.

Roux D., Vian A., Girard S. *et al.* (2008). High frequency (900 MHz) low amplitude (5 V m-1) electromagnetic field: a genuine environmental stimulus that affects transcription, translation, calcium and energy charge in tomato. *Planta;* 227(4):883-91.

Roux D., Vian A., S. G. *et al.* (2006). Electromagnetic fields (900 MHz) evoke consistent molecular responses in tomato plants. *Physiol. Plantarum;* 128:283-8.

Rubin G.J., Cleare A.J., Wessely S. (2008). Psychological factors associated with self-reported sensitivity to mobile phones. *J Psychosom Res.;* 64(1):1-9.

Rubin G.J., Das Munshi J., Wessely S. (2005). Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. *Psychosom Med.;* 67(2):224-32.

Rubin G.J., Das Munshi J., Wessely S. (2006a). A systematic review of treatments for electromagnetic hypersensitivity. *Psychother Psychosom.;* 75(1):12-8.

Rubin G.J., Hahn G., Everitt B.S. *et al.* (2006b). Are some people sensitive to mobile phone signals? Within participants double blind randomised provocation study. *BMJ;* 332(7546):886-91.

Rudiger H.W. (2009). Answer to comments by A. Lerchl on "Radiofrequency electromagnetic fields (UMTS, 1,950 MHz) induce genotoxic effects in vitro in human fibroblasts but not in lymphocytes" published by C. Schwarz et al. 2008. *Int Arch Occup Environ Health;* 82(2):279-83.

Ruediger H.W. (2009). Genotoxic effects of radiofrequency electromagnetic fields. *Pathophysiology;* 16(2):89-102.

Ruggera P.S., Witters D.M., von Maltzahn G. *et al.* (2003). In vitro assessment of tissue heating near metallic medical implants by exposure to pulsed radio frequency diathermy. Phys Med Biol.; 48(17):2919-28.

Russo R., Fox E., Cinel C. *et al.* (2006). Does acute exposure to mobile phones affect human attention? *Bioelectromagnetics;* 27(3):215-20.

Sadetzki S., Chetrit A., Jarus-Hakak A. *et al.* (2008a). Cellular phone use and risk of benign and malignant parotid gland tumors--a nationwide case-control study. *Am J Epidemiol.;* 167(4):457-67.

Sadetzki S., Oberman B., Mandelzweig L. *et al.* (2008b). Smoking and risk of parotid gland tumors: a nationwide case-control study. *Cancer;* 112(9):1974-82.

Sage C. (2005). Comment on "Reviews of the effects of RF fields on various aspects of human health" [Bioelectromagnetics Supplement 6 (2003)]. *Bioelectromagnetics;* 26(2):157-8.

Saidi F., Lautru D., Gati A. *et al.* (2008). An on-site SAR evaluation using interpolation and plane-wave decomposition. *Microw Opt Technol Lett.;* 50(6):1501-5.

Sakr A.A., Saleh A.A., Moeaty A.A. (2005). The combined effect of radiofrequency and ethanol ablation in the management of large hepatocellular carcinoma. *Eur J Radiol.;* 54(3):418-25.

Sakuma N., Komatsubara Y., Takeda H. *et al.* (2006). DNA strand breaks are not induced in human cells exposed to 2.1425 GHz band CW and W-CDMA modulated radiofrequency fields allocated to mobile radio base stations. *Bioelectromagnetics;* 27(1):51-7.

Salahaldin A.H., Bener A. (2006). Long-term and frequent cellular phone use and risk of acoustic neuroma. *Int Tinnitus J.;* 12(2):145-8.

Salford L.G., Brun A.E., Eberhardt J.L. *et al.* (2003). Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Environ Health Perspect.;* 111(7):881-3

Sanchez S., Haro E., Ruffie G. *et al.* (2007). In vitro study of the stress response of human skin cells to GSM-1800 mobile phone signals compared to UVB radiation and heat shock. *Radiat Res.;* 167(5):572-80.

Sanchez S., Masuda H., Billaudel B. *et al.* (2006a). Effect of GSM-900 and -1800 signals on the skin of hairless rats. II: 12-week chronic exposures. *Int J Radiat Biol.;* 82(9):675-80.

Sanchez S., Masuda H., Ruffie G. *et al.* (2008). Effect of GSM-900 and -1800 signals on the skin of hairless rats. III: Expression of heat shock proteins. *Int J Radiat Biol.;* 84(1):61-8.

Sanchez S., Milochau A., Ruffie G. *et al.* (2006b). Human skin cell stress response to GSM-900 mobile phone signals. In vitro study on isolated primary cells and reconstructed epidermis. *Febs J.;* 273(24):5491-507.

Sandstrom M., Lyskov E., Hornsten R. *et al.* (2003). Holter ECG monitoring in patients with perceived electrical hypersensitivity. *Int J Psychophysiol.;* 49(3):227-35.

Sannino A., Calabrese M.L., D'Ambrosio G. *et al.* (2006). Evaluation of cytotoxic and genotoxic effects in human peripheral blood leukocytes following exposure to 1950-MHz modulated signal. *IEEE transactions on plasma science;* 34(4):1441-8.

Santini R. (2001). Il faut appliquer le principe de précaution vis-à-vis des stations relais de téléphonie mobile. *Rev Prat.;* 15(531):567-9.

Santini R., Santini P., Danze J.M. *et al.* (2002). [Investigation on the health of people living near mobile telephone relay stations: I/Incidence according to distance and sex]. *Pathol. Biol. (Paris);* 50(6):369-73.

Santini R., Santini P., Danze J.M. *et al.* (2003). [Symptoms experienced by people in vicinity of base stations: II/ Incidences of age, duration of exposure, location of subjects in relation to the antennas and other electromagnetic factors]. *Pathol. Biol. (Paris);* 51(7):412-5.

Saran A., Pazzaglia S., Mancuso M. *et al.* (2007). Effects of exposure of newborn patched1 heterozygous mice to GSM, 900 MHz. *Radiat Res.;* 168(6):733-40.

Savitz D.A. (2008). Low prior + frightening implications = inflammatory epidemiology? *Epidemiology;* 19(4):534-5.

Scarfi M.R., Fresegna A.M., Villani P. *et al.* (2006). Exposure to radiofrequency radiation (900 MHz, GSM signal) does not affect micronucleus frequency and cell proliferation in human peripheral blood lymphocytes: an interlaboratory study. *Radiat Res.;* 165(6):655-63.

SCENIHR. (2009). Health Effects of Exposure to EMF. Brussels: European Commission, Health and Consumers DG. 83 p.

SCENIHR. (2007). Possible effects of Electromagnetic Fields (EMF) on Human Health. Brussels: European Commission, Health and Consumers DG. 64 p.

Schutt D.J., Haemmerich D. (2008). Sequential activation of a segmented ground pad reduces skin heating during radiofrequency tumor ablation: optimization via computational models. *IEEE Trans Biomed Eng*.; 55(7):1881-9.

Shah S.G., Farrow A. (2007). Investigation of practices and procedures in the use of therapeutic diathermy: a study from the physiotherapists' health and safety perspective. *Physiother Res Int.;* 12(4):228-41.

Shellock F.G., Crues J.V. MR procedures: biologic effects, safety and patient care. *Radiology*; 232: 635-652.

Sheppard A.R., Swicord M.L., Balzano Q. (2008). Quantitative evaluations of mechanisms of radiofrequency interactions with biological molecules and processes. *Health Phys.;* 95(4):365-96

Scherr D., Zweiker R., Kollmann A. *et al.* (2006). Mobile phone-based surveillance of cardiac patients at home. *J Telemed Telecare;* 12(5):255-61.

Schlehofer B., Schlaefer K., Blettner M. *et al.* (2007). Environmental risk factors for sporadic acoustic neuroma (Interphone Study Group, Germany). *Eur J Cancer;* 43(11):1741-7.

Schmid G., Cecil S., Goger C. *et al.* (2007). New head exposure system for use in human provocation studies with EEG recording during GS. *Bioelectromagnetics;* 28(8):636-47.

Schmid G., Sauter C., Stepansky R. *et al.* (2005). No influence on selected parameters of human visual perception of 1970 MHz UMTS-like exposure. *Bioelectromagnetics;* 26(4):243-50.

Schoemaker M.J., Swerdlow A.J. (2009). Risk of pituitary tumors in cellular phone users: a case-control study. *Epidemiology;* 20(3):348-54.

Schoemaker M.J., Swerdlow A.J., Ahlbom A. *et al.* (2005a). Mobile phone use and risk of acoustic neuroma: results of the Interphone case-control study in five North European countries. *Br. J Cancer;* 93(7):842-8.

Schoemaker M.J., Swerdlow A.J., Auvinen A. *et al.* (2007a). Medical history, cigarette smoking and risk of acoustic neuroma: an international case-control study. *Int J Cancer;* 120(1):103-10.

Schoemaker M.J., Swerdlow A.J., Hepworth S.J. *et al.* (2006). History of allergies and risk of glioma in adults. *Int J Cancer;* 119(9):2165-72.

Schoemaker M.J., Swerdlow A.J., Hepworth S.J. *et al.* (2007b). History of allergic disease and risk of meningioma. *Am J Epidemiol.;* 165(5):477-85.

Schooneveld H., Kuiper J. (2008). Electrohypersensitivity (EHS) in the Netherlands. A Questionnaire survey. Dutch Electrohypersensitivity (EHS) Foundation. 23 p.

Schreier N., Huss A., Roosli M. (2006). The prevalence of symptoms attributed to electromagnetic field exposure: a cross-sectional representative survey in Switzerland. *Soz. Praventivmed.;* 51(4):202-9.

Schrottner J., Leitgeb N. (2008). Sensitivity to electricity--temporal changes in Austria. *BMC Public Health;* 8:310.

Schrottner J., Leitgeb N., Hillert L. (2007). Investigation of electric current perception thresholds of different EHS groups. *Bioelectromagnetics;* 28(3):208-13.

Schutz H., Wiedemann P.M. (2005). How to deal with dissent among experts. Risk evaluation of EMF in a scientific dialogue. *J Risk Res.;* 8(6):531-45.

Schüz J., Ahlbom A. (2008). Exposure to electromagnetic fields and the risk of childhood leukaemia: a review. *Radiat Prot Dosimetry.*; 132(2):202-11.

Schuz J., Bohler E., Berg G. *et al.* (2006a). Cellular phones, cordless phones, and the risks of glioma and meningioma (Interphone Study Group, Germany). *Am J Epidemiol.;* 163(6):512-20.

Schuz J., Bohler E., Schlehofer B. *et al.* (2006b). Radiofrequency electromagnetic fields emitted from base stations of DECT cordless phones and the risk of glioma and meningioma (Interphone Study Group, Germany). *Radiat. Res.;* 166(1 Pt 1):116-9.

Schuz J., Jacobsen R., Olsen J.H. *et al.* (2006c). Cellular telephone use and cancer risk: update of a nationwide Danish cohort. *J Natl. Cancer Inst.;* 98(23):1707-13.

Schuz J., Waldemar G., Olsen J.H. *et al.* (2009). Risks for central nervous system diseases among mobile phone subscribers: a Danish retrospective cohort study. *PLoS ONE;* 4(2):e4389.

Schwartzbaum J., Ahlbom A., Malmer B. *et al.* (2005). Polymorphisms associated with asthma are inversely related to glioblastoma multiforme. *Cancer Res.;* 65(14):6459-65.

Schwartzbaum J.A., Ahlbom A., Lonn S. *et al.* (2007). An international case-control study of glutathione transferase and functionally related polymorphisms and risk of primary adult brain tumors. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.;* 16(3):559-65.

Schwarz C., Kratochvil E., Pilger A. *et al.* (2008). Radiofrequency electromagnetic fields (UMTS, 1,950 MHz) induce genotoxic effects in vitro in human fibroblasts but not in lymphocytes. *Int Arch Occup Environ Health;* 81(6):755-67.

Seaman R.L., Phelix C.F. (2005). Acute effects of pulsed microwaves and 3-nitropropionic acid on neuronal ultrastructure in the rat caudate-putamen. *Bioelectromagnetics;* 26(2):82-101.

Seitz H., Stinner D., Eikmann T. *et al.* (2005). Electromagnetic hypersensitivity (EHS) and subjective health complaints associated with electromagnetic fields of mobile phone communication--a literature review published between 2000 and 2004. *Sci Total Environ.;* 349(1-3):45-55.

Shafik A. (2005a). Effect of electromagnetic field exposure on spermatogenesis and sexual activity. *Asian J Androl.;* 7(1):106.

Shigemitsu T., Yamazaki K., Nakasono S. *et al.* (2007). A review of studies of the biological effects of electromagnetic fields in the intermediate frequency range. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering;* 2(4):405-12.

Shirai T., Ichihara T., Wake K. *et al.* (2007). Lack of promoting effects of chronic exposure to 1.95-GHz W-CDMA signals for IMT-2000 cellular system on development of N-ethylnitrosourea-induced central nervous system tumors in F344 rats. *Bioelectromagnetics;* 28(7):562-72.

Shirai T., Kawabe M., Ichihara T. *et al.* (2005). Chronic exposure to a 1.439 GHz electromagnetic field used for cellular phones does not promote N-ethylnitrosourea induced central nervous system tumors in F344 rats. *Bioelectromagnetics.;* 26(1):59-68.

Shrivastava D., Hanson T., Schlentz R. *et al.* (2008). Radiofrequency heating at 9.4T: in vivo temperature measurement results in swine. *Magn Reson Med.;* 59(1):73-8.

Siegrist M., Earle T.C., Gutscher H. *et al.* (2005). Perception of mobile phone and base station risks. *Risk Anal.;* 25(5):1253-64.

Sienkiewicz Z., Jones N., Bottomley A. (2005). Neurobehavioural effects of electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics;* Suppl 7:116-26.

Sievert U., Eggert S., Goltz S. *et al.* (2007). [Effects of electromagnetic fields emitted by cellular phone on auditory and vestibular labyrinth]. *Laryngorhinootologie;* 86(4):264-70.

Sievert U., Eggert S., Pau H.W. (2005). Can mobile phone emissions affect auditory functions of cochlea or brain stem? *Otolaryngol Head Neck Surg.;* 132(3):451-5.

Silny J. (2007). Demodulation in tissue, the relevant parameters and the implications for limiting exposure. *Health Phys.;* 92(6):604-8.

Simko M. (2007). Cell type specific redox status is responsible for diverse electromagnetic field effects. *Curr Med Chem.;* 14(10):1141-52.

Simko M., Hartwig C., Lantow M. *et al.* (2006). Hsp70 expression and free radical release after exposure to non-thermal radio-frequency electromagnetic fields and ultrafine particles in human Mono Mac 6 cells. *Toxicol Lett.;* 161(1):73-82.

Simunic D. (1995). Proceedings of the COST 244: Biomedical Effects of Electromagnetic Fields - Workshop on Electromagnetic Hypersensitivity. Brussels/Graz. EU/EC (DG XIII).

Sioud M. (2006). RNA interference below the immune radar. *Nat Biotechnol;* 24(5):521-2

Sirmatel O., Sert C., Sirmatel F. *et al.* (2007). Total antioxidant capacity, total oxidant status and oxidative stress index in the men exposed to 1.5 T static magnetic field. *Gen Physiol Biophys.;* 26(2):86-90.

Solenova L.G., Dymova E.G., Fir N. (2004). [General and oncologic mortality in cohort of television workers]. *Med Tr Prom Ekol*.; (5):20-4.

Slovic P. (1987). Perception of risk. *Science;* 236(4799):280-5.

Slovic P. (2007). Trust, Emotion, Sex, Politics and Science: exploring the risk assessment battlefield. Colloque "la perception et gouvernance des risques sanitaires environnementaux: enjeux et évolutions", 8 novembre 2007. Maisons-Alfort: AFSSET.

Smith G.C., Pell J.P. (2003). Parachute use to prevent death and major trauma related to gravitational challenge: systematic review of randomised controlled trials. *BMJ;* 327(7429):1459-61.

Smith P., Kuster N., Ebert S. *et al.* (2007). GSM and DCS wireless communication signals: combined chronic toxicity/carcinogenicity study in the Wistar rat. *Radiat Res.;* 168(4):480-92.

Soderqvist F., Carlberg M., Hardell L. (2008). Use of wireless telephones and self-reported health symptoms: a population-based study among Swedish adolescents aged 15-19 years. *Environ Health;* 7:18.

Soderqvist F., Carlberg M., Hardell L. (2009a). Mobile and cordless telephones, serum transthyretin and the blood-cerebrospinal fluid barrier: a cross-sectional study. *Environ Health;* 8:19.

Soderqvist F., Carlberg M., Hardell L. (2009b). Use of wireless telephones and serum S100B levels: a descriptive cross-sectional study among healthy Swedish adults aged 18-65 years. *Sci Total Environ.;* 407(2):798-805.

Soderqvist F., Carlberg M., Mild K.H. *et al.* (2009c). Exposure to a 890MHz mobile phone-like signal and serum levels of S100B and transthyretin in volunteers. *Toxicol Lett.;* 189(1):63-9.

Soderqvist F., Hardell L., Carlberg M. *et al.* (2007). Ownership and use of wireless telephones: a population-based study of Swedish children aged 7-14 years. *BMC Public Health;* 7:105.

Sommer A.M., Bitz A.K., Streckert J. *et al.* (2007). Lymphoma development in mice chronically exposed to UMTS-modulated radiofrequency electromagnetic fields. *Radiat Res.;* 168(1):72-80.

Sommer A.M., Grote K., Reinhardt T. *et al.* (2009). Effects of radiofrequency electromagnetic fields (UMTS) on reproduction and development of mice: a multi-generation study. *Radiat Res.;* 171(1):89-95.

Sorri M.J., Piiparinen P.J., Huttunen K.H. *et al.* (2006). Solutions to electromagnetic interference problems between cochlear implants and GSM phones. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.;* 14(1):101-8.

Speit G., Schutz P., Hoffmann H. (2007). Genotoxic effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF) in cultured mammalian cells are not independently reproducible. *Mutat Res.;* 626(1-2):42-7.

Spiss, B. (2003). Pilot study to portable radio radiation and health - modelling of the immission with the programs NIRView and CORLA. Thesis (diploma) at the scientific faculty of the University of Salzburg, October 2003, Salzburg, Austria.

SRPA. (2008). Recent Research on EMF and Health Risks. Fifth Annual Report from SSI's Independent Expert Group on Electromagnetic Fields. Swedish Radiation Protection Authority.

Stang A., Schmidt-Pokrzywniak A., Jockel K.H. (2005). Mobile phone use and acoustic neuromas. *Epidemiology;* 16(3):414-5.

Stang A., Schmidt-Pokrzywniak A., Lash T.L. *et al.* (2009). Mobile phone use and risk of uveal melanoma: results of the risk factors for uveal melanoma case-control study. *J Natl. Cancer Inst.;* 101(2):120-3.

Stankiewicz W., Dabrowski M.P., Kubacki R. *et al.* (2006). Immunotropic influence of 900 MHz microwave GSM signal on human blood immune cells activated in vitro. *Electromagn Biol Med.;* 25(1):45-51.

Stecco A., Saponaro A., Carriero A. (2007). Patient safety issues in magnetic resonance imaging: state of the art. *Radiol Med.;* 112(4):491-508.

Stefanics G., Kellenyi L., Molnar F. *et al.* (2007). Short GSM mobile phone exposure does not alter human auditory brainstem response. *BMC Public Health;* 7:325.

Stefanics G., Thuroczy G., Kellenyi L. *et al.* (2008). Effects of twenty-minute 3G mobile phone irradiation on event related potential components and early gamma synchronization in auditory oddball paradigm. *Neuroscience;* 157(2):453-62.

Stenberg B., Bergdahl J., Edvardsson B. *et al.* (2002). Medical and social prognosis for patients with perceived hypersensitivity to electricity and skin symptoms related to the use of visual display terminals. *Scand. J Work Environ Health;* 28(5):349-57.

Stewart B.W. (2007). "There will be no more!": the legacy of the Toowong breast cancer cluster. *Med J Aust.;* 187(3):178-80.

Stewart W.(Chairman). (1999). "The Stewart report". Mobile Phones and Health: A report from the Independent Expert Group on Mobile Phones. Chilton: IEGMP.

Stopczyk D., Gnitecki W., Buczynski A. *et al.* (2005). [Effect of electromagnetic field produced by mobile phones on the activity of superoxide dismutase (SOD-1)--in vitro researches]. *Ann Acad Med Stetin;* 51 Suppl 1:125-8.

Stovner L.J., Oftedal G., Straume A. *et al.* (2008). Nocebo as headache trigger: evidence from a sham-controlled provocation study with RF fields. *Acta Neurol Scand Suppl.;* 188:67-71.

Strahlenschutzkommission. (2009). Jahresbericht 2008 der Strahlenschutzkommission. Bonn: SSK.

Stronati L., Testa A., Moquet J. *et al.* (2006). 935 MHz cellular phone radiation. An in vitro study of genotoxicity in human lymphocytes. *Int J Radiat Biol.;* 82(5):339-46.

Sun L.X., Yao K., He J.L. *et al.* (2006a). [Effect of acute exposure to microwave from mobile phone on DNA damage and repair of cultured human lens epithelial cells in vitro]. *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi;* 24(8):465-7.

Sun L.X., Yao K., Jiang H. *et al.* (2006b). [DNA damage and repair induced by acute exposure of microwave from mobile phone on cultured human lens epithelial cells]. *Zhonghua Yan Ke Za Zhi;* 42(12):1084-8.

Sunk I.G., Trattnig S., Graninger W.B. *et al.* (2006). Impairment of chondrocyte biosynthetic activity by exposure to 3-tesla high-field magnetic resonance imaging is temporary. *Arthritis Res Ther.;* 8(4):R106.

Supélec. (2006). Etude «RLAN et champs électromagnétiques» conduite par le laboratoire d'électromagnétisme de Supélec. Etude commandée par l'Autorité de Régulation des Communications électroniques et des Postes (ARCEP).

Svedenstal B.M., Johanson K.J. (1998). Effects of exposure to 50Hz or 20kHz [corrected] magnetic fields on weights of body and some organs of CBA mice. *In Vivo*.; 12(3):293-8.

Svenson O., Patten. (2005). Mobile phones and driving: a review of contemporary research. *Cogn. Tech. Work*.; 7: 182–197

Swanson J., Kheifets L. (2006). Biophysical mechanisms: a component in the weight of evidence for health effects of power-frequency electric and magnetic fields. *Radiat Res.;* 165(4):470-8.

Swatkoski S., Gutierrez P., Wynne C. *et al.* (2008). Evaluation of microwave-accelerated residue-specific acid cleavage for proteomic applications. *J Proteome Res.;* 7(2):579-86.

Sykes P.J., McCallum B.D., Bangay M.J. *et al.* (2001). Effect of exposure to 900 MHz radiofrequency radiation on intrachromosomal recombination in pKZ1 mice. *Radiat Res.;* 156(5 Pt 1):495-502.

Sylvester P.W., Shah S.J., Haynie D.T. *et al.* (2005). Effects of ultra-wideband electromagnetic pulses on pre-neoplastic mammary epithelial cell proliferation. *Cell Prolif.;* 38(3):153-63.

Szabo I., Kappelmayer J., Alekseev S.I. *et al.* (2006). Millimeter wave induced reversible externalization of phosphatidylserine molecules in cells exposed in vitro. *Bioelectromagnetics;* 27(3):233-44.

Szmigielski S. (1996). Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation. Sci Total Environ.; 2;180(1):9-17.

Szmigielski S., Sobiczewska E., Kubacki R. 2001). Carcinogenic potency of microwave radiation: overview of the problem and results of epidemiological studies on Polish military personnel. *Eur J Oncol.;* 6(2):193-9.

Szyjkowska A., Bortkiewicz A., Szymczak W. *et al.* (2005). [Subjective symptoms related to mobile phone use--a pilot study]. *Pol Merkur Lekarski;* 19(112):529-32.

Takashima S., Chang S., Asakura T. (1985). Shape change of sickled erythrocytes induced by pulsed RF electrical fields. Proc Natl Acad Sci. USA.; 82(20):6860-4.

Takebayashi T., Akiba S., Kikuchi Y. *et al.* (2006). Mobile phone use and acoustic neuroma risk in Japan. *Occup Environ Med.;* 63(12):802-7.

Takebayashi T., Varsier N., Kikuchi Y. *et al.* (2008). Mobile phone use, exposure to radiofrequency electromagnetic field, and brain tumour: a case-control study. *Br. J Cancer;* 98(3):652-9.

Tamasidze A.G., Nikolaishvili M.I. (2007). [Effect of high-frequency EMF on public health and its neuro-chemical investigations]. *Georgian Med News;* 142):58-60.

Tachi S., Kakikawa M., Hashimoto S. *et al.* (2005). Effects on bacterial cells of exposure to very low-frequency magnetic fields. *J Magn Soc Japan*; 29: 356-359.

Tashibana S., Izumi T., Honda S. *et al.* (1998). The prevalence and pattern of insomnia in Japanese industrial workers: Relationship between psychosocial stress and type of insomnia. *Psychiatry Clin Neurosci.*; 52(4):397-402.

Tarantino P., Lanubile R., Lacalandra G. *et al.* (2005). Post-continuous whole body exposure of rabbits to 650 MHz electromagnetic fields: effects on liver, spleen, and brain. *Radiat Environ Biophys*.; 44: 51–9.

Tarone R.E., Inskip P.D. (2005). Mobile phone use and acoustic neuromas. *Epidemiology;* 16(3):414; author reply 417-8.

Terao Y., Okano T., Furubayashi T. *et al.* (2007). Effects of thirty-minute mobile phone exposure on saccades. *Clin Neurophysiol.;* 118(7):1545-56.

Terrana T. (2003). [Experimental data on radiofrequency]. *G Ital Med Lav Ergon.;* 25(3):367-8.

Thomas B.N., Flowers D., Caswell J. *et al.* (2005). Mobile phone use and acoustic neuromas. *Epidemiology;* 16(3):415-6.

Thomas S., Kuhnlein A., Heinrich S. *et al.* (2008a). Personal exposure to mobile phone frequencies and well-being in adults: a cross-sectional study based on dosimetry. *Bioelectromagnetics;* 29(6):463-70.

Thomas S., Kuhnlein A., Heinrich S. *et al.* (2008b). Exposure to mobile telecommunication networks assessed using personal dosimetry and well-being in children and adolescents: the German MobilEe-study. *Environ Health;* 7:54.

Thorlin T., Rouquette J.M., Hamnerius Y. *et al.* (2006). Exposure of cultured astroglial and microglial brain cells to 900 MHz microwave radiation. *Radiat Res.;* 166(2):409-21.

Thuroczy G., Molnar F., Janossy G. *et al.* (2008). Personal RF exposimetry in urban area. *Annals of Telecommunications;* 63(1):87-96.

Thyssen J.P., Johansen J.D., Zachariae C. *et al.* (2008). The outcome of dimethylglyoxime testing in a sample of cell phones in Denmark. *Contact Dermatitis;* 59(1):38-42.

Tillmann T., Ernst H., Ebert S. *et al.* (2007). Carcinogenicity study of GSM and DCS wireless communication signals in B6C3F1 mice. *Bioelectromagnetics;* 28(3):173-87.

Timotijevic L., Barnett J. (2006). Managing the possible health risks of mobile telecommunications: Public understandings of precautionary action and advice. *Health, Risk & Society;* 8(2):143-64.

Tiwari R., Lakshmi N.K., Surender V. *et al.* (2008). Combinative exposure effect of radio frequency signals from CDMA mobile phones and aphidicolin on DNA integrity. *Electromagn Biol Med.;* 27(4):418-25.

Tkalec M., Malaric K., Pevalek-Kozlina B. (2007). Exposure to radiofrequency radiation induces oxidative stress in duckweed Lemna minor L. *Sci Total Environ.;* 388(1-3):78-89.

Toomingas A. (1996). Provocation of the electromagnetic distress syndrome. *Scand J Work Environ Health.*;22(6):457-8.

Tornros J.E., Bolling A.K. (2006). Mobile phone use-effects of handheld and handsfree phones on driving performance. *Accid Anal Prev.;* 37(5):902-9.

Torres-Duran P.V., Ferreira-Hermosillo A., Juarez-Oropeza M.A. *et al.* (2007). Effects of whole body exposure to extremely low frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) on serum and liver lipid levels, in the rat. *Lipids Health Dis.;* 6:31.

Touitou Y., Bogdan A., Lambrozo J. *et al.* (2006). Is melatonin the hormonal missing link between magnetic field effects and human diseases? *Cancer Causes Control;* 17(4):547-52.

Tun K., Cemil B., Gurcay A.G. *et al.* (2009). Ultrastructural evaluation of pulsed radiofrequency and conventional radiofrequency lesions in rat sciatic nerve. *Surg Neurol.* [Sous presse].

Tuschl H., Novak W., Molla-Djafari H. (2006). In vitro effects of GSM modulated radiofrequency fields on human immune cells. *Bioelectromagnetics;* 27(3):188-96.

Tynes T., Andersen A. (1990). Electromagnetic fields and male breast cancer. *Lancet;* 336(8730):1596.

Uloziene I., Uloza V., Gradauskiene E. *et al.* (2005). Assessment of potential effects of the electromagnetic fields of mobile phones on hearing. *BMC Public Health;* 5:39.

Unterlechner M., Sauter C., Schmid G. *et al.* (2008). No effect of an UMTS mobile phone-like electromagnetic field of 1.97 GHz on human attention and reaction time. *Bioelectromagnetics;* 29(2):145-53.

Utteridge T.D., Gebski V., Finnie J.W. *et al.* Long-term exposure of E-mu-Pim1 transgenic mice to 898.4 MHz microwaves does not increase lymphoma incidence. *Radiat Res.*; 158(3):357-64.

Valberg P.A., van Deventer T.E., Repacholi M.H. (2007). Workgroup report: base stations and wireless networks-radiofrequency (RF) exposures and health consequences. *Environ Health Perspect.;* 115(3):416-24.

Valbonesi P., Franzellitti S., Piano A. *et al.* (2008). Evaluation of HSP70 expression and DNA damage in cells of a human trophoblast cell line exposed to 1.8 GHz amplitude-modulated radiofrequency fields. *Radiat Res.;* 169(3):270-9.

Valentini E., Curcio G., Moroni F. *et al.* (2007). Neurophysiological effects of mobile phone electromagnetic fields on humans: a comprehensive review. *Bioelectromagnetics;* 28(6):415-32.

van Boxem K., van Eerd M., Brinkhuize T. *et al.* (2008). Radiofrequency and pulsed radiofrequency treatment of chronic pain syndromes: the available evidence. *Pain Pract.;* 8(5):385-93.

van Houwelingen H.C., Arends L.R., Stijnen T. (2002). Advanced methods in meta-analysis: multivariate approach and meta-regression. *Stat Med.;* 21(4):589-624.

Vanderstraeten J., Verschaeve L. (2008). Gene and protein expression following exposure to radiofrequency fields from mobile phones. *Environ Health Perspect.;* 116(9):1131-5.

Vangelova K., Deyanov C., Israel M. (2006). Cardiovascular risk in operators under radiofrequency electromagnetic radiation. *Int J Hyg Environ Health*.; 209(2):133-8.

Vangelova K.K., Israel M.S. (2005). Variations of melatonin and stress hormones under extended shifts and radiofrequency electromagnetic radiation. *Rev Environ Health;* 20(2):151-61.

Vaughan T.E., Weaver J.C. (2005). Molecular change signal-to-noise criteria for interpreting experiments involving exposure of biological systems to weakly interacting electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics;* 26(4):305-22.

Vecchia P. (2003). Perception of Risks from Electromagnetic Fields: Lessons for the Future. *Journal of Biological Physics*; 29: 269–274

Vecchio F., Babiloni C., Ferreri F. *et al.* (2007). Mobile phone emission modulates interhemispheric functional coupling of EEG alpha rhythms. *Eur J Neurosci.;* 25(6):1908-13.

Vermeeren G., Joseph W., Olivier C. *et al.* (2008). Statistical multipath exposure of a human in a realistic electromagnetic environment. *Health Phys.;* 94(4):345-54.

Verschaeve L. (2005). Genetic effects of radiofrequency radiation (RFR). *Toxicol Appl Pharmacol.;* 207(2 Suppl):336-41.

Verschaeve L. (2009). Genetic damage in subjects exposed to radiofrequency radiation. *Mutat Res.;* 681(2-3):259-70.

Verschaeve L., Heikkinen P., Verheyen G. *et al.* (2006). Investigation of co-genotoxic effects of radiofrequency electromagnetic fields in vivo. *Radiat Res.;* 165(5):598-607.

Vian A., Faure C., Girard S. *et al.* (2007). Plants Respond to GSM-Like Radiation. *Plant Signaling & Behavior;* 2(6):522-4.

Vian A., Roux D., Girard S. *et al.* (2006). Microwave Irradiation Affects Gene Expression in Plants. *Plant Signaling & Behavior;* 1(2):67-70.

Viel J.F., Cardis E., Moissonnier M. *et al.* (2009a). Radiofrequency exposure in the French general population: band, time, location and activity variability. *Environ Int.;* 35(8):1150-4.

Viel J.F., Clerc S., Barrera C. *et al.* (2009b). Residential exposure to radiofrequency fields from mobile phone base stations, and broadcast transmitters: a population-based survey with personal meter. *Occup Environ Med.;* 66(8):550-6.

Vignal R., Crouzier D., Dabouis V. *et al.* (2009). [Effects of mobile phones and radar radiofrequencies on the eye]. *Pathol Biol.(Paris);* 57(6):503-8.

Vijayalaxmi, McNamee J.P., Scarfi M.R. (2006). Comments on: "DNA strand breaks" by Diem et al. [Mutat. Res. 583 (2005) 178-183] and Ivancsits et al. [Mutat. Res. 583 (2005) 184-188]. *Mutat Res.;* 603(1):104-6.

Vijayalaxmi, Obe G. (2004). Controversial cytogenetic observations in mammalian somatic cells exposed to radiofrequency radiation. *Radiat Res.;* 162(5):481-96.

Vijayalaxmi. (2006). Cytogenetic studies in human blood lymphocytes exposed in vitro to 2.45 GHz or 8.2 GHz radiofrequency radiation. *Radiat Res.;* 166(3):532-8.

Vijayalaxmi, Prihoda T.J. (2008). Genetic damage in mammalian somatic cells exposed to radiofrequency radiation: a meta-analysis of data from 63 publications (1990-2005). *Radiat Res.;* 169(5):561-74.

Virtanen H., Huttunen J., Toropainen A. *et al.* (2005). Interaction of mobile phones with superficial passive metallic implants. *Phys Med Biol.;* 50(11):2689-700.

Virtanen H., Keshvari J., Lappalainen R. (2006). Interaction of radio frequency electromagnetic fields and passive metallic implants--a brief review. *Bioelectromagnetics;* 27(6):431-9.

Virtanen H., Keshvari J., Lappalainen R. (2007). The effect of authentic metallic implants on the SAR distribution of the head exposed to 900, 1800 and 2450 MHz dipole near field. *Phys Med Biol.;* 52(5):1221-36.

Vogel G. (2008). Scientific misconduct. Fraud charges cast doubt on claims of DNA damage from cell phone fields. *Science;* 321(5893):1144-5.

von Winterfeldt D. , Edwards W. (1984). Patterns of Conflict About Risky Technologies. *Risk Anal.;* 4(1):55-68.

Vrijheid M., Cardis E., Armstrong B.K. *et al.* (2006a). Validation of short term recall of mobile phone use for the Interphone study. *Occup Environ Med.;* 63(4):237-43.

Vrijheid M., Deltour I., Krewski D. *et al.* (2006b). The effects of recall errors and of selection bias in epidemiologic studies of mobile phone use and cancer risk. *J Expo Sci Environ Epidemiol.;* 16(4):371-84.

Vrijheid M., Mann S., Vecchia P. *et al.* (2009a). Determinants of mobile phone output power in a multinational study: implications for exposure assessment. *Occup Environ Med.;* 66(10):664-71.

Vrijheid M., Richardson L., Armstrong B.K. *et al.* (2009b). Quantifying the impact of selection bias caused by nonparticipation in a case-control study of mobile phone use. *Ann Epidemiol.;* 19(1):33-41.

Wagner P., Roschke J., Mann K. *et al.* (2000). Human sleep EEG under the influence of pulsed radio frequency electromagnetic fields. Results from polysomnographies using submaximal high power flux densities. *Neuropsychobiology;* 42(4):207-12.

Wainwright P.R. (2007). Computational modelling of temperature rises in the eye in the near field of radiofrequency sources at 380, 900 and 1800 MHz. *Phys Med Biol.;* 52(12):3335-50.

Wainwright P.R. (2003). The relationship of temperature rise to specific absorption rate and current in the human leg for exposure to electromagnetic radiation in the high frequency band. *Phys Med Biol*.; 48(19):3143-55.

Walsh S.P. *et al.* Dialling and driving: Factors influencing intentions to use a mobile phone while driving. (2008). *Accident Analysis and Prevention;* 40: 1893–1900

Wang B.H., Lu D.Q., Jin L.F. *et al.* (2007). [Influence of 1.8 GHz microwave on DNA damage induced by ultraviolet C ray]. *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi;* 25(8):470-2.

Wang B.H., Lu D.Q., Jin L.F. *et al.* (2005). [Influence of 1.8 GHz microwave on DNA damage induced by 4 chemical mutagens]. *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi;* 23(3):163-6.

Wang J., Fujiwara O., Kodera S. *et al.* (2006a). FDTD calculation of whole-body average SAR in adult and child models for frequencies from 30 MHz to 3 GHz. *Phys Med Biol.;* 51(17):4119-27.

Wang J., Koyama S., Komatsubara Y. *et al.* (2006b). Effects of a 2450 MHz high-frequency electromagnetic field with a wide range of SARs on the induction of heat-shock proteins in A172 cells. *Bioelectromagnetics;* 27(6):479-86.

Wang J., Sakurai T., Koyama S. *et al.* (2005). Effects of 2450 MHz electromagnetic fields with a wide range of SARs on methylcholanthrene-induced transformation in C3H10T1/2 cells. *J Radiat Res. (Tokyo);* 46(3):351-61.

Wang J.L., Chan R.C., Cheng H.H. *et al.* (2007). Short waves-induced enhancement of proliferation of human chondrocytes: involvement of extracellular signal-regulated map-kinase (erk). *Clin Exp Pharmacol Physiol.;* 34(7):581-5.

Wang S., Tang J., Johnson J.A. *et al.* (2003). Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as related to Radio Frequency and Microwave Treatments. *Biosyst Eng.*; 85(2):201-212.

Wang S.Z., Wang L., Gao X.D. *et al.* (2005). [Influence of the expression of heat shock protein 70 in maxillofacial squamous cell carcinoma by thermochemotherapy]. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi;* 23(4):277-9.

Wang Y., Cao Z.J. (2006). [Radiation from mobile phone and the health]. *Wei Sheng Yan Jiu;* 35(4):520-3.

Wang Z., Lin J.C., Vaughan J.T. *et al.* (2008). Consideration of physiological response in numerical models of temperature during MRI of the human head. *J Magn Reson Imaging*; 28(5):1303-8.

Wdowiak A., Wdowiak L., Wiktor H. (2007). Evaluation of the effect of using mobile phones on male fertility. *Ann Agric Environ Med.;* 14(1):169-72.

Wertheimer N., Leeper E. (1979). Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol.;* 109(3):273-84.

Whitehead T.D., Brownstein B.H., Parry J.J. *et al.* (2005). Expression of the proto-oncogene Fos after exposure to radiofrequency radiation relevant to wireless communications. *Radiat Res.;* 164(4 Pt 1):420-30.

Whitehead T.D., Moros E.G., Brownstein B.H. *et al.* (2006a). Gene expression does not change significantly in C3H 10T(1/2) cells after exposure to 847.74 CDMA or 835.62 FDMA radiofrequency radiation. *Radiat Res.;* 165(6):626-35.

Whitehead T.D., Moros E.G., Brownstein B.H. *et al.* (2006b). The number of genes changing expression after chronic exposure to code division multiple access or frequency DMA radiofrequency radiation does not exceed the false-positive rate. *Proteomics;* 6(17):4739-44.

Wiart J., Hadjem A., Gadi N. *et al.* (2005a). Modeling of RF head exposure in children. *Bioelectromagnetics;* Suppl 7:19-30.

Wiedemann P., Clauberg M., Schutz H. (2003). Understanding amplification of complex risk issues: the risk story model applied to the EMF case. In: Pidgeon N.F., Kasperson R.E., Slovic P. *The Social Contours of Risk: Volume 1: Publics, Risk Communication and the Social Amplification of Risk*. Cambridge: Cambridge University Press.

Wiedemann P.M., Schutz H. (2005). The precautionary principle and risk perception: experimental studies in the EMF area. *Environ Health Perspect.;* 113(4):402-5.

Wiedemann P.M., Schutz H., Clauberg M. (2008). Influence of information about specific absorption rate (SAR) upon customers' purchase decisions and safety evaluation of mobile phones. *Bioelectromagnetics;* 29(2):133-44.

Wiedemann P.M., Schutz H., Sachse K. *et al.* (2006). [SAR values of mobile phones. Safety evaluation and risk perception]. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz;* 49(2):211-6.

Wieviorka M. (2008). Neuf leçons de sociologie. Paris, Editions Robert Laffont.

Wigertz A., Lonn S., Hall P. *et al.* (2008). Reproductive factors and risk of meningioma and glioma. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.;* 17(10):2663-70.

Wigertz A., Lonn S., Mathiesen T. *et al.* (2006). Risk of brain tumors associated with exposure to exogenous female sex hormones. *Am J Epidemiol.;* 164(7):629-36.

Wigertz A., Lonn S., Schwartzbaum J. *et al.* (2007). Allergic conditions and brain tumor risk. *Am J Epidemiol.;* 166(8):941-50.

Wiholm C., Lowden A., Kuster N. *et al.* (2009). Mobile phone exposure and spatial memory. *Bioelectromagnetics;* 30(1):59-65.

Wilen J., Hornsten R., Sandstrom M. *et al.* (2004). Electromagnetic Field Exposure and Health, Among RF Plastic Sealer Operators. *Bioelectromagnetics*; 25(1):5-15.

Wilen J., Johansson A., Kalezic N. *et al.* (2006). Psychophysiological tests and provocation of subjects with mobile phone related symptoms. *Bioelectromagnetics;* 27(3):204-14.

Wilen J., Sandstrom M., Hansson M.K. (2003). Subjective symptoms among mobile phone users--a consequence of absorption of radiofrequency fields? *Bioelectromagnetics;* 24(3):152-9.

Wiley M.J., Corey P., Kavet P. *et al.* (2005). The effects of continuous exposure to 20-kHz sawtooth magnetic fields on the litters of CD-1 mice. Experimental Teratology; 46(4):391-8.

Windham G.C., Fenster L., Swan S.H. *et al.* (1990). Use of video display terminals during pregnancy and the risk of spontaneous abortion, low birthweight, or intrauterine growth retardation. *Am J Ind Med.*; 18(6):675-88.

Winker R., Ivancsits S., Pilger A. *et al.* (2005). Chromosomal damage in human diploid fibroblasts by intermittent exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields. *Mutat Res.;* 585(1-2):43-9.

Wohrl S., Jandl T., Stingl G. *et al.* (2007). Mobile telephone as new source for nickel dermatitis. *Contact Dermatitis;* 56(2):113.

Wolf R., Wolf D. (2004). Increased Incidence of Cancer near a Cell-Phone Transmitter Station. Int J Cancer Prev.; 1(2). 19pp.

Wood A.W., Loughran S.P., Stough C. (2006). Does evening exposure to mobile phone radiation affect subsequent melatonin production? *Int J Radiat Biol.;* 82(2):69-76.

Wu H., Ren K., Zhao W. *et al.* (2005). Effect of electromagnetic fields on proliferation and differentiation of cultured mouse bone marrow mesenchymal stem cells. *J Huazhong Univ Sci Technolog Med Sci.;* 25(2):185-7.

Wu W., Yao K., Wang K.J. *et al.* (2008). [Blocking 1800 MHz mobile phone radiation-induced reactive oxygen species production and DNA damage in lens epithelial cells by noise magnetic fields]. *Zhejiang Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban;* 37(1):34-8.

Wynne B. (1992). Misunderstood Misunderstanding : Social Identities and Public Uptake of Science. *Public Underst Sci.;* 1(3):281-304.

Xu S., Ning W., Xu Z. *et al.* (2006). Chronic exposure to GSM 1800-MHz microwaves reduces excitatory synaptic activity in cultured hippocampal neurons. *Neurosci Lett;* 398(3):253-7

Yadav A.S., Sharma M.K. (2008). Increased frequency of micronucleated exfoliated cells among humans exposed in vivo to mobile telephone radiations. *Mutat Res.;* 650(2):175-80.

Yan J.G., Agresti M., Bruce T. *et al.* (2007). Effects of cellular phone emissions on sperm motility in rats. *Fertil Steril.;* 88(4):957-64.

Yan Z., Chen S.D., Qiao D.J. (2008). [Study on temperature & EMF co-effects on insulin conformation and biological functions by fluorescence and Raman spectroscopy]. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi;* 28(6):1343-7.

Yang L., Ge M., Guo J. *et al.* (2007a). A simulation for effects of RF electromagnetic radiation from a mobile handset on eyes model using the finite-difference time-domain method. *Conf. Proc IEEE Eng Med Biol Soc.*:5294-7.

Yang R., Peng R.Y., Gao Y.B. *et al.* (2004). [Studies on the injury effects of hippocampus induced by high power microwave radiation in rat]. *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi;* 22(3):211-4.

Yao K., Wu W., Wang K. *et al.* (2008a). Electromagnetic noise inhibits radiofrequency radiation-induced DNA damage and reactive oxygen species increase in human lens epithelial cells. *Mol Vis.;* 14(964-9.

Yao K., Wu W., Yu Y. *et al.* (2008b). Effect of superposed electromagnetic noise on DNA damage of lens epithelial cells induced by microwave radiation. *Invest Ophthalmol Vis Sci.;* 49(5):2009-15.

Yassi K., Ziane F., Bardinet E. *et al.* (2007). [Evaluation of the risk of overheating and displacement of orthodontic devices in magnetic resonance imaging]. *J Radiol.;* 88(2):263-8.

Ye L.L., Suo Y.S., Cao W.L. *et al.* (2007). [Radar radiation damages sperm quality]. *Zhonghua Nan Ke Xue;* 13(9):801-3.

Youbicier-Simo B.J., Boudard F., Cabaner C. *et al.* (1997). Biological effects of continuous exposure of embryos and young chickens to electromagnetic fields emitted by video display units. *Bioelectromagnetics;* 18(7):514-523.

Yousef J., Lars A.N. (2005). Validation of a real-time wireless telemedicine system, using bluetooth protocol and a mobile phone, for remote monitoring patient in medical practice. *Eur J Med Res.;* 10(6):254-62.

Yu C., Yao Y., Yang Y. *et al.* (2004). [Changes of rat testicular germ cell apoptosis after high power microwave radiation]. *Zhonghua Nan Ke Xue;* 10(6):407-10.

Yu D., Shen Y., Kuster N. *et al.* (2006). Effects of 900 MHz GSM wireless communication signals on DMBA-induced mammary tumors in rats. *Radiat Res.;* 165(2):174-80.

Yuan W., Lv Y., Zeng M. *et al.* (2008). Non-invasive measurement of solute permeability in cerebral microvessels of the rat. *Microvasc Res.;* 77(2):166-73.

Yurekli A.I., Ozkan M., Kalkan T. *et al.* (2006). GSM base station electromagnetic radiation and oxidative stress in rats. *Electromagn Biol Med.;* 25(3):177-88.

Zamorano M., Torres-Silva H. (2006a). FDTD chiral brain tissue model for specific absorption rate determination under radiation from mobile phones at 900 and 1800 MHz. *Phys Med Biol.;* 51(7):1661-72.

Zeng Q., Chen G., Weng Y. *et al.* (2006). Effects of global system for mobile communications 1800 MHz radiofrequency electromagnetic fields on gene and protein expression in MCF-7 cells. *Proteomics;* 6(17):4732-8.

Zeng Q.L., Weng Y., Chen G.D. *et al.* (2006). [Effects of GSM 1800 MHz radiofrequency electromagnetic fields on protein expression profile of human breast cancer cell MCF-7]. *Zhonghua Yu Fang Yi Xue Za Zhi;* 40(3):153-8.

Zeni O., Di P.R., D'Ambrosio G. *et al.* (2007a). Formation of reactive oxygen species in L929 cells after exposure to 900 MHz RF radiation with and without co-exposure to 3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(5H)-furanone. *Radiat Res.;* 167(3):306-11.

Zeni O., Gallerano G.P., Perrotta A. *et al.* (2007b). Cytogenetic observations in human peripheral blood leukocytes following in vitro exposure to THz radiation: a pilot study. *Health Phys.;* 92(4):349-57.

Zeni O., Romano M., Perrotta A. *et al.* (2005). Evaluation of genotoxic effects in human peripheral blood leukocytes following an acute in vitro exposure to 900 MHz radiofrequency fields. *Bioelectromagnetics;* 26(4):258-65.

Zeni O., Schiavoni A., Perrotta A. *et al.* (2008). Evaluation of genotoxic effects in human leukocytes after in vitro exposure to 1950 MHz UMTS radiofrequency field. *Bioelectromagnetics;* 29(3):177-84.

Zerbini A., Pilli M., Penna A. *et al.* (2006). Radiofrequency thermal ablation of hepatocellular carcinoma liver nodules can activate and enhance tumor-specific T-cell responses. *Cancer Res.;* 66(2):1139-46.

Zhadobov M., Sauleau R., Le Coq L. *et al.* (2007). Low-power millimeter wave radiations do not alter stress-sensitive gene expression of chaperone proteins. *Bioelectromagnetics;* 28(3):188-96.

Zhang J.P., Pan H.M., Fang Y. *et al.* (2006). [Impact of radiofrequency on splenocyte immunity of mice bearing H22 liver cancer]. *Ai Zheng;* 25(1):34-9.

Zhang Y., Ding J., Duan W. *et al.* (2005). Influence of pulsed electromagnetic field with different pulse duty cycles on neurite outgrowth in PC12 rat pheochromocytoma cells. B*ioelectromagnetics;* 26(5):406-11.

Zhao J.X. (2005). Numerical dosimetry for cells under millimetre-wave irradiation using Petri dish exposure set-ups. *Phys. Med Biol.;* 50(14):3405-21.

Zhao R., Zhang S., Xu Z. *et al.* (2007). Studying gene expression profile of rat neuron exposed to 1800MHz radiofrequency electromagnetic fields with cDNA microassay. *Toxicology;* 235(3):167-75.

Zhao T.Y., Zou S.P., Knapp P.E. (2007). Exposure to cell phone radiation up-regulates apoptosis genes in primary cultures of neurons and astrocytes. *Neurosci Lett.;* 412(1):34-8.

Zheng T., Blair A., Zhang Y. *et al.* (2002). Occupation and risk of non-Hodgkin's lymphoma and chronic lymphocytic leukemia. *J Occup Environ Med.;* 44(5):469-74.

Zhou X.R., Yuan H.P., Qu W. *et al.* (2008). The study of retinal ganglion cell apoptosis induced by different intensities of microwave irradiation. *Ophthalmologica;* 222(1):6-10.

Ziegelberger G., Repacholi M., McKinlay A. (2006). International commission on non-ionizing radiation protection. *Prog Biophys Mol Biol.;* 92(1):1-3.

Zmirou D., Aubineau P., Bardou A. *et al.* (2001). Les téléphones mobiles, leurs stations de base et la santé : état des connaissances et des recommandations. Rapport au Directeur Général de la Santé. Paris: Ministère de l'emploi et de la solidarité. 270 p.

Zmyslon M. (2006). [Biophysical mechanisms of electromagnetic fields interaction and health effects]. *Med Pr;* 57(1):29-39.

Zmyslony M. (2007). [Biological mechanisms and health effects of emf in view of requirements of reports on the impact of various installations on the environment]. *Med Pr.;* 58(1):27-36.

Zmyslony M., Aniołczyk H., Bortkiewicz A. (2001). [Exposure to VHF and UHF electromagnetic fields among workers employed in radio and TV broadcast centers. I. Assessment of exposure]. *Med Pr.;* 52(5):321-7.

Zook B.C., Simmens S.J. (2006). The effects of pulsed 860 MHz radiofrequency radiation on the promotion of neurogenic tumors in rats. *Radiat Res.;* 165(5):608-15.

Zotti-Martelli L., Peccatori M., Maggini V. *et al.* (2005). Individual responsiveness to induction of micronuclei in human lymphocytes after exposure in vitro to 1800-MHz microwave radiation. *Mutat Res.;* 582(1-2):42-52.

Zwamborn A.P., Vossen S.H., van Leersum B.J. *et al.* (2003). Effects of Global Communication system radio-frequency fields on Well Being and Cognitive Functions of human subjects with and without subjective complaints. The Hague: TNO Physics and Electronics Laboratory. 89 p. (FEL-03-C148).

10.2 Normes

NF X 50-110 (mai 2003) Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise. AFNOR (indice de classement X 50-110).

NF EN 45502-1 (Novembre 1998). Dispositifs médicaux implantables actifs - Partie 1 : règles générales de sécurité, marquage et informations fournies par le fabricant. AFNOR (indice de classement C74-502-1).

NF EN 50383 (Novembre 2002). Norme de base pour le calcul et la mesure des champs électromagnétiques et DAS associés à l'exposition des personnes provenant des stations de base radio et des stations terminales fixes pour les systèmes de radio télécommunications (110 MHz-40 GHz). AFNOR (Indice de classement C99-103).

NF EN ISO/CEI 17025 (Septembre 2005). Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais. AFNOR (Indice de classement X50-061).

NF EN 50400 (Septembre 2006). Norme de base pour le calcul et la mesure de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques des stations de base radio et des stations terminales fixes pour les systèmes de télécommunication sans fil (110 MHz - 40 GHz), lors de leur mise en service. AFNOR (Indice de classement C99-113).

NF EN 50401 (Septembre 2006). Norme produit pour démontrer la conformité des stations de base radio et des stations terminales fixes pour les communications sans fil par rapport aux restrictions de base ou aux niveaux de référence relatifs à l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques (110 MHz - 40 GHZ), lors de leur mise en service. AFNOR (Indice de classement C99-114).

NF EN 62209-1 (Novembre 2006). Exposition humaine aux champs radiofréquence produits par les dispositifs de communications sans fils tenus à la main ou portés près du corps – Modèles de corps humain, instrumentation et procédures – Partie 1 : détermination du débit d'absorption spécifique produit par les appareils tenus à la main et utilisés près de l'oreille (plage de fréquence de 300 MHz à 3 GHz). AFNOR (indice de classement C99-116-1).

PR EN 62209-2 (Décembre 2008). Exposition humaine aux champs radio fréquence produits par les dispositifs de communications sans fils tenus à la main ou portés près du corps - Modèles du corps humain, instrumentation et procédures - Partie 2 : procédure pour la détermination du débit d'absorption spécifique produit par les dispositifs de communications sans fils utilisés très près du corps humain (gamme de fréquence de 30 MHz à 6 GHz).AFNOR (Indice de classement C99-116-2PR).

NF EN 50492 (janvier 2009). Norme de base pour la mesure du champ électromagnétique sur site, en relation avec l'exposition du corps humain à proximité des stations de base. AFNOR (Indice de classement C99-124).

10.3 Législation et réglementation

Arrêté du 8 octobre 2003 fixant des spécifications techniques applicables aux équipements terminaux radioélectriques. (NOR: INDI0320366A. J.O.R.F. n°23 4 du 9 octobre 2003 p. 17247).

Arrêté du 8 octobre 2003 relatif à l'information des consommateurs sur les équipements terminaux radioélectriques pris en application de l'article R. 20-10 du code des postes et télécommunications. (NOR: INDI0320365A. Version consolidée au 09 octobre 2003).

Arrêté du 3 novembre 2003 modifié relatif au protocole de mesure in situ visant à vérifier pour les stations émettrices fixes le respect des limitations, en termes de niveaux de référence, de l'exposition du public aux champs électromagnétiques prévu par le décret n°200 2-775 du 3 mai 2002. (NOR: INDI0320531A. J.O.R.F. n°264 du 15 novembre 2003 p. 19442).

Arrêté du 4 août 2006 précisant les modalités de réalisation de mesures des champs électromagnétiques au titre de l'article L. 1333-21 du code de la santé publique. (NOR: SANP0623143A. J.O.R.F. n°195 du 24 a oût 2006 p.12474).

Circulaire interministérielle DGS/7D - UHC/QC/ - D4E – DIGITIP du 16 octobre 2001 relative à l'implantation des antennes relais de radiotéléphonie mobile.

Décret n°2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L. 32 du code des postes et télécommunications et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques. (NOR: INDI0220135D. Version consolidée au 5 mai 2002).

Décret n°2003-961 du 8 octobre 2003 relatif à l'évaluation de conformité des équipements terminaux de télécommunications et des équipements radioélectriques et à leurs conditions de mise en service et d'utilisation et modifiant le code des postes et télécommunications. (NOR: INDI0320367D. Version consolidée au 9 octobre 2003).

Décret n°2006-61 du 18 janvier 2006 relatif aux exigences de qualité imposées aux organismes mentionnés à l'article L. 34-9-1 du code des postes et des communications électroniques et modifiant le code des postes et des communications électroniques. (NOR: INDI0506501D. Version consolidée au 20 janvier 2006).

Directive 90/385/CEE du Conseil, du 20 juin 1990, concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux dispositifs médicaux implantables actifs. (J.O.C.E. n° L 189 du 20 juillet 1990 p. 0017 - 0036).

Directive RTTE. Directive 1999/5/CE du Parlement européen et du Conseil, du 9 mars 1999, concernant les équipements hertziens et les équipements terminaux de télécommunications et la reconnaissance mutuelle de leur conformité. (J.O.C.E. n° L 091 du 07 avril 1999 p. 0010 – 0028).

Directive 2004/40/CE du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (dix-huitième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE). (J.O.C.E. n° L 159 du 30 avril 2004).

Directive 2008/46/CE du Parlement européen et du Conseil, du 23 avril 2008 modifiant la directive 2004/40/CE concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (dix-huitième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE). (J.O.C.E. n° L 114/88 du 26 avril 2008).

Recommandation du conseil du 12 juillet 1999 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz). (J.O.C.E. n° L 199/59 du 30 juillet 1999). (1999/519/CE).

10.4 Sites Internet

OMS. Electromagnetic fields. [Site Internet]. En ligne : http://www.who.int/peh-emf/en/

ANFR. Agence nationale des fréquences. [Site Internet]. En ligne : http://www.anfr.fr/

ARCEP. Autorité de régulation des communications électroniques et des postes. [Site Internet]. En ligne : http://www.arcep.fr/

OFSP. Office federal de la santé publique, Suisse. [Site Internet]. En ligne : http://www.bag.admin.ch

ANNEXES

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

COURRIER REÇU LE
2 0 AOUT 2007

MINISTERE DE LA SANTE, DE LA JEUNESSE ET DES SPORTS

Direction générale de la santé

MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPEMENT ET DE L'AMENAGEMENT DURABLES

Direction de la prévention des pollutions et des risques

0 7 2 0 1 8

Paris le 14 AOUT 2007

Le Directeur général de la santé

Le Directeur de la prévention des pollutions et des risques

à

Madame la Directrice générale de
l'Agence Française de Sécurité Sanitaire
de l'Environnement et du Travail
253 Avenue du Général Leclerc
94701 Maisons-Alfort

Objet : mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences.

Madame la Directrice générale,

Un certain nombre d'études scientifiques et de rapports de synthèse relatifs aux effets sanitaires des radiofréquences ont été publiés depuis le rapport d'expertise intitulé « Rapport à l'AFSSE sur téléphonie mobile et santé – Edition 2004-2005 » et l'avis de l'AFSSE du 7 juin 2005.

Ainsi, conformément aux saisines qui ont été à l'origine de ces rapports, nous vous demandons de publier un document à jour des connaissances scientifiques, d'actualiser votre avis sur les effets biologiques et sanitaires de la téléphonie mobile et de l'étendre à l'ensemble du domaine des radiofréquences.

Vous porterez une importance toute particulière à l'étude des « signaux » que l'Agence avait identifiés dans son précédent avis (modification éventuelle de la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique, étude épidémiologique ayant montré une possible augmentation du risque de neurinome de l'acoustique chez les personnes ayant utilisé longtemps certains types de téléphones mobiles) ainsi qu'aux technologies en cours de déploiement ou de développement (Wifi, télévision mobile personnelle...), notamment en termes d'exposition du public. Une attention particulière sera portée à la mise en évidence d'éventuels impacts sur la santé des émetteurs et de l'utilisation de la télévision mobile personnelle.

Nous vous demandons également d'identifier avec la plus grande attention les préoccupations de la société civile et de contribuer ainsi au débat public sur ce thème.

Par ailleurs, vous examinerez et, le cas échéant, compléterez les recommandations émises par l'Ecole Supérieure d'Electricité dans son rapport intitulé « Etude RLAN et Champs électromagnétiques : synthèse des études conduites par SUPELEC». Ces recommandations pourront, si vous le jugez opportun, prendre la forme d'un document séparé qui pourra constituer un guide de bonnes pratiques d'installation ou d'utilisation de ces réseaux et équipements. Ce travail pourra utilement être étendu aux autres technologies que vous aurez identifiées comme pertinentes.

Nous vous saurions gré de bien vouloir nous faire parvenir dans les 2 mois une note d'étape sur l'organisation de vos travaux et le rapport final avant la fin de l'année 2008.

Le Directeur général de la santé

Didier HOUSSIN

Le Directeur de la prévention des pollutions et des risques

Laurent MICHEL

Copie : DGT, M. Jean-Denis COMBREXELLES

RAPPEL DES RUBRIQUES DE LA DÉCLARATION PUBLIQUE D'INTÉRÊTS

IP-A	Interventions ponctuelles : autres
IP-AC	Interventions ponctuelles : activités de conseil
IP-CC	Interventions ponctuelles : conférences, colloques, actions de formation
IP-RE	Interventions ponctuelles : rapports d'expertise
IP-SC	Interventions ponctuelles : travaux scientifiques, essais, etc.
LD	Liens durables ou permanents (Contrat de travail, rémunération régulière …)
PF	Participation financière dans le capital d'une entreprise
SR	Autres liens sans rémunération ponctuelle (Parents salariés dans des entreprises visées précédemment)
SR-A	Autres liens sans rémunération ponctuelle (Participation à conseils d'administration, scientifiques d'une firme, société ou organisme professionnel)
VB	Activités donnant lieu à un versement au budget d'un organisme

SYNTHÈSE DES DÉCLARATIONS PUBLIQUES D'INTÉRÊTS DES MEMBRES DU CES PAR RAPPORT AU CHAMP DE LA SAISINE

NOM Analyse Afsset :	Prénom ***Rubrique de la DPI*** Description de l'intérêt *en cas de lien déclaré*	Date de déclaration des intérêts
ANFOSSO-LÉDÉE	**Fabienne** Aucun lien déclaré /	13 mai 2008 23 juin 2008
BÉRENGIER	**Michel** Aucun lien déclaré /	29 avril 2008 07 mai 2008
CÉSARINI	**Jean-Pierre**	29 avril 2008 15 mai 2008 09 mars 2009

NOM Analyse Afsset :	Prénom *Rubrique de la DPI* Description de l'intérêt *en cas de lien déclaré*	Date de déclaration des intérêts
Analyse Afsset :	Aucun lien déclaré /	
COHEN Analyse Afsset :	Jean-Claude Aucun lien déclaré /	06 mai 2008 23 juin 2008
COURANT Analyse Afsset :	Daniel Aucun lien déclaré /	28 avril 2008 23 juin 2008
COUTURIER Analyse Afsset :	Frédéric Aucun lien déclaré /	29 avril 2008 15 mai 2008
DEBOUZY Analyse Afsset :	Jean-Claude Aucun lien déclaré /	29 avril 2008 06 mai 2008
DORÉ Analyse Afsset :	Jean-François Aucun lien déclaré /	29 avril 2008 11 mai 2009
EL KHATIB Analyse Afsset :	Aïcha Aucun lien déclaré /	30 avril 2008 23 juin 2008
FLAHAUT Analyse Afsset :	Emmanuel Aucun lien déclaré /	29 avril 2008 17 juillet 2008

NOM Analyse Afsset :	Prénom ***Rubrique de la DPI*** Description de l'intérêt *en cas de lien déclaré*	Date de déclaration des intérêts
GAFFET	**Éric** ***SR-A*** Conjoint ingénieur de recherche dans un laboratoire de R&D d'un opérateur de téléphonie mobile. N'a pas pris part aux délibération finales du CES	29 avril 2008 09 juin 2008 23 juin 2008 11 août 2008 06 novembre 2008
HOURS	**Martine** ***SR-A*** Présidente du Conseil scientifique de la Fondation Santé et Radiofréquences[1]. N'a pas pris part aux délibérations du CES compte tenu d'un ancien lien d'intérêt ne menant cependant pas à conflit (datant de 2002). Concernant la présidence du CS de la Fondation SR, cf. note de bas de page en fin de synthèse des DPI	29 avril 2008 30 avril 2008
JOB	**Agnès** Aucun lien déclaré /	29 avril 2008
LABEYRIE	**Antoine** Aucun lien déclaré /	25 avril 2008 28 avril 2008
LAMBERT	**Jacques** Aucun lien déclaré /	06 mai 2008
LAURIER	**Dominique** Aucun lien déclaré /	13 mai 2008

NOM Analyse Afsset :	Prénom ***Rubrique de la DPI*** Description de l'intérêt *en cas de lien déclaré*	Date de déclaration des intérêts
LE BIHAN	**Olivier** Aucun lien déclaré /	22 avril 2008 23 juin 2008 08 décembre 2008
LEPOUTRE	**Philippe** Aucun lien déclaré /	25 avril 2008 23 juin 2008
MARCHAL	**Didier** Aucun lien déclaré /	29 avril 2008 07 janvier 2009
MOCH	**Annie** Aucun lien déclaré /	29 avril 2008
PIRARD	**Philippe** Aucun lien déclaré /	15 mai 2008
PLANTON	**Serge** ***PF*** Quelques actions France Télécom. Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.	23 juin 2008 10 juillet 2008
RUMEAU	**Michel** Aucun lien déclaré /	02 mai 2008 23 juin 2008
De SÈZE	**René** ***VB***	12 juin 2008 23 juin 2008

NOM Analyse Afsset :	**Prénom** ***Rubrique de la DPI*** Description de l'intérêt *en cas de lien déclaré*	**Date de déclaration des intérêts**
	Participation à un projet de recherche « Abondement MRT » financé par Bouygues Telecom donnant lieu à versement à l'organisme d'appartenance (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques – INERIS) à hauteur de 1,25 % du budget du laboratoire (2004-2005) Participation au projet « Radioémetteurs et santé » financé par Thalès donnant lieu à versement à l'organisme d'appartenance à hauteur de 0,35 % du budget du laboratoire (2006) Projet « Wi-Fi et santé » financé par Dassault donnant lieu à versement à l'organisme d'appartenance à hauteur de 0,05 % du budget du laboratoire (mars 2008) Dosimétrie en téléphonie mobile financée par ADONIS (MRT avec partenaires privés) donnant lieu à versement à l'organisme d'appartenance à hauteur de 0,5 % du budget du laboratoire (2002-2005). N'a pas pris part aux délibérations du CES compte tenu de ses liens d'intérêts ne menant cependant pas à conflit d'intérêt (faible proportion des financements du budget du laboratoire)	
TARDIF **Analyse Afsset :**	**François** Aucun lien déclaré /	15 avril 2008 26 novembre 2008
VALLET **Analyse Afsset :**	**Michel** Aucun lien déclaré /	24 avril 2008
VECCHIA **Analyse Afsset :**	**Paolo** ***SR*** Membre du Conseil scientifique de la Fondation Santé et Radiofréquences[1]. Cf. note de bas de page en fin de synthèse des DPI	29 avril 2008 06 mai 2009

SYNTHÈSE DES DÉCLARATIONS PUBLIQUES D'INTÉRÊTS DES MEMBRES DU GT PAR RAPPORT AU CHAMP DE LA SAISINE

NOM Analyse Afsset :	Prénom ***Rubrique de la DPI*** Description de l'intérêt	Date de déclaration des intérêts
BARTHE	**Yannick** Aucun lien déclaré /	02 octobre 2008
BONIOL	**Mathieu** Aucun lien déclaré /	12 juin 2008
DEBOUZY	**Jean-Claude** (membre du CES « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements ») Aucun lien déclaré /	29 avril 2008 06 mai 2008
DORÉ	**Jean-François** (président du CES « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements ») Aucun lien déclaré /	29 avril 2008 11 mai 2009
EL KHATIB	**Aïcha** (membre du CES « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements ») Aucun lien déclaré /	30 avril 2008 23 juin 2008
GAUDAIRE	**François** Aucun lien déclaré /	17 juin 2008
MARC-VERGNES	**Jean-Pierre** ***SR*** Membre du Conseil scientifique de la Fondation Santé et Radiofréquences[1]	30 juin 2008

Analyse Afsset :	Cf. note de bas de page en fin de synthèse des DPI.	
MOCH	**Annie** (membre du CES « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements »)	29 avril 2008
	Aucun lien déclaré	
Analyse Afsset :	/	
PERRIN	**Anne**	27 juin 2008
	Aucun lien déclaré	
Analyse Afsset :	/	
POUMADÈRE	**Marc**	24 mai 2008
	Aucun lien déclaré	
Analyse Afsset :	/	
TELLE-LAMBERTON	**Maylis**	19 juin 2008
	Aucun lien déclaré	
Analyse Afsset :	/	
VECCHIA	**Paolo** (membre du CES « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements »)	29 avril 2008 06 mai 2009
	SR	
	Membre du Conseil scientifique de la Fondation Santé et Radiofréquences[1].	
Analyse Afsset :	Cf. note de bas de page en fin de synthèse des DPI	
YARDIN	**Catherine**	17 juin 2008
	Aucun lien déclaré	
Analyse Afsset :	/	

[1] Compte tenu de la séparation des collèges (Conseil d'administration et Conseil scientifique) et de la méthode de sélection des projets qu'elle soutient, la participation de certains experts au Conseil scientifique de la Fondation Santé et Radiofréquences ne constitue pas un risque de conflit d'intérêts

Annexe 3.1 : étude de Supélec

Annexe 3.2 : description des systèmes d'exposition utilisés dans les études expérimentales

Annexe 3.3 : tableaux de synthèse des publications analysées traitant des effets biologiques des radiofréquences

Annexe 3.4 : Compte-rendus des auditions et réponses aux questions écrites

Notes