

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21

Exposition aux radiofréquences et santé des enfants

**Saisine n° 2012-SA-0091 « Radiofréquences et enfants »
Saisine liée n° 2011-SA-0150**

RAPPORT d'expertise collective pré-définitif

**Comité d'experts spécialisés :
« Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements »**

Juin 2015

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19

20 **Mots clés**

21 Radiofréquences, enfants, dispositifs radioélectriques, exposition, évaluation des risques, DAS.

22

1 Présentation des intervenants

2 **PRÉAMBULE** : Les experts externes, membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de
3 travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne
4 représentent pas leur organisme d'appartenance.

5 **RAPPORTEURS**

6 Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la
7 recherche médicale (Inserm).

8 Martine HOURS – Médecin épidémiologiste, Directeur de recherche à l'Institut français des
9 sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

10 Thierry LETERTRE – Enseignant-chercheur à Supélec.

11 Frédérique MOATI – Maître de conférences en biophysique et médecine nucléaire, Université
12 Paris Sud XI / Praticien hospitalier / Radiopharmacienne / Biologiste, AP-HP Hôpital Bicêtre.

13 Mustapha NADI – Professeur des Universités ; Université de Lorraine - CNRS Institut Jean Lamour
14 -UMR 7198- Département « nanomatériaux, électronique et vivant ».

15 Fabien NDAGIJIMANA – Professeur des universités, Université Joseph Fourier, Grenoble.

16 Anne PEREIRA DE VASCONCELOS – Chargée de recherche, Institut national de la santé et de la
17 recherche médicale (Inserm), Laboratoire de neurosciences cognitives et adaptatives - UMR 7364,
18 CNRS – Université de Strasbourg.

19 Catherine YARDIN – Professeur, chef de service, médecin biologiste à l'Hôpital Dupuytren, CHU
20 de Limoges.

21

22 Le rapport d'expertise a fait l'objet de commentaires par les experts du groupe de travail
23 « radiofréquences et santé ».

24 **COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ**

25 Les travaux, objets du présent rapport, ont été suivis et adoptés par les Comités d'Experts
26 Spécialisés (CES) suivants :

27 ■ **Mandat 2011-2013**

28 **Présidente**

29 Martine HOURS – Médecin épidémiologiste, Directeur de recherche à l'Institut français des
30 sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

31 **Membres**

32 Francine BEHAR-COHEN – Ophtalmologiste praticienne, Directeur de recherche à l'Institut
33 national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

34 Jean-Marc BERTHO – Chercheur / Expert en radiobiologie au laboratoire de radiotoxicologie
35 expérimentale de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN).

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

- 1 Frédéric COUTURIER – Ingénieur, Responsable du département « Études » à l'Agence Nationale
2 des Fréquences (ANFR).
- 3 Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la
4 recherche médicale (Inserm).
- 5 Pierre DUCIMETIÈRE – Directeur de recherche honoraire à l'Institut national de la santé et de la
6 recherche médicale (Inserm).
- 7 Aïcha EL KHATIB – Chargée de mission à l'Assistance Publique des Hôpitaux de Paris - Hôpital
8 Avicenne.
- 9 Nicolas FELTIN – Responsable de mission au Laboratoire national de métrologie et d'essais
10 (LNE).
- 11 Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique
12 (CNRS).
- 13 Eric GAFFET – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).
- 14 Murielle LAFAYE – Ingénieur, Coordinatrice applications au Centre national d'études spatiales
15 (CNES).
- 16 Philippe LEPOUTRE – Ingénieur acousticien, Responsable du pôle technique de l'Autorité de
17 Contrôle des Nuisances Sonores Aéroportuaires (Acnusa).
- 18 Christophe MARTINSONS – Docteur en physique, Chef de pôle au Centre scientifique et
19 technique du bâtiment (CSTB).
- 20 Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur
21 en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'ouest (UCO).
- 22 Alain MUZET – Retraité CNRS, médecin, spécialiste du sommeil et de la vigilance.
- 23 Yves SICARD – Maître de conférences à l'Université Josef Fourier, Conseiller Scientifique au
24 Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies alternatives (CEA).
- 25 Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de
26 santé au travail Nord Picardie.
- 27 Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.
- 28 Catherine YARDIN – Professeur, chef de service, médecin biologiste à l'Hôpital Dupuytren, CHU
29 de Limoges.

30 ■ Mandat 2014-2016

31 **Présidente**

- 32 Martine HOURS – Médecin épidémiologiste, Directeur de recherche à l'Institut français des
33 sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

34 **Membres**

- 35 Laurent BEUGNET – Médecin du travail, RATP.
- 36 Alexandre BOUNOUH – Chef de projet / Ingénieur de recherche au Laboratoire national d'essais
37 (LNE).
- 38 Brigitte DEBUIRE – Professeur des universités émérite.
- 39 Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la
40 recherche médicale (Inserm).
- 41 Thierry DOUKI – Chef de laboratoire / Ingénieur docteur en chimie, Commissariat à l'énergie
42 atomique et aux énergies alternatives (CEA).

- 1 Pierre DUCIMETIÈRE – Directeur de recherche honoraire à l'Institut national de la santé et de la
2 recherche médicale (Inserm).
- 3 Nicolas FELTIN – Responsable de mission au Laboratoire national de métrologie et d'essais
4 (LNE).
- 5 Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique
6 (CNRS).
- 7 Eric GAFFET – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).
- 8 Murielle LAFAYE – Ingénieur, Coordinatrice applications au Centre national d'études spatiales
9 (Cnes).
- 10 Joël LELONG – Directeur adjoint de laboratoire / Docteur en physique, Institut français des
11 sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).
- 12 Christophe MARTINSONS – Docteur en physique, Chef de pôle au Centre scientifique et
13 technique du bâtiment (CSTB).
- 14 Frédérique MOATI – Maître de conférences en biophysique et médecine nucléaire, Université
15 Paris Sud XI / Praticien hospitalier / Radiopharmacienne / Biologiste, AP-HP Hôpital Bicêtre.
- 16 Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur
17 en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'ouest (UCO).
- 18 Fabien NDAGIJIMANA – Professeur des universités, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- 19 Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de
20 santé au travail Nord Picardie.
- 21 Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.
- 22 Catherine YARDIN – Professeur, chef de service, médecin biologiste à l'Hôpital Dupuytren, CHU
23 de Limoges.

24 PARTICIPATION ANSES

25 **Coordination scientifique**

- 26 Olivia ROTH-DELGADO – Chargée de projets scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles
27 technologies et grands aménagements – Anses.

28 **Contribution scientifique**

- 29 Johanna FITE – Chef de projets scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles technologies et
30 grands aménagements – Anses.
- 31 Olivier MERCKEL – Chef de l'unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands
32 aménagements – Anses.
- 33 Olivia ROTH-DELGADO – Chargée de projets scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles
34 technologies et grands aménagements – Anses.

35 **Secrétariat administratif**

- 36 Sophia SADDOKI – Assistante de l'unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands
37 aménagements - Anses

38 CONTRIBUTIONS EXTÉRIEURES AU(X) COLLECTIF(S)

- 39 *Étude de la dangerosité des appareils radioélectriques destinés aux enfants de moins de 6 ans :*
40 rapport d'étude, 10 juillet 2012, Laboratoire national de métrologie et d'essais.

1 *Rapport d'essais DAS – Talkie Walkie PMR 446 MHz, Emitech Le Mans, 3 décembre 2014.*

2

DOCUMENT EN CONSULTATION

1	SOMMAIRE	
2	Présentation des intervenants	3
3	Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions	11
4	Sigles et abréviations	12
5	Glossaire	12
6	Liste des tableaux	14
7	Liste des figures	15
8	1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine	18
9	1.1 Contexte.....	18
10	1.2 Objet de la saisine.....	19
11	1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre	19
12	1.3.1 Expertise collective	19
13	1.3.2 Conventions de recherche et développement	20
14	1.3.3 Revue bibliographique	20
15	1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.	20
16	1.5 Les limites du champ d'expertise	21
17	1.5.1 Bandes de fréquences considérées	21
18	1.5.2 Les appareils étudiés	21
19	1.5.3 Les populations étudiées	21
20	2 Avis des instances internationales et de l'Anses	23
21	2.1 Avis des instances internationales concernant les risques d'une exposition aux	
22	radiofréquences pour les enfants	23
23	2.1.1 Rapport Jülich (2009).....	23
24	2.1.2 Conseil de santé des Pays-Bas (2011)	23
25	2.1.3 Centre international de recherche sur le Cancer (2013)	23
26	2.1.4 Santé publique Angleterre (2012).....	23
27	2.1.5 Scenihp 2007, 2009 et 2013.....	24
28	2.1.6 Société royale du Canada (SRC, 2014)	24
29	2.1.7 Neuvième rapport du Conseil scientifique du SSM sur les champs électromagnétiques (Suède,	
30	2014)	25
31	2.1.8 Pré-rapport de l'OMS sur les effets des champs électromagnétiques radiofréquences (2014).....	25
32	2.2 Rapports Anses de 2001 à 2013	25
33	3 État des lieux de la réglementation sur les expositions aux champs	
34	électromagnétiques	26
35	3.1 Valeurs limites d'exposition : prise en compte de la spécificité des enfants	26
36	3.1.1 Travaux de l'icnirp.....	26
37	3.1.2 Avis du Conseil de santé des Pays-Bas (2011)	28
38	3.1.3 Révision du code de sécurité 6 relatif aux dispositifs émettant des rayonnements (Santé Canada	
39	– 2014)	28
40	3.2 Le cadre réglementaire européen relatif à l'exposition du public aux champs	
41	électromagnétiques	30
42	3.2.1 La recommandation 1999/519/CE du Conseil européen :	30

1	3.2.2	La directive européenne 1999/5/CE dite « R&TTE »	31
2	3.2.2.1	Principe et domaine d'application de la directive « R&TTE »	31
3	3.2.2.2	Exigences essentielles et conformité des appareils	31
4	3.2.2.3	Les recommandations de la directive	32
5	3.2.2.4	Les normes harmonisées de la directive	32
6	3.2.3	Évolutions réglementaires.....	32
7	3.3	Panorama international des dispositions prenant en compte spécifiquement les	
8		enfants	33
9	3.3.1	En France.....	33
10	3.3.1.1	La loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement, article 183 : prise en compte de l'exposition des enfants.....	33
11			
12	3.3.2	En Belgique : arrêté royal relatif à l'interdiction de mise sur le marché de téléphones mobiles spécifiquement conçus pour les jeunes enfants	34
13			
14	3.3.3	Autres dispositions nationales	34
15	3.4	Synthèse sur la réglementation et la normalisation des appareils radioélectriques	
16		pour enfants	35
17	4	Caractérisation des expositions	37
18	4.1	Identification des sources d'exposition spécifiques aux enfants.....	37
19	4.1.1	Les veille-bébés (ou <i>babyphone</i>).....	38
20	4.1.2	Les jouets radiocommandés	39
21	4.1.3	Les <i>talkies-walkies</i>	40
22	4.1.4	Les robots communicants	40
23	4.1.5	Les téléphones mobiles pour enfants	41
24	4.1.6	Les tablettes tactiles pour enfants	42
25	4.1.7	Les jouets connectés	43
26	4.1.8	Les modules anti-éloignement et applications de géolocalisation.....	43
27	4.2	Taux d'équipement en téléphone mobile et habitudes téléphoniques des enfants	
28		et adolescents	45
29	4.2.1	Taux d'équipement	45
30	4.2.2	Habitudes téléphoniques	46
31	4.2.3	Commentaires sur la méthodologie des études d'exposition	47
32	4.3	Mesures de l'exposition au champ électromagnétique émis par des appareils	
33		destinés à être utilisés par des enfants de moins de 6 ans	48
34	4.3.1	Données d'exposition issues de la littérature	48
35	4.3.1.1	Veille-bébés.....	49
36	4.3.1.2	Tablettes tactiles	50
37	4.3.1.3	Exposition aux signaux Wi-Fi dans les écoles.....	50
38	4.3.2	Caractérisation de l'exposition induite par certains dispositifs radioélectriques	51
39	4.3.2.1	Considérations sur les champs électriques mesurés	55
40	4.3.2.2	Extrapolation des champs aux distances d'utilisation.....	55
41	4.3.2.3	Détermination des valeurs de champ électrique pour les distances considérées.....	55
42	4.4	Spécificités de l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques	59
43	4.4.1	Influence des propriétés diélectriques (permittivité et conductivité)	61
44	4.4.1.1	Variations des propriétés diélectriques avec l'âge.....	62
45	4.4.1.2	Impact des variations des propriétés diélectriques sur le DAS.....	64
46	4.4.2	Influence des différences morphologiques sur l'exposition	67
47	4.4.2.1	Exposition des fœtus.....	67
48	4.4.2.2	Exposition du crâne.....	68
49	4.4.2.3	Exposition de type « corps entier »	74
50	4.4.3	Influence de la résonance sur l'exposition.....	78

1	5	Étude des effets potentiels des radiofréquences sur la santé des	
2		enfants	80
3	5.1	Méthodologie d'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires	80
4	5.1.1	Étude des effets des radiofréquences sur des modèles animaux (Figure 16)	81
5	5.1.2	Étude des effets des radiofréquences chez l'Homme (Figure 17).....	82
6	5.1.3	Évaluation globale (Figure 18).....	83
7	5.2	Rappels physiologiques sur le développement de l'enfant	86
8	5.2.1	Le développement cérébral chez l'Homme	86
9	5.2.1.1	Généralités	86
10	5.2.1.2	Les principales étapes du développement cérébral (Figure 19).....	86
11	5.2.1.3	Le développement structural	87
12	5.2.1.4	Développement de l'activité fonctionnelle cérébrale (consommation cérébrale de glucose et d'O ₂ et débit sanguin cérébral).....	90
13			
14	5.2.1.5	Corrélatifs cognitifs.....	92
15	5.2.1.6	Les techniques d'imagerie non invasive pour l'étude du développement du cerveau humain	93
16	5.2.2	Développement de la fonction de reproduction	93
17	5.2.3	Transposition des résultats obtenus sur des animaux à l'Homme	95
18	5.2.3.1	Éléments de comparaison entre le développement cérébral chez les animaux de laboratoire et chez l'Homme	95
19			
20	5.2.3.2	Éléments de comparaison entre le développement de la fonction de reproduction chez les animaux de laboratoire et chez l'Homme.....	97
21			
22	5.3	Études sur le système nerveux	99
23	5.3.1	Effets biologiques et mécanistiques	99
24	5.3.1.1	Effets sur la barrière hémato encéphalique.....	99
25	5.3.1.2	Effets sur la réponse cellulaire – le stress oxydant et la neuroinflammation	102
26	5.3.1.2.1	Études <i>in utero</i>	102
27	5.3.1.2.2	Études combinées pré- et post- natales ou postnatales seules	102
28	5.3.1.3	Effets sur la morphologie cérébrale.....	109
29	5.3.1.4	Effet sur l'activité électrique cérébrale.....	113
30	5.3.2	Effets sur les fonctions cognitives et le comportement.....	115
31	5.3.2.1	Études chez l'homme	115
32	5.3.2.1.1	Études de type expérimental.....	115
33	5.3.2.1.2	Études épidémiologiques	118
34	5.3.2.2	Études chez l'animal	126
35	5.3.2.3	Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le comportement et les fonctions cognitives.....	129
36			
37	5.3.3	Effets sur les fonctions auditives	134
38	5.3.3.1	Études chez l'Homme	134
39	5.3.3.2	Études chez l'animal	134
40	5.3.3.3	Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur les fonctions auditives.....	137
41	5.3.4	Effets sur le sommeil.....	139
42	5.3.4.1	Chez l'Homme.....	139
43	5.3.4.2	Chez l'animal.....	139
44	5.3.4.3	Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le sommeil.	141
45	5.4	Études sur le bien-être	143
46	5.4.1	Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le bien-être.....	150
47	5.5	Études sur la santé mentale	152
48	5.5.1	Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur la santé mentale	156
49	5.6	Études sur la reproduction et le développement	158
50	5.6.1	Chez l'Homme	158
51	5.6.2	Chez l'animal	158
52	5.6.2.1	Exposition <i>in utero</i>	158
53	5.6.2.2	Exposition prénatale, postnatale ou combinée pré- et post- natale.....	158

1	5.6.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur la reproduction mâle et	
2	femelle chez l'Homme et l'animal	167
3	5.7 Études sur la cancérogenèse	173
4	5.7.1 Chez l'Homme	173
5	5.7.1.1 Exposition aux tours d'émissions radio et stations de base	173
6	5.7.1.2 Exposition <i>via</i> le téléphone mobile	175
7	5.7.1.2.1 <i>Analyse des tendances temporelles</i>	175
8	5.7.1.2.2 <i>Études cas/témoins</i>	176
9	5.7.1.3 Autres expositions des enfants aux radiofréquences	177
10	5.7.2 Chez l'animal	180
11	5.7.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet cancérogène des radiofréquences	184
12	5.8 Autres effets	187
13	5.8.1 Système immunitaire	187
14	5.8.1.1 Exposition <i>in utero</i>	187
15	5.8.1.2 Exposition pré- et post- natale	187
16	5.8.1.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le système immunitaire	189
17	5.8.2 Toxicité systémique	191
18	5.8.2.1 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur la toxicité systémique	191
19	6 Bibliographie	194
20	6.1 Publications	194
21	6.2 Normes	207
22	6.3 Législation et réglementation	208
23	ANNEXES	209
24		
25	Annexe 1 : Lettre de saisine	210
26	Annexe 2 : Recommandations techniques d'allocations de fréquence	212
27	Annexe 3 : Normes EN 300 220 et EN 50371	214
28	Annexe 4 : Caractéristiques diélectriques des milieux biologiques	217
29	Annexe 5 : Comparaison des valeurs limites d'exposition	222
30		

- 1 Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions
- 2 *La synthèse d'expertise collective sera produite par le CES « agents physiques, nouvelles*
- 3 *technologies et grands aménagements » après la phase de consultation publique du rapport*
- 4 *d'expertise.*
- 5

DOCUMENT EN CONSULTATION

1 Sigles et abréviations

- 2 **2G** : voir GSM
- 3 **CEPT** : Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications.
- 4 **DAS** : Débit d'absorption spécifique (voir SAR en anglais).
- 5 **DECT** : *Digital Enhanced Cordless Telephone* (Téléphone sans-fil numérique amélioré).
- 6 **EIRP** : *Equivalent isotropically radiated power* (voir PIRE en français).
- 7 **ERP** : *Effective radiated power or equivalent radiated power* (voir PAR en français).
- 8 **Etsi** : *European Telecommunications Standards Institute* (Institut européen des normes de
- 9 télécommunication).
- 10 **FDTD** : *Finite-difference time domain* (différences finies dans le domaine temporel).
- 11 **GD** : *Gestational Day* (jour de gestation)
- 12 **GSM** (ou 2G) : *Global System for Mobile Communications* (système généralisé de communications
- 13 mobiles).
- 14 **HMP** : *hardware modified phones* (téléphones modifiés matériellement).
- 15 **ICNIRP** : *International Commission on Non Ionizing Radiation Protection* (Commission internationale
- 16 de protection contre les rayonnements non ionisants).
- 17 **OMS** : Organisation mondiale de la santé.
- 18 **PAR** : Puissance apparente rayonnée (voir ERP en anglais).
- 19 **PCM** : *Pulse Code Modulation* (modulation par impulsion de code).
- 20 **PIRE** : Puissance isotrope rayonnée équivalente (voir EIRP en anglais).
- 21 **PMR** : *Professional Mobile Radio* (radio mobile professionnelle).
- 22 **PND** : *Postnatal Day* (jour post-natal)
- 23 **R&TTE** : *Radio And Terminal Telecommunication Equipment* (équipement terminal de
- 24 télécommunication et radioélectrique).
- 25 **RFID** : *Radio Frequency Identification* (Identification radiofréquence).
- 26 **SAM** : *Specific Anthropomorphic Mannequin* (mannequin anthropomorphe spécifique).
- 27 **SAR** : *Specific Absorption Rate* (voir DAS en français).
- 28 **SRD** : *Short Range Device* (Dispositif à courte portée).
- 29 **UWB** : *Ultra Wide Band* (Ultra large bande)
- 30 **Wi-Fi** : *Wireless Fidelity*.

31 Glossaire

- 32 **Basse tension** : la Directive européenne 2006/95/CE, dite « Basse tension », concerne le
- 33 rapprochement des législations des États membres relatives au matériel électrique destiné à être
- 34 employé dans certaines limites de tension.
- 35 **CEPT** : la Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications est une
- 36 entité de coordination entre les organismes des postes et de télécommunications de 48 états
- 37 européens. Elle a été à l'origine de la création de l'ETSI en 1988, qui a depuis assuré les fonctions
- 38 de normalisation.
- 39 **DAS** : le Débit d'absorption spécifique représente le débit d'absorption spécifique par unité de
- 40 masse de tissu biologique, il est exprimé en Watts par kg (W/kg). Le DAS (n g) correspond au
- 41 débit d'absorption spécifique évalué sur n grammes de tissus contigus.

- 1 **Émissions ou perturbations** : signaux dont la propagation est de nature à nuire au bon
2 fonctionnement des équipements ou à la santé des êtres vivants situés au voisinage.
- 3 **Etsi** (*European telecommunications standards institute*) : l'Institut européen des normes de
4 télécommunication est l'organisme de normalisation européen du domaine des
5 télécommunications. Celui-ci travaille en coopération avec le CEN et le Cenelec qui sont les
6 instances européennes représentées à l'ISO et à la CEI.
- 7 **FDTD** : *Finite-difference time domain* – différences finies dans le domaine temporel. Technique de
8 simulation numérique utilisée pour la résolution des équations de Maxwell et la propagation des
9 ondes électromagnétiques notamment.
- 10 **GSM** (2G) : *Global System for Mobile Communications*, norme numérique pour la téléphonie
11 mobile de deuxième génération.
- 12 **HMP** (*Hardware Modified Phone*) : Les téléphones HMP sont des téléphones modifiés
13 matériellement pour pouvoir accéder à des paramètres de configuration spécifiques aux études
14 d'exposition.
- 15 **Icnirp** (*International Commission on Non Ionizing Radiation Protection*) : l'Icnirp (ou Commission
16 internationale de protection contre les rayonnements non ionisants) est un organisme indépendant
17 (organisation non gouvernementale) reconnu par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) créé
18 en 1977 pour examiner les problèmes relatifs aux rayonnements non ionisants. L'Icnirp a formulé,
19 dans des lignes directrices, des valeurs limites d'exposition pour différentes parties du spectre
20 électromagnétique, reprises par différentes réglementations internationales et nationales.
- 21 **PAR** : La puissance apparente rayonnée (PAR) est une mesure théorique de l'énergie transportée
22 par les ondes radioélectriques émises par une antenne, exprimée en décibels. La PAR est estimée
23 en référence à une émission produite par une antenne dipôle idéale, contrairement à la PIRE qui
24 est estimée en référence à une antenne isotrope idéale. Il est communément admis que
25 $PAR = PIRE + 2,15 \text{ dB}$, du fait de l'écart de gain entre l'antenne dipôle idéale et l'antenne isotrope
26 idéale.
- 27 **PIRE** : La puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) correspond à la puissance émettrice
28 d'un appareil électrique sans fil mesurée en sortie d'antenne (prise en compte du facteur de
29 l'antenne).
- 30 **Puissance crête** : Puissance instantanée maximale.
- 31 **RFID** (*Radio Frequency Identification*) : système généralement composé d'une borne
32 d'interrogation et d'étiquettes constituées d'une puce électronique contenant des données
33 associée à une antenne. Cette technologie peut être utilisée pour identifier des objets, des
34 animaux ou des personnes (étiquettes pour applications logistiques, passeports, contrôles d'accès,
35 cartes de transports urbains, cartes de paiement, etc.).
- 36 **R&TTE** : directive européenne 1999/5/CE concernant les équipements hertziens et les
37 équipements terminaux de télécommunications et la reconnaissance mutuelle de leur conformité,
38 dite directive R&TTE (*Radio And Terminal Telecommunication Equipment*).
- 39 **SA** : absorption spécifique d'énergie c'est-à-dire énergie absorbée par unité de masse de tissu
40 biologique, exprimée en joules par kg (J/kg).
- 41 **SAM** (*Specific Anthropomorphic Mannequin*) : mannequin anthropomorphique spécifique, utilisé
42 notamment pour les tests de conformité aux valeurs limites d'exposition aux ondes
43 électromagnétiques émises par des téléphones mobiles.
- 44 **SRD** : un dispositif à courte portée (SRD) est un appareil radiofréquence utilisé dans les
45 télécommunications pour la transmission d'information à très courte distance. Les SRD ont une
46 puissance d'émission inférieure à 100 mW.
- 47 **Wi-Fi** : Protocole de communication sans fil régi par les normes du groupe IEEE 802.11x
48 fonctionnant généralement autour de 2,4 et 5,6 GHz.

1 Liste des tableaux

2	Tableau 1 : Évolution des niveaux de référence proposés par Santé Canada _____	29
3	Tableau 2 : Fréquences et puissances d'émission des dispositifs veille-bébé _____	39
4	Tableau 3 : Données relatives au taux d'équipement des enfants et adolescents en téléphone mobile ____	46
5	Tableau 4 : Caractéristiques physiques des veille-bébés Vivanco BM 800 et Vivanco BM 900 _____	49
6	Tableau 5 : Résultats des mesures de DAS pour différentes tablettes 3G _____	50
7	Tableau 6 : Liste et descriptif des appareils sélectionnés pour la campagne de mesures _____	52
8	Tableau 7 : Mesure du champ électrique émis par des dispositifs radioélectriques destinés aux enfants, à 3	
9	mètres et 1 mètre de distance _____	54
10	Tableau 8 : Valeurs de champs électriques d'appareils radioélectriques destinés aux enfants _____	56
11	Tableau 9 : Études investiguant les propriétés diélectriques des tissus et les conséquences de leurs	
12	variations sur le DAS _____	66
13	Tableau 10 : Études investiguant l'impact de la morphologie des enfants sur DAS dans la tête _____	72
14	Tableau 11 : Études investiguant l'impact de la morphologie des enfants sur DAS « corps entier » _____	77
15	Tableau 12 : Corrélation entre l'âge des rats et de l'Homme en fonction des différentes phases de la vie	
16	d'après (Quinn 2005, Sengupta 2013) _____	95
17	Tableau 13 : Études investiguant l'altération de la barrière hémato encéphalique. Ce tableau présente une	
18	synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses	
19	_____	101
20	Tableau 14 : Études investiguant les effets sur la réponse cellulaire et le stress oxydant chez l'animal. Ce	
21	<i>tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur</i>	
22	<i>interprétation par l'Anses</i> _____	106
23	Tableau 15 : Études investiguant les effets sur la morphologie cérébrale. Ce tableau présente une synthèse	
24	des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses _____	112
25	Tableau 16 : Études de provocation sur des enfants investiguant les effets d'une exposition aiguë aux RF sur	
26	le tracé électroencéphalographique. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de	
27	l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses _____	114
28	Tableau 17 : Études de provocation sur des enfants investiguant les effets d'une exposition aiguë aux RF.	
29	<i>Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur</i>	
30	<i>interprétation par l'Anses</i> _____	117
31	Tableau 18 : Études épidémiologiques sur le développement psychomoteur, les troubles du comportement	
32	et les troubles mentaux. <i>Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne</i>	
33	<i>reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses</i> _____	123
34	Tableau 19 : Études de l'effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives et le comportement chez	
35	l'animal. <i>Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats des études et ne reflète en aucun</i>	
36	<i>cas leur interprétation par l'Anses</i> _____	128
37	Tableau 20 : Étude investiguant les effets sur la fonction auditive chez l'Homme. Ce tableau présente une	
38	synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses	
39	_____	136
40	Tableau 21 : Études investiguant les effets sur la fonction auditive chez l'animal. Ce tableau présente une	
41	synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses	
42	_____	136
43	Tableau 22 : Études investiguant les effets des radiofréquences sur le sommeil chez l'animal. Ce tableau	
44	présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation	
45	par l'Anses _____	140
46	Tableau 23 : Études investiguant les effets sur le bien-être chez l'Homme. Ce tableau présente une synthèse	
47	des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses _____	147
48	Tableau 24 : Études épidémiologiques descriptives transversales sur la relation entre l'usage «	
49	problématique » du téléphone mobile et la santé mentale chez les enfants ou adolescents. <i>Ce tableau</i>	
50	<i>présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation</i>	
51	<i>par l'Anses</i> _____	155

1	Tableau 25 : Études investiguant les effets sur la fertilité et le système reproducteur. Ce tableau présente	
2	une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par	
3	l'Anses _____	163
4	Tableau 26 : Études portant sur l'association entre exposition aux radiofréquences et cancers. Ce tableau	
5	présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation	
6	par l'Anses _____	178
7	Tableau 27 : Études investiguant les effets cancérigènes chez l'animal. Ce tableau présente une synthèse	
8	des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses _____	182
9	Tableau 28 : Études investiguant les effets sur le système immunitaire. Ce tableau présente une synthèse	
10	des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses _____	188
11	Tableau 29 : Études investiguant la toxicité systémique. Ce tableau présente une synthèse des principaux	
12	résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses _____	193
13	Tableau 30 : Puissances maximales autorisées par fréquence _____	212
14	Tableau 31 : Puissances maximum autorisées spécifiquement pour le modélisme _____	213
15	Tableau 32 : Puissances maximales autorisées pour le Wi-Fi _____	213
16	Tableau 33 : comparaison des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques _____	222

17 Liste des figures

18	Figure 1 : le spectre des ondes électromagnétiques _____	21
19	Figure 2 : niveaux de référence pour des champs électriques variables dans le temps préconisés par l'Icnirp	
20	(Source : Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des	
21	maladies professionnelles (INRS) 2001), traduction de l'icnirp (1998)). _____	27
22	Figure 3 : niveaux de référence pour l'exposition aux champs électriques variables dans le temps (Icnirp,	
23	2010) _____	27
24	Figure 4 : Pays intégrant des limitations volontaires ou des informations sur l'usage des téléphones mobiles	
25	par les enfants _____	35
26	Figure 5 : Types de produits radioélectriques à destination des enfants de moins de 6 ans existants sur le	
27	marché français, en nombre et pourcentage du marché (LNE, 2012) _____	37
28	Figure 6 : Voiture radiocommandée _____	40
29	Figure 7 : Lapin Karotz _____	41
30	Figure 8 : Téléphones MO1 (à gauche) et BabyM (à droite) _____	41
31	Figure 9 : téléphones mobiles pour enfants _____	42
32	Figure 10 : Fonctionnement d'un module anti-éloignement _____	43
33	Figure 11 : Installation de l'équipement en chambre anéchoïque _____	53
34	Figure 12 : La famille virtuelle : Duke, Ella, Billie, Thelonious (Christ <i>et al.</i> 2007) _____	61
35	Figure 13 : Propriétés diélectriques des tissus de la peau et du cerveau en fonction de la fréquence _____	62
36	Figure 14 : Permittivité relative des tissus en fonction de l'âge de l'enfant et de la fréquence d'émission _____	63
37	Figure 15 : Résonance en fonction de la fréquence et de l'âge (Wiat <i>et al.</i> 2011) _____	78
38	Figure 16 : Logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études sur	
39	les modèles animaux _____	81
40	Figure 17 : Logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études	
41	épidémiologiques _____	82
42	Figure 18 : Évaluation du niveau de preuve pour un effet donné en fonction des éléments de preuve en	
43	faveur de l'existence d'un effet _____	84
44	Figure 19 : Décours temporel des événements majeurs du développement cérébral. Image de Giedd (1999)	
45	dans la revue de Tau and Peterson 2010 _____	87
46	Figure 20 : Maturation régionale de l'épaisseur du cortex : Âge 4 -21 ans. Vues du dessus et vues latérales	
47	de la maturation de la matière grise sur la surface corticale. La barre de légende à droite montre une	
48	représentation en couleur des unités de volume de matière grise (Lenroot & Giedd 2006) _____	88

1	Figure 21 : (A) <i>Volume</i> de matière grise dans le cortex préfrontal et densité synaptique en fonction de l'âge.	
2	Matière grise : losanges. Densité synaptique : carrés. (B) Volume de matière blanche corticale en	
3	fonction de l'âge. Illustration des changements de volume moyen absolus en matière blanche corticale	
4	sur des périodes de ± 2.5 ans en abscisse. (C) Volume de matière grise vs densité synaptique.	
5	Données de A. Valeur de régression $r = 0.95$ (Bennet 2011).	89
6	Figure 22 : Myélinisation au cours du développement.	90
7	Figure 23 : Décours temporel des variations de LCMRglc au cours du développement humain.	91
8	Figure 24 : Glucose _{mmr%} et croissance corporelle exprimés en score SD afin de permettre la comparaison.	91
9	Figure 25 : Métabolisme cérébral au cours de la vie normalisé par rapport aux valeurs moyennes de l'adulte	
10	et montrant, au début de l'enfance, l'augmentation d'un facteur 2 environ de la consommation	
11	cérébrale de glucose (bleu), d'un facteur 1,5 pour la consommation cérébrale en O ₂ (rouge) et d'un	
12	facteur 2,0 pour le débit sanguin cérébral (orange) (Goyal <i>et al</i> 2014).	92
13	Figure 26 : Méthodes d'IRM couramment utilisées pour l'étude du développement cérébral chez l'Homme.	93
14	Figure 27 : Développement cérébral chez le rat et l'Homme (graphe modifié à partir d'Alling (1985))	97
15	Figure 28 : Diagramme représentant les principales périodes du développement du tractus génital mâle chez	
16	l'humain et le rat en relation avec la production de testostérone.	98
17	Figure 29 : Comparaison des périodes de différenciation ovarienne chez différents mammifères (jpc : jours	
18	post conception)	98
19	Figure 30 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au comportement dans les études cliniques et	
20	épidémiologiques	130
21	Figure 31 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au comportement dans les études sur les modèles	
22	animaux	130
23	Figure 32 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le comportement chez l'enfant.	131
24	Figure 33 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions cognitives dans les études cliniques et	
25	épidémiologiques	132
26	Figure 34 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions cognitives dans les études sur les	
27	modèles animaux	133
28	Figure 35 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives chez l'enfant	133
29	Figure 36 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions auditives dans les études	
30	épidémiologiques	137
31	Figure 37 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions auditives dans les études sur les	
32	modèles animaux	138
33	Figure 38 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur les fonctions auditives chez l'enfant	138
34	Figure 39 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au sommeil dans les études épidémiologiques	141
35	Figure 40 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au sommeil dans les études sur les modèles animaux	
36		142
37	Figure 41 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le sommeil chez l'enfant	142
38	Figure 42 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au bien-être dans les études épidémiologiques	151
39	Figure 43 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au bien-être dans les études sur les modèles animaux	
40		151
41	Figure 44 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le bien-être chez l'enfant	152
42	Figure 45 : Évaluation des éléments de preuve relatifs à la santé mentale dans les études épidémiologiques	
43		156
44	Figure 46 : Évaluation des éléments de preuve relatifs à la santé mentale dans les études sur les modèles	
45	animaux	157
46	Figure 47 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur la santé mentale chez l'enfant	157
47	Figure 48 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets tératogènes dans les études	
48	épidémiologiques	167
49	Figure 49 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets tératogènes dans les études sur les	
50	modèles animaux	168

1	Figure 50 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur la tératogénicité et le développement chez	
2	enfant	168
3	Figure 51 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur femelle dans les études	
4	épidémiologiques	169
5	Figure 52 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur femelle dans les études sur	
6	les modèles animaux	170
7	Figure 53 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le système reproducteur femelle chez	
8	l'enfant	170
9	Figure 54 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur mâle dans les études	
10	épidémiologiques	171
11	Figure 55 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur mâle dans les études sur	
12	les modèles animaux	172
13	Figure 56 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le système reproducteur mâle chez l'enfant	
14		172
15	Figure 57 : Taux de gliomes standardisés sur l'âge et le sexe parmi les enfants et adolescents suédois âgés	
16	de 5 à 19 ans entre 1990 et 2008 (d'après Aydin <i>et al.</i> , 2011a).	175
17	Figure 58 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets cancérigènes dans les études	
18	épidémiologiques	185
19	Figure 59 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets cancérigènes dans les études sur les	
20	modèles animaux	186
21	Figure 60 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur la cancérogénèse chez l'enfant	186
22	Figure 61 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au système immunitaire dans les études	
23	épidémiologiques	189
24	Figure 62 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au système immunitaire dans les études sur les	
25	modèles animaux	190
26	Figure 63 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le système immunitaire chez l'enfant	190
27	Figure 64 : Évaluation des éléments de preuve relatifs à la toxicité systémique dans les études	
28	épidémiologiques	191
29	Figure 65 : Évaluation des éléments de preuve relatifs à la toxicité systémique dans les études sur les	
30	modèles animaux	192
31	Figure 66 : Évaluation globale de l'effet systémique des radiofréquences chez l'enfant	192
32		

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte

Les radiofréquences constituent un objet de préoccupations sanitaires et environnementales depuis plusieurs années en France et à l'étranger, ce qui a conduit l'Agence¹, en réponse aux demandes de ses ministères de tutelle, à publier des avis et rapports d'expertise collective en 2003, 2005 et 2009, et le dernier en date en 2013.

En 2009, dans son rapport sur les risques éventuels liés à l'exposition aux radiofréquences, l'Agence précisait que la caractérisation de l'exposition des enfants aux radiofréquences et les effets sanitaires éventuels pour cette population restaient méconnus :

« 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. 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 » (Afsset, 2009).

En 2013, l'Agence insistait à nouveau sur la nécessité de surveiller les effets possibles des radiofréquences chez les enfants (Anses, 2013).

Les enfants, par l'usage précoce qu'ils peuvent avoir des dispositifs radioélectriques, la longue durée de leur exposition qui en résultera une fois adultes, ainsi qu'en raison de leurs spécificités anatomiques et physiologiques (taille, poids, sensibilité des organes et fonctions physiologiques en développement) doivent donc être considérés comme une population particulièrement sensible vis-à-vis de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences.

Or, il existe de nombreux appareils radioélectriques à destination des enfants. Ceux-ci peuvent être à usage récréatif, tels que les jouets radiocommandés ou *talkies-walkies*, ou à usage sécuritaire, tels que les veille-bébé. Ces appareils doivent être conformes à la directive 1999/5/CE (dite « R&TTE ») et à la directive 2006/95/CE (dite « basse tension ») pour être placés sur le marché européen. Ils comportent ainsi nécessairement, s'ils sont distribués en France, un marquage « CE »². Ils sont alors supposés être conformes aux exigences essentielles en matière de santé et de sécurité. Par conséquent, les États membres de l'Union européenne ne peuvent à ce jour interdire, restreindre, ou entraver la libre circulation de ces produits dès lors qu'ils sont conformes aux prescriptions réglementaires, à moins de justifier de leur dangerosité.

¹ L'Afsset (Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail) et l'Afssa (Agence française de sécurité sanitaire de l'alimentation) ont fusionné le 1^{er} juillet 2010 pour créer l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses).

² La déclaration CE de conformité est établie par le fabricant ou son mandataire installé dans l'Union européenne. Par ce document, le fabricant atteste que son produit est conforme aux exigences essentielles de santé et de sécurité prévues par la ou les directives applicables au produit. Il s'agit d'un document par lequel le fabricant engage sa responsabilité. Elle permet une bonne traçabilité du produit. La déclaration comprend généralement des informations sur l'identification du fabricant, la description de l'appareil, l'identification du signataire *etc.* Le cas échéant, une attestation délivrée par un organisme notifié accompagne cette attestation.

1 Or, l'article L.5231-4³ du code de la santé publique prévoit la possibilité d'interdire, par arrêté du
2 ministre chargé de la santé, la mise sur le marché d'appareils radioélectriques à destination des
3 enfants :

4 « La distribution à titre onéreux ou gratuit d'objets contenant un équipement radioélectrique
5 dont l'usage est spécifiquement dédié aux enfants de moins de six ans peut être interdite
6 par arrêté du ministre chargé de la santé, afin de limiter l'exposition excessive des
7 enfants. »

8 La question de savoir si les directives « R&TTE » et « basse tension » sont suffisamment
9 protectrices en matière de santé et de sécurité vis-à-vis des enfants doit ainsi être examinée afin
10 de juger d'une application éventuelle de la disposition du code de la santé publique citée ci-
11 dessus. Si les équipements radioélectriques à destination des enfants s'avéraient présenter un
12 danger pour eux, une application de l'article L.5231-4 serait alors rendue nécessaire.

13 1.2 Objet de la saisine

14 La Direction générale de la santé (DGS), la Direction générale de la prévention des risques
15 (DGPR) et la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des
16 fraudes (DGCCRF) ont saisi l'Anses le 12 juillet 2011 afin d'identifier les risques sanitaires
17 potentiels liés à l'utilisation d'appareils radioélectriques par ou à proximité des enfants, et justifier
18 ainsi, le cas échéant, le retrait du marché des équipements en question.

19 Les objectifs de cette expertise sont multiples :

- 20 • réaliser un inventaire, le plus complet possible, des différents produits radioélectriques à
21 destination des enfants de moins de six ans (jouets, objets communicants ou de
22 surveillance) ;
- 23 • fournir un état des lieux des réglementations en vigueur et des textes normatifs applicables
24 concernant l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques émis par les
25 dispositifs radioélectriques ;
- 26 • analyser les publications scientifiques relatives à l'influence du champ électromagnétique
27 sur les personnes, et plus spécifiquement sur les enfants ;
- 28 • caractériser l'exposition des enfants à certains dispositifs radioélectriques ;
- 29 • évaluer si possible les risques sanitaires potentiels pour les enfants liés à leur exposition
30 aux champs électromagnétiques radiofréquences émis par des dispositifs radioélectriques
31 qui leur sont destinés.

32 1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre

33 1.3.1 Expertise collective

34 L'Anses a confié au Comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles
35 technologies et grands aménagements » l'instruction de cette saisine.

36 Des experts rapporteurs, membres du groupe de travail « Radiofréquences et santé » et du CES
37 « Agents physiques » ont été mandatés pour apporter leur contribution à ce travail d'expertise
38 collective. Les déclarations publiques d'intérêts (DPI) des experts ont été analysées préalablement
39 à leur nomination et tout au long de l'expertise.

40 Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects
41 méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit tient compte des observations et éléments
42 complémentaires transmis par les membres du CES.

³ L'article L.5231-4³ du code de la santé publique a été créé par l'article 183 de la loi Grenelle II du 12 juillet 2010.

1 Les travaux d'expertise concernant l'évaluation du risque lié à l'exposition des enfants aux
2 radiofréquences s'appuient sur les analyses formulées par le groupe de travail « Radiofréquences
3 et santé » à l'occasion de son travail sur la mise à jour des connaissances concernant les effets
4 sanitaires des radiofréquences, publié le 15 octobre 2013. Les experts rapporteurs ont utilisé ce
5 matériau pour réaliser, dans la mesure du possible, une évaluation des risques sanitaires
6 potentiels pour les enfants liés à leur exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences.
7 Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences
8 complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en
9 expertise ».

10 1.3.2 Conventions de recherche et développement

11 Pour contribuer à la réalisation de cette saisine, une « convention de recherche et
12 développement » (CRD) a été signée avec le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).
13 La demande formulée auprès du LNE visait à établir :

- 14 • la réalisation d'un inventaire, le plus complet possible, des différents produits
15 radioélectriques à destination des enfants de moins de six ans (jouets, objets
16 communicants ou de surveillance) ;
- 17 • un état des lieux des réglementations en vigueur et des textes normatifs applicables
18 concernant l'exposition des enfants aux champs émis par les dispositifs radioélectriques ;
- 19 • recueillir et analyser des publications scientifiques relatives à l'influence du champ
20 électromagnétique sur les personnes, et plus spécifiquement sur les enfants ;
- 21 • la caractérisation de l'exposition des enfants à certains dispositifs radioélectriques.

22 Par ailleurs, la mesure du débit d'absorption spécifique (DAS) dans des configurations d'usage
23 particulières d'un *talkie-walkie* de type PMR 446 MHz a été sollicitée auprès du laboratoire de
24 mesures Emitech Le Mans.

25 1.3.3 Revue bibliographique

26 La période de recherche bibliographique s'étend du 1^{er} janvier 2005 au 31 décembre 2013. Les
27 éléments ainsi collectés ont été évalués à la lumière des précédentes publications répertoriées
28 dans le rapport de l'Agence sur les radiofréquences publié en octobre 2013.

29 Une recherche bibliographique a été menée afin d'identifier les études portant sur les effets des
30 rayonnements électromagnétiques sur le corps humain, en ciblant l'exposition des enfants de
31 moins de 6 ans, en particulier par des jouets émettant des champs électromagnétiques (par
32 exemple voitures télécommandées et *talkie-walkies* utilisant des fréquences de 27 MHz et
33 40 MHz), et pour des appareils de radiocommunication dédiés aux enfants émettant aux
34 fréquences des principaux protocoles de communication sans-fil (GSM, DECT, Wi-Fi, c'est à dire
35 la bande de fréquences allant de 800 MHz à 2,5 GHz).

36 Dans la mesure où la plupart des articles publiés s'intéressent aux expositions à des signaux GSM
37 ou UMTS caractéristiques de la téléphonie mobile, le rapport s'appuie essentiellement sur des
38 données liées à l'exposition à la téléphonie mobile.

39 En outre, la plupart des articles répertoriés considèrent l'exposition d'enfants susceptibles d'utiliser
40 un téléphone mobile (> 7 ans). Étant donné qu'il n'existe pas d'autres données scientifiques
41 publiées disponibles sur les expositions des enfants aux champs électromagnétiques, celles-ci ont
42 été prises en compte pour étudier les effets d'une exposition aux radiofréquences sur le
43 développement du cerveau chez l'enfant plus jeune.

44 1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.

45 L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts ayant participé à la rédaction du
46 présent rapport avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de
47 conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

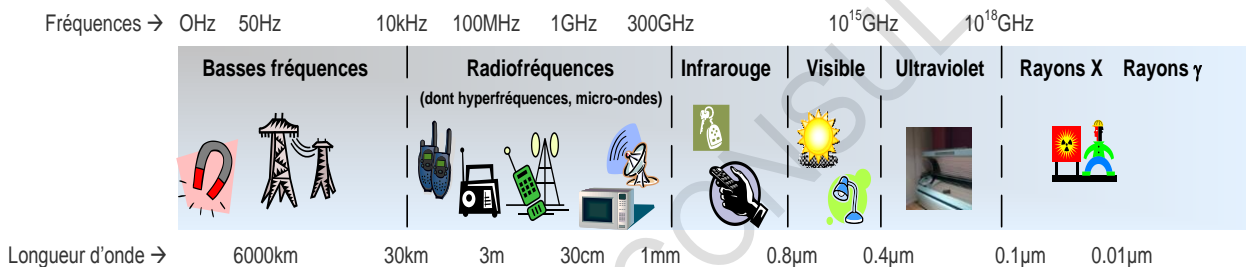
- 1 Un expert du CES qui présentait un lien d'intérêt susceptible de mener à un conflit n'a été invité à
 2 participer aux réunions au cours desquelles le rapport a été examiné.
 3 Les déclarations d'intérêts des experts concernés sont rendues publiques *via* le site internet de
 4 l'Anses (www.anses.fr).

5 1.5 Les limites du champ d'expertise

6 1.5.1 Bandes de fréquences considérées

7 Les radiofréquences font partie des champs électromagnétiques non ionisants (dont les
 8 fréquences se situent entre 0 et 300 GHz), au même titre que les champs statiques, les champs
 9 basses fréquences, les rayonnements infrarouges ou la lumière visible.

10 Les champs électromagnétiques radiofréquences (ou fréquences radio) sont ceux dont la
 11 fréquence est comprise entre une dizaine de kiloHertz (kHz) et quelques centaines de gigaHertz
 12 (GHz) (*cf.* Figure 1) (soit des longueurs d'onde de l'ordre du kilomètre à un millimètre). Les
 13 microondes ne concernent qu'une partie de ces rayonnements, entre quelques dizaines de
 14 mégaHertz (MHz) et quelques centaines de gigaHertz (limite de l'infrarouge). On parle aussi
 15 d'hyperfréquences dans ce cas.



16 Figure 1 : le spectre des ondes électromagnétiques

17 La limite basse de 8,3 kHz, précédemment 9 kHz pour les « radiofréquences », est issue de la
 18 classification de l'Union internationale des télécommunications, article 5, section 4 (UIT 2012).

19 Pour la limite haute des radiofréquences, il est d'usage de considérer la valeur de 300 GHz, limite
 20 de l'infrarouge (3 000 GHz selon l'UIT, les bandes de fréquences au-delà de 275 GHz étant sans
 21 attribution de service à ce jour).

23 1.5.2 Les appareils étudiés

24 Les appareils destinés aux enfants peuvent être définis comme ceux rendus visuellement
 25 attrayants pour les enfants, ou ceux dont le constructeur spécifie qu'ils sont destinés à être utilisés
 26 par les enfants.

27 Les appareils étudiés sont les dispositifs radioélectriques à destination des enfants et mettant en
 28 œuvre des radiofréquences. Il s'agit notamment de dispositifs « veille-bébé » (ou *babyphone*),
 29 jouets radiocommandés, *talkies-walkies*, robots communicants, téléphones mobiles pour enfants,
 30 tablettes tactiles ou encore modules anti-éloignement.

31 1.5.3 Les populations étudiées

32 Les enfants, par l'usage précoce qu'ils peuvent avoir des dispositifs radioélectriques, la longue
 33 durée de leur exposition qui en résultera une fois adultes, ainsi qu'en raison de leurs spécificités
 34 anatomiques et physiologiques (taille, poids, sensibilité des organes et fonctions physiologiques en
 35 développement) doivent être considérés comme une population particulièrement sensible vis-à-vis
 36 de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences. L'exposition des personnes aux
 37 champs électromagnétiques est en effet influencée par la taille des structures exposées (corps,
 38 membres, organes), à travers des phénomènes de résonance en fonction des fréquences mises
 39 en jeu, mais aussi en fonction des caractéristiques anatomiques du corps qui changent avec l'âge.
 40 Les rapports de proportionnalité entre la tête et le corps, ou encore l'épaisseur de l'oreille, sont

1 modifiés au cours du développement. L'absorption de l'énergie électromagnétique dépend par
2 ailleurs fortement des caractéristiques diélectriques des tissus, il convient donc d'étudier avec soin
3 l'évolution de ces paramètres avec l'âge.

4 Dans l'objectif d'appréhender toutes les phases de la croissance des enfants, et pour pallier le
5 faible nombre d'études concernant les très jeunes, le présent rapport s'est intéressé à l'exposition
6 des enfants tout au long du développement, de l'exposition fœtale (*in utero*) à celle du jeune
7 adulte. Dans le cas où aucune publication n'était disponible chez l'enfant de moins de 6 ans, des
8 données chez l'adolescent, par exemple, ont pu permettre d'approcher l'effet étudié et le cas
9 échéant d'extrapoler les résultats observés à l'enfant plus jeune.

10

1 **2 Avis des instances internationales et de l'Anses**

2 **2.1 Avis des instances internationales concernant les risques d'une** 3 **exposition aux radiofréquences pour les enfants**

4 **2.1.1 Rapport Jülich (2009)**

5 Les experts sollicités par l'institut de recherche allemand Jülich⁴ ont estimé, dans un rapport publié
6 en 2009, que le niveau de preuve était insuffisant pour conclure à une augmentation du débit
7 d'absorption spécifique⁵ (DAS) dans la tête des enfants par rapport aux adultes. En revanche,
8 pour une exposition corps entier, ils considèrent que les niveaux recommandés par l'Icnirp ne sont
9 pas protecteurs pour les enfants de moins de 8 ans et pour les petits adultes de taille inférieure à
10 1,30 m, à des fréquences d'environ 1 GHz (Wiedemann 2009).

11 **2.1.2 Conseil de santé des Pays-Bas (2011)**

12 Le rapport du Conseil de santé des Pays-Bas (*Health Council of the Netherlands*) publié en 2011
13 conclut que l'exposition due à l'utilisation du téléphone mobile et à la présence d'antennes pour les
14 télécommunications ou au Wi-Fi n'entraîne pas une augmentation du risque d'effets sanitaires
15 néfastes chez les enfants à court terme (Health Council of the Netherlands 2011). Cependant, les
16 auteurs reconnaissent que les connaissances sont limitées dans un certain nombre de domaines
17 et que les données disponibles sont contradictoires.

18 **2.1.3 Centre international de recherche sur le Cancer (2013)**

19 Dans sa monographie publiée en 2013 sur les effets des champs électromagnétiques
20 radiofréquences, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) conclut, sur la base des
21 résultats publiés par Christ *et al.* (2010), que le téléphone mobile étant plus près du cerveau des
22 enfants que du cerveau des adultes (os plus fin, *etc.*), l'exposition moyenne à un téléphone mobile,
23 pour une utilisation similaire, est augmentée d'un facteur 2 pour le cerveau et de plus d'un facteur
24 10 pour la moelle osseuse. De plus, les propriétés diélectriques de certains tissus tels que la
25 moelle osseuse et l'os varient en fonction de l'âge. La conductivité de ces 2 tissus est plus élevée
26 chez les enfants que chez les adultes, et l'énergie reçue après une exposition à une source
27 radiofréquences est donc plus élevée.

28 Les études écologiques dans lesquelles la distance a été prise comme une estimation de
29 l'exposition montrent une augmentation des leucémies de l'enfant avec la proximité des sources
30 d'exposition. Cependant, les études dans lesquelles l'exposition a été évaluée de manière plus
31 précise (telles que des mesures de champs ou de la modélisation) ne montrent pas
32 d'augmentation du risque. Par conséquent, les experts du CIRC ne peuvent pas conclure quant au
33 risque de leucémie ou de lymphome liés à l'exposition environnementale aux RF.

34 **2.1.4 Santé publique Angleterre (2012)**

35 D'après l'agence sanitaire anglaise (*Health Protection Agency* devenue *Public Health England* en
36 2013) dans un rapport récent (HPA, 2012), les études épidémiologiques ne fournissent pas
37 d'éléments suffisamment solides pour conclure que l'exposition aux radiofréquences peut affecter
38 les fonctions cognitives de l'enfant. L'augmentation des capacités de concentration qui a été
39 constatée dans certaines études viendrait de l'habitude à utiliser le téléphone dans des endroits
40 bruyants. De même, l'utilisation du téléphone encouragerait les utilisateurs à privilégier la vitesse à

⁴ L'institut allemand Jülich conduit des recherches dans les domaines de l'énergie, de l'environnement, de la santé et des technologies de l'information. http://www.fz-juelich.de/portal/DE/Home/home_node.html.

⁵ Cf. glossaire pour la définition du DAS et la section 3.3 pour l'équation reliant le DAS au champ électrique.

1 la précision dans certaines tâches, en raison de la fonction de l'écriture inductive des téléphones
2 qui corrige les erreurs mineures.

3 Les études existantes sur les effets cognitifs et neurophysiologiques chez les enfants ne
4 supportent pas l'hypothèse d'une susceptibilité accrue des enfants aux radiofréquences par
5 rapport aux adultes. Cependant, ces études sont peu nombreuses, et la plupart présentent des
6 effectifs réduits. Aucune preuve de bonne qualité n'est disponible pour dresser des conclusions sur
7 le rôle d'une exposition à long terme aux radiofréquences dans la survenue de troubles du
8 comportement. Les informations concernant les tumeurs infantiles sont trop parcellaires pour
9 conclure. Les éléments de preuve de bonne qualité ne sont pas assez nombreux pour conclure de
10 manière robuste sur l'évaluation des effets potentiels des radiofréquences sur la santé des
11 enfants.

12 **2.1.5 Scenihr 2007, 2009 et 2013**

13 Dans son rapport de 2007, le Comité scientifique européen des risques sanitaires émergents et
14 nouvellement identifiés (Scenihr) considérait qu'une attention particulière devait être accordée à
15 l'exposition des enfants au téléphone mobile. Bien qu'aucune preuve spécifique n'existe, les
16 enfants et les adolescents pourraient s'avérer plus sensibles aux expositions aux radiofréquences
17 que les adultes en raison de leur développement. De plus, les enfants d'aujourd'hui pourraient
18 également cumuler une exposition beaucoup plus élevée que les générations précédentes,
19 compte tenu de la durée d'exposition qui s'étendra toute leur vie (Scenihr, 2007).

20 Dans son rapport de 2009, le Scenihr signale que les dernières études sur l'association entre les
21 champs radiofréquences et les cancers de l'enfant ne fournissaient pas de preuves en faveur
22 d'une telle association. Les études récentes n'ont pas montré d'effets des radiofréquences sur la
23 reproduction et le développement. Aucune donnée n'est apparue indiquant un quelconque effet
24 des radiofréquences sur la santé humaine. Du point de vue de l'évaluation des risques, il est
25 important de reconnaître que les informations sur les effets possibles causés par les champs
26 radiofréquences chez les enfants sont limitées (Scenihr, 2009).

27 En février 2014, le Scenihr a mis en consultation publique la mise à jour de son rapport de 2009
28 sur les effets sanitaires potentiels d'une exposition aux champs électromagnétiques. Les experts
29 concluent que les études épidémiologiques sur le développement de l'enfant et sur les troubles du
30 comportement ne fournissent que des éléments de preuve assez faibles, à cause des résultats
31 contradictoires et des limites méthodologiques. Les effets d'une exposition *via* la mère par
32 l'utilisation d'un téléphone mobile pendant la grossesse n'est pas jugée plausible par les experts, à
33 cause du faible niveau de champs évalué au niveau du fœtus. Concernant les effets cancérogènes,
34 les experts concluent que l'association entre augmentation du risque de cancers infantiles et
35 l'exposition aux radiofréquences reste floue. Ils recommandent de plus amples études sur
36 l'apparition de tumeurs cérébrales associée à l'utilisation du téléphone mobile (Scenihr, 2013). LE
37 rapport du Scenihr tenant compte des commentaires reçus lors de la consultation publique a été
38 publié en mars 2015.

39 **2.1.6 Société royale du Canada (SRC, 2014)**

40 Concernant le cancer, les experts sollicités par la Société royale du Canada (SRC) concluent
41 qu'une association causale entre le cancer et l'exposition aux radiofréquences est possible, selon
42 la définition du CIRC, mais que les preuves actuelles sont peu convaincantes. En effet, les
43 résultats des études épidémiologiques manquent de cohérence et rapportent des associations
44 faibles. Les études sur les modèles animaux ne sont pas cohérentes entre elles non plus. Les
45 études *in vitro* ne sont pas parvenues à dégager des explications méthodologiques en faveur d'un
46 potentiel cancérogène.

47 Concernant le développement cérébral, les experts de la SRC concluent à l'absence de données
48 probantes « *permettant de conclure que l'exposition pré- ou post-natale du cerveau en
49 développement à de l'énergie RF entraîne des séquelles cognitives ou neurologiques* ». Les
50 experts estiment toutefois ce domaine d'étude hautement prioritaire et recommandent la réalisation
51 d'études expérimentales sur des animaux de laboratoire.

1 Concernant les effets sur le système reproducteur, les experts concluent que l'exposition aux
2 radiofréquences à des niveaux inférieurs à ceux établis dans les lignes directrices du code de
3 sécurité 6 (2013) (cf. paragraphe 3.1.3) n'a pas d'effet négatif sur les appareils et les fonctions de
4 reproduction, mais recommandent que des études soient menées sur quelques points précis.

5 **2.1.7 Neuvième rapport du Conseil scientifique du SSM sur les champs** 6 **électromagnétiques (Suède, 2014)**

7 Le rapport de l'autorité de sécurité suédoise sur les rayonnements (*stralsakerhetsmyndigheten* –
8 SSM) consiste à discuter et évaluer les nouvelles données sur les champs électromagnétiques et
9 de les confronter aux informations déjà disponibles. Les études publiées jusqu'à septembre 2013
10 inclus ont été prises en compte (SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields 2014).

11 Les experts du SMM concluent que les études animales apportent des informations trop
12 parcellaires sur les effets possibles d'une exposition aux radiofréquences sur le stress oxydant et
13 les fonctions cérébrales, incluant le comportement. Les effets génotoxiques, hormonaux, sur la
14 fertilité mâle et femelle et sur la reproduction sont issues généralement d'études uniques qui
15 méritent d'être répliquées avec un protocole expérimental sérieux.

16 Concernant les études épidémiologiques, les experts concluent que les études disponibles
17 présentent trop de limites méthodologiques pour être exploitables.

18 **2.1.8 Pré-rapport de l'OMS sur les effets des champs électromagnétiques** 19 **radiofréquences (2014)**

20 L'OMS réalise une évaluation des risques sanitaires des champs électromagnétiques
21 radiofréquences, en vue de publier une monographie qui actualisera celle de 1993 (*Environmental*
22 *health criteria*)⁶.

23 Les chapitres portant sur l'analyse des articles scientifiques ont été mis en consultation publique
24 du 30 septembre au 15 décembre 2014. La période de recherche bibliographique s'arrête à la fin
25 décembre 2012, mais une mise à jour a été réalisée avant la publication. Les chapitres sur
26 l'évaluation du risque sanitaire et les recommandations n'étaient pas disponibles lors de la
27 consultation publique.

28 **2.2 Rapports Anses de 2001 à 2013**

29 Ni les études *in vivo*, ni les données épidémiologiques n'ont permis de conclure sur la dangerosité
30 des radiofréquences, ni chez l'adulte ni chez l'enfant. Cependant, comme le souligne l'Anses dans
31 ses derniers rapports sur le sujet (depuis « Téléphonie mobile et santé » de 2003 jusqu'à
32 « Radiofréquences et santé » de 2013), certains domaines tels que l'influence de l'âge et de la
33 durée d'exposition ne sont pas assez explorés. Dès 2005, l'Agence soulignait le manque de
34 données et les nombreuses incertitudes qui demeurent (Afsse, 2005). En 2013, les experts
35 soulignaient la nécessité de surveiller les effets possibles des radiofréquences dans des
36 populations potentiellement plus fragiles (enfants, femmes enceintes...) (Agence nationale de
37 sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) 2013).

38

⁶ http://www.who.int/peh-emf/research/rf_ehc_page/en/.

3 État des lieux de la réglementation sur les expositions aux champs électromagnétiques

Le rapport de l'Agence sur les effets sanitaires des radiofréquences publié en octobre 2013 (Anses, 2013) décrit les différentes réglementations relatives à l'exposition aux champs électromagnétiques. Les paragraphes ci-dessous s'attachent à identifier notamment les éléments qui concernent plus spécifiquement les enfants. D'une manière générale, il faut néanmoins remarquer que les réglementations, recommandations et normes européennes n'intègrent pas de considérations spécifiques à l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques, pour des raisons exposées ci-dessous. En revanche, un certain nombre de dispositions nationales prévoient des mesures spécifiques concernant l'usage par les enfants de dispositifs radioélectriques, comme les téléphones mobiles.

3.1 Valeurs limites d'exposition : prise en compte de la spécificité des enfants

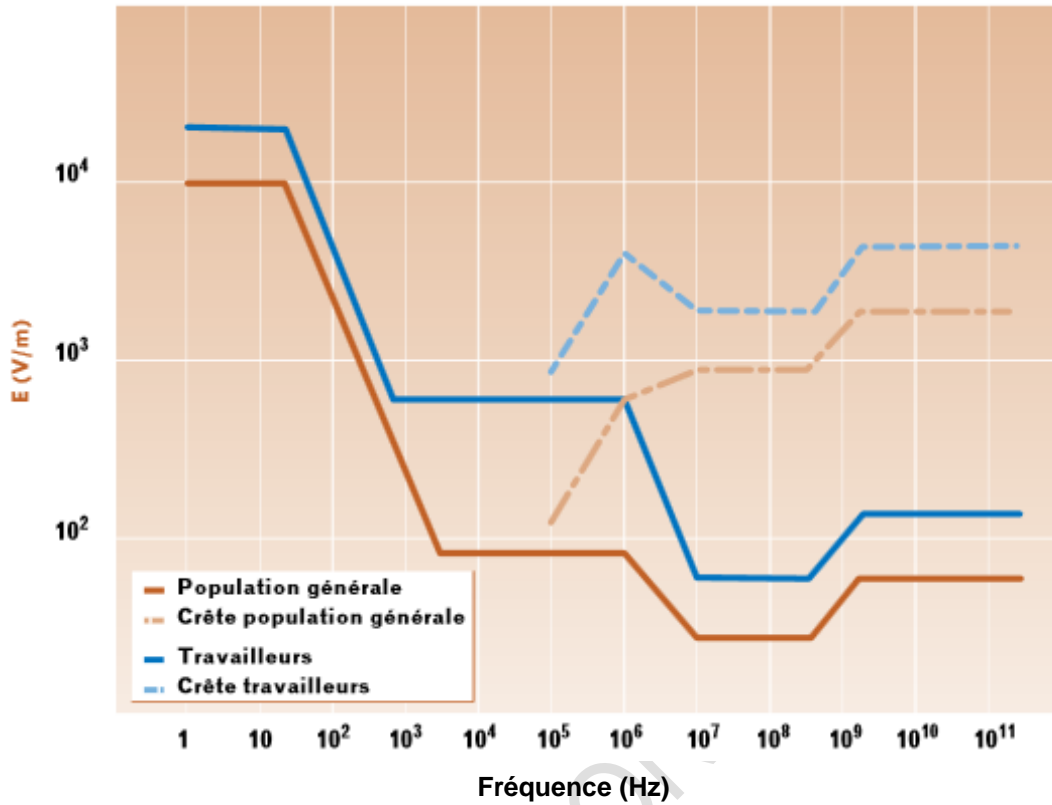
La réglementation française, tout comme celle de nombreux autres pays, est basée sur les travaux et les valeurs limites d'exposition fixées par l'Icnirp⁷ (*International Commission on Non Ionizing Radiation Protection*), elles-mêmes reprises dans la recommandation européenne 1999/519/CE.

3.1.1 Travaux de l'Icnirp

À partir des études scientifiques disponibles, l'Icnirp a défini en 1998 des valeurs limites d'exposition de référence pour les fréquences allant de 0 Hz (statique) jusqu'à 300 GHz. Des valeurs limites sont ainsi données par exemple pour l'exposition au champ électrique (Figure 2) et au champ d'induction magnétique. Ces « niveaux de référence » ont été dérivés des « restrictions de base », valeurs limites d'exposition destinées à protéger les personnes des effets connus des radiofréquences. En fonction des fréquences, différents effets peuvent être associés à l'exposition aiguë au champ électromagnétique : excitation de terminaisons nerveuses par exemple dans la partie basse des radiofréquences, jusqu'à 10 MHz, et effet thermique à partir de 100 kHz. L'interaction entre les champs électromagnétiques et le corps humain est dépendante de la fréquence des rayonnements, ce qui explique l'allure des courbes de la Figure 2. Les courbes en traits pleins correspondent aux valeurs limites d'exposition moyennée dans le temps pour les professionnels et la population générale (facteur de sécurité supplémentaire de 5), les courbes en pointillés aux valeurs de champ électrique instantanées (crêtes). On trouvera une analyse plus détaillée de ces valeurs limites dans le chapitre 6 du rapport de l'Agence sur les radiofréquences publié en 2009 (Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) 2009). L'Icnirp a revu ses valeurs limites pour la gamme [1 – 100 kHz] en 2010, adoptant de nouvelles grandeurs d'intérêt pour caractériser les interactions avec le vivant (champs électriques internes par exemple), et modifiant en particulier les niveaux de référence (cf. Figure 3)

⁷ Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants.

1



2

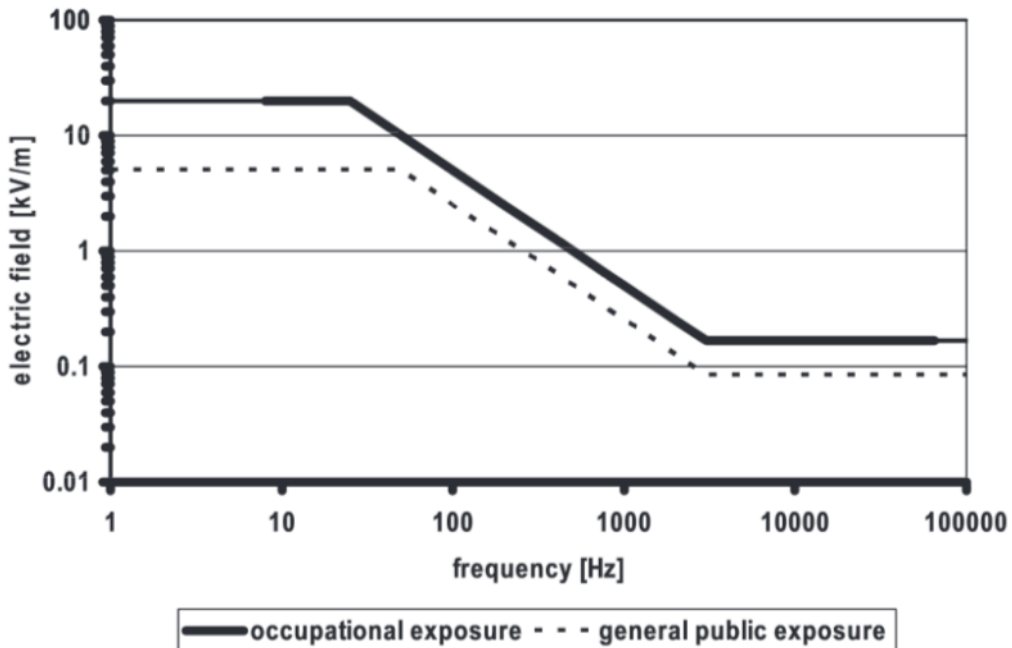
3

4

5

6

Figure 2 : niveaux de référence pour des champs électriques variables dans le temps préconisés par l'Icnirp (Source : Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS) 2001), traduction de Icnirp (1998)⁸.



7

8

9

Figure 3 : niveaux de référence pour l'exposition aux champs électriques variables dans le temps (Icnirp, 2010)⁹

⁸ Health Physics, April 1998, Volume 74, Number 4.

⁹ Health Physics, December 2010, Volume 99, Number 6.

1

2 Ces valeurs limites d'exposition sont différentes pour les travailleurs et pour la population générale,
3 elles intègrent en effet des coefficients de sécurité différents appliqués aux valeurs à partir
4 desquelles des effets sanitaires sont observés chez l'animal. L'application d'un coefficient de
5 sécurité supplémentaire pour la population générale par rapport à la population professionnelle est
6 en particulier justifiée selon l'Icnirp en raison des plus grandes variabilités individuelles présentes
7 dans la population générale. Les éléments suivants ont été pris en compte par l'Icnirp pour établir
8 les coefficients de sécurité appliqués :

- 9 • effets de l'exposition aux champs électromagnétiques dans des conditions
10 environnementales pénibles (températures élevées, etc.) et/ou en cas d'effort intense ;
- 11 • la sensibilité thermique potentiellement plus élevée dans certains groupes de la population,
12 comme les personnes fragiles et/ou âgées, les nourrissons et les jeunes enfants, les
13 personnes qui souffrent de maladies ou qui prennent des médicaments perturbant la
14 tolérance à la chaleur.

15 Les autres paramètres suivants ont été pris en compte pour définir les niveaux de référence pour
16 les champs radiofréquences :

- 17 • les différences dans l'absorption d'énergie électromagnétique par des personnes de taille
18 variable et d'orientations différentes par rapport au champ incident ;
- 19 • la réflexion, la concentration et la diffusion du champ incident, qui peut occasionner
20 localement une absorption accrue de l'énergie électromagnétique radiofréquence.

21 Le détail des éléments concernant les enfants qui ont conduit à adapter les facteurs de sécurité
22 n'est en revanche pas explicité par la publication de l'Icnirp, qui ne cite par ailleurs que peu de
23 travaux orientés spécifiquement en direction des enfants, travaux cependant peu nombreux en
24 1998.

25 En 2009, l'Icnirp a publié une mise au point sur ses lignes directrices (Icnirp, 2009) concernant
26 l'exposition aux champs électromagnétiques, dans laquelle la commission indique que des études
27 ont montré que le DAS induit par des expositions aux niveaux de référence recommandés pourrait
28 être 40 % plus élevé que la restriction de base actuelle, dans certaines conditions de pire cas, à
29 des fréquences proches de la résonance du corps (100 MHz) et entre 1 et 4 GHz pour des
30 personnes de taille inférieure à 1,3 m (correspondant approximativement à des enfants de moins
31 de 8 ans). L'Icnirp estime cependant que cette augmentation du DAS est négligeable (5 %) si elle
32 est comparée au facteur de réduction de 50 pris en compte pour établir les valeurs limites
33 d'exposition pour le public. L'Icnirp n'a donc pas proposé de réviser ses valeurs limites
34 d'exposition.

35 **3.1.2 Avis du Conseil de santé des Pays-Bas (2011)**

36 Le Conseil de santé des Pays-Bas a rendu en 2011 un avis argumenté sur l'influence des signaux
37 de télécommunications radiofréquences sur le cerveau des enfants (HCN, 2011). Le comité sur les
38 champs électromagnétiques a ainsi conclu qu'il n'y avait pas de raison de recommander des
39 valeurs limites d'exposition différentes pour les enfants. Il a considéré que les facteurs de sécurité
40 intégrés dans ces limites prennent en compte la plus grande sensibilité potentielle des enfants.
41 Cependant, il reconnaît que les niveaux de référence pour les fréquences autour de 2 GHz doivent
42 être ajustés, de nouvelles données scientifiques ayant montré que leur construction à partir du
43 DAS n'est plus correcte. Le Conseil considère également que cette diminution des niveaux de
44 référence n'a pas de conséquence pratique, dans la mesure où il n'existe pas aux Pays-Bas de
45 zones publiques où les niveaux de champs sont supérieurs aux nouveaux niveaux de référence.

46 **3.1.3 Révision du code de sécurité 6 relatif aux dispositifs émettant des** 47 **rayonnements (Santé Canada – 2014)**

48 Le code de sécurité 6 (CS6), rédigé par le Bureau de la protection contre les rayonnements des
49 produits cliniques et de consommation de Santé Canada propose des valeurs limites d'exposition
50 aux champs électromagnétiques. La révision proposée en 2014 remplace la version de 2009. La

1 bande de fréquences considérée est celle des radiofréquences, définie par Santé Canada comme
 2 la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz. Ces lignes directrices, qui s'appliquent aussi bien
 3 aux professionnels qu'au grand public, peuvent être adoptées par les provinces, l'industrie ou
 4 d'autres parties prenantes. Santé Canada précise que « bien que le fondement biologique des
 5 restrictions de base spécifiées dans le présent code de sécurité [...] n'ait pas changé depuis la
 6 version antérieure (2009), les niveaux de référence ont été mis à jour, soit pour prendre en compte
 7 les améliorations avancées des dernières années en dosimétrie soit, lorsque possible, pour les
 8 harmoniser avec ceux de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non
 9 ionisants. »

10 Pour les fréquences de 65 à 100 MHz, les niveaux de référence proposés dans le CS6 (2013)
 11 diffèrent de ceux de l'Icnirp (1998), diminuant en fonction de l'augmentation de la fréquence pour
 12 tenir compte des données dosimétriques provenant des études sur les enfants, prévoyant ainsi
 13 une plus grande protection.

14 Dans le rapport du groupe d'experts de la Société royale du Canada rendu au printemps 2014¹⁰,
 15 qui a servi de base à la révision des valeurs limites du code de sécurité 6 par Santé Canada,
 16 l'argumentation suivante est développée :

17 « Dans la gamme de fréquences de 100 kHz à 6 GHz, des études récentes de dosimétrie fondées
 18 sur le DAS démontrent que les niveaux de référence du CS6 (2013) ne donnent pas toujours une
 19 protection suffisante contre le dépassement des restrictions de base du CS6 (2013). Un certain
 20 nombre d'études faisant autorité qui ont utilisé des modèles de corps humain d'adultes et d'enfants
 21 anatomiquement réalistes, dans des conditions d'exposition avec mise à la terre et avec isolation,
 22 montrent que le respect des niveaux de référence du CS6 (2013), pour certaines fréquences,
 23 n'assurera pas la conformité avec les restrictions de base du CS6 (2013) portant sur le DAS. Il est
 24 important de noter que, dans ces cas mis en relief où un niveau de référence conforme produit une
 25 valeur correspondant à un niveau non conforme avec la restriction de base visant le DAS, il est
 26 très peu probable que le DAS sera à un niveau suffisant pour atteindre les niveaux qui auront un
 27 effet nocif sur la santé des humains. Cela s'explique par le fait que les écarts ont tendance à être
 28 relativement mineurs et que les restrictions de base proposées pour le DAS intègrent des marges
 29 de sécurité. Cependant, pour que la définition du niveau de référence énoncée dans la section 2
 30 du CS6 (2013), à savoir que le respect des niveaux de référence assurera la conformité avec les
 31 restrictions de base dans ce code de sécurité soit correcte, il est nécessaire de changer les
 32 niveaux de référence proposés dans le CS6 (2013). Le Comité recommande que Santé Canada
 33 examine le grand nombre d'études de dosimétrie, en plus de celles mentionnées dans le présent
 34 rapport, qui ont été produites depuis la dernière révision majeure du CS6 en 1999 et modifie les
 35 niveaux de référence proposés dans le CS6 (2013) en conséquence. »

36

37

Tableau 1 : Évolution des niveaux de référence proposés par Santé Canada

Fréquence	Champ électrique (V/m)			
	Icnirp	CS6 (2009)	CS6 (2013)	CS6 (2015)
400 MHz	28	32	31	24
900 MHz	41	48	38	32
1 800 MHz	58	61	45	41
2 100 MHz	61	61	47	43

¹⁰ Examen du Code de sécurité 6 (2013) : Limites de sécurité de l'exposition aux champs de radiofréquences fixées par Santé Canada.

1 Le nouveau code de sécurité 6 élaboré en 2014 a été soumis à consultation publique, et Santé
2 Canada en a publié une nouvelle version, le 13 mars 2015¹¹. Les niveaux de référence pour le
3 champ électrique sont légèrement revus à la baisse, notamment pour les raisons suivantes : « On
4 a révisé le Code de sécurité 6 en 2013 afin de veiller à ce qu'il tienne compte des études
5 scientifiques les plus à jour et les plus crédibles portant sur les effets possibles de l'énergie des RF
6 sur la santé humaine. (...) Ces changements ont été proposés pour veiller à ce que de vastes
7 marges de sécurité soient maintenues pour protéger la santé et la sécurité de tous, y compris
8 celles des enfants. » [...]

9 « Parmi les recommandations formulées par la SRC, il était suggéré de restreindre légèrement les
10 niveaux de référence proposés dans le projet de Code de sécurité 6 pour certaines gammes de
11 fréquences afin d'assurer des marges de sécurité plus vastes pour tous les Canadiens, y compris
12 les nouveau-nés et les enfants. »¹²

13 3.2 Le cadre réglementaire européen relatif à l'exposition du public aux 14 champs électromagnétiques

15 Le cadre réglementaire européen relatif à l'exposition du public aux champs électromagnétiques,
16 s'appuyant sur les travaux de l'icnirp définissant les valeurs limites d'exposition, n'intègre pas de
17 considérations spécifiques pour les enfants par rapport aux adultes. Les dispositions décrites ci-
18 dessous s'appliquent donc indifféremment à la population générale, quel que soit l'âge de la
19 personne considérée.

20 3.2.1 La recommandation 1999/519/CE du Conseil européen :

21 La recommandation 1999/519/CE du Conseil européen du 30 juillet 1999 relative à la limitation de
22 l'exposition du public aux champs électromagnétiques de 0 Hz à 300 GHz définit les valeurs limites
23 d'exposition des personnes, indépendamment du type d'appareil émetteur. Les grandeurs utilisées
24 liées à la pénétration des rayonnements dans le corps humain sont, en pratique, difficilement
25 mesurables. Elles sont appelées « restrictions de base » (voir glossaire). Dans le domaine des
26 radiofréquences, on utilise :

- 27 – le débit d'absorption spécifique (DAS, en W/kg), c'est-à-dire la puissance absorbée par le
28 corps par unité de masse de tissu (corps entier, localisé dans la tête et le tronc, ou dans les
29 membres), de 100 kHz à 10 GHz ;
- 30 – la densité de puissance, de 10 GHz à 300 GHz.

31 À titre d'exemple, pour les téléphones mobiles, les valeurs limites de DAS à respecter sont :

- 32 – 0,08 W/kg moyenné dans le corps entier ;
- 33 – 2 W/kg moyenné dans 10 g de tissu pour la tête ou le tronc ;
- 34 – 4 W/kg moyenné dans 10 g de tissu pour les membres.

35 La recommandation définit également des niveaux de référence de champ électrique et de champ
36 magnétique, obtenus plus facilement en mesurant les quantités suivantes dans l'environnement :

- 37 – le champ électrique E (en V/m) (cf. Figure 2) ;
- 38 – le champ d'induction magnétique B¹³ (en Tesla, plus souvent exprimé en µT) ou le champ
39 magnétique (en Ampère / m).

¹¹http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/consult/_2014/safety_code_6-code_securite_6/final_finale-fra.php#s2.2.2

¹²http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/consult/_2014/safety_code_6-code_securite_6/feedback_commentaires-fra.php

¹³ La relation entre le champ d'induction magnétique B (en T) et le champ magnétique H (en A/m) est :
 $B = \mu_0 \cdot H$ avec $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, μ_0 étant la perméabilité magnétique du vide (H/m).

1 – la densité de puissance équivalente pour une onde plane à partir de 10 GHz.

2 Si les amplitudes des champs mesurés respectent les niveaux de référence, les valeurs limites
3 d'exposition (restrictions de base) sont considérées comme également respectées. Les niveaux de
4 référence de la recommandation 1999/519/CE reprennent très précisément les valeurs limites
5 d'exposition définies par l'Incirp pour l'exposition du public. *A contrario*, si les niveaux de référence
6 sont dépassés, cela ne signifie pas que les restrictions de base le sont. Seule une mesure des
7 restrictions de base permet de caractériser complètement l'exposition.

8 **3.2.2 La directive européenne 1999/5/CE dite « R&TTE »**

9 Certains équipements utilisant le spectre des radiofréquences relèvent de la directive européenne
10 1999/5/CE dite « R&TTE » (*Radio and Terminal Telecommunication Equipment*). Elle a été
11 transposée en droit français par l'ordonnance n° 2001-670 du 25 juillet 2000. Elle remplace la
12 directive 98/13/CE du 12 février 1998. Le décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 a précisé les valeurs
13 limites d'expositions aux champs électromagnétiques pour la population générale, reprenant les
14 valeurs proposées dans la recommandation 1999/519/CE.

15 3.2.2.1 Principe et domaine d'application de la directive « R&TTE »

16 La directive R&TTE s'applique à tous les équipements hertziens et aux équipements terminaux de
17 télécommunications (filaire et de radiocommunication), y compris les équipements électro-
18 médicaux et automobiles et les installations de radiocommunication de type réseau (ex : station de
19 base GSM).

20 Elle exclut les équipements relatifs à la sécurité publique et à la défense, à la sécurité de l'État ou
21 aux activités de l'État dans le domaine du droit pénal. Sont exclus également les équipements
22 hertziens utilisés par les radioamateurs, sauf lorsqu'ils sont disponibles tout assemblés dans le
23 commerce.

24 Un équipement hertzien, au sens de la directive, est « un produit ou partie composante d'un
25 produit permettant la communication par l'émission et/ou réception d'ondes hertziennes en utilisant
26 le spectre attribué aux communications radio ». En ce sens, les dispositifs radioélectriques
27 évoqués dans la présente expertise sont des équipements hertziens : veille-bébés, tablettes
28 tactiles, téléphones mobiles, jouets radiocommandés etc.

29 La directive R&TTE établit un cadre réglementaire pour la mise sur le marché, la libre circulation et
30 la mise en service dans les pays de l'Union européenne des équipements hertziens et des
31 équipements terminaux de télécommunications. Elle modifie les procédures d'évaluation de la
32 conformité (suppression de l'homologation obligatoire et application élargie de la procédure de
33 contrôle interne de la fabrication par exemple) et accroît la responsabilité des fabricants ainsi que
34 la surveillance du marché.

35 La période transitoire s'est terminée le 30 avril 2001, soit une année après l'entrée en vigueur de la
36 législation révisée. Dès lors, toute installation de télécommunication mise sur le marché doit :

- 37 – être accompagnée d'une déclaration de conformité (sauf si elle a été homologuée) ;
- 38 – porter le marquage prescrit ;
- 39 – donner les informations nécessaires à l'utilisateur.

40 Tout équipement entrant dans son domaine d'application et mis sur le marché européen doit
41 impérativement être conforme à cette directive.

42 3.2.2.2 Exigences essentielles et conformité des appareils

43 Les produits concernés par la directive doivent notamment répondre aux exigences essentielles,
44 parmi lesquelles :

- 45 – la protection de la santé et de la sécurité des personnes soumise à la directive « basse
46 tension » 2006/95/CE ;
- 47 – la compatibilité électromagnétique soumise à la directive « CEM » 2004/108/CE.

1 3.2.2.3 Les recommandations de la directive

2 Les dispositifs pour enfants considérés dans ce rapport sont, pour une part importante, des
3 dispositifs à courte portée ou *Short Range Devices* (SRD).

4 La recommandation ERC 70-03 porte sur les allocations de fréquences communes pour les SRD,
5 pour les pays de la Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications
6 (CEPT). Elle concerne la compatibilité électromagnétique et décrit les exigences concernant la
7 gestion du spectre fréquentiel :

- 8 – les bandes de fréquence à allouer ;
- 9 – les niveaux de puissance maximum ;
- 10 – l'espacement des canaux ;
- 11 – le rapport cyclique.

12 La recommandation stipule que :

- 13 – les SRD fonctionnent en général dans des bandes de fréquence partagées et ne sont pas
14 autorisés à causer des interférences nuisibles aux autres services radio ;
- 15 – la majorité des SRD ne peut pas prétendre à la protection des services de radio ;
- 16 – en raison de l'intérêt de l'utilisation des SRD pour un nombre croissant d'applications, il est
17 nécessaire d'harmoniser les fréquences et les règlements pour ces dispositifs ;
- 18 – il y a un besoin de faire la distinction entre les différentes applications ;
- 19 – les applications supplémentaires et annexes connexes seront ajoutées selon les besoins ;
- 20 – sauf cas exceptionnels, l'équipement SRD doit utiliser des antennes intégrées ou dédiées.

21 La recommandation ERC DEC (01) 07 est une extension de la 70-03. Elle concerne les SRD
22 fonctionnant en Wi-Fi.

23 Des informations complémentaires concernant ces deux recommandations sont présentées en.

24 3.2.2.4 Les normes harmonisées de la directive

25 Les normes harmonisées de la directive R&TTE définissent les méthodes d'obtention de la
26 conformité à ces exigences.

27 Parmi elles, les normes EN 300 220 et EN 50371 prennent en compte les équipements
28 radioélectriques destinés aux enfants de moins de 6 ans, à savoir une partie des dispositifs
29 courtes portées (SRD). La première définit les limites de puissance et de fréquence par canaux
30 conformément à la recommandation ERC 70-03. La seconde fixe les limites pour l'exposition du
31 public aux champs électromagnétiques (voir présentation des normes en Annexe 3).

32 Depuis le 12 octobre 2013, le titre et la référence de la norme harmonisée EN 50566 ont été
33 publiés au Journal Officiel de l'Union européenne. Cette norme vaut présomption de conformité au
34 regard notamment de l'exigence essentielle de protection de la santé et de la sécurité des
35 utilisateurs de la directive 1999/5/CE. Elle s'applique à tous les dispositifs de communication sans
36 fil destinés à être utilisés avec la partie rayonnante de l'équipement située très près du corps
37 humain (c'est-à-dire à moins de 200 mm), y compris les dispositifs mis en fonctionnement devant
38 le visage. La gamme de fréquences couverte est comprise entre 30 MHz et 6 GHz. L'objectif de
39 cette norme produit est de démontrer la conformité d'un tel équipement aux restrictions de base
40 liées à l'exposition humaine aux champs électromagnétiques radiofréquence. Les dispositifs
41 utilisés à proximité de l'oreille sont couverts par la norme EN 50360. Les critères d'exclusion en
42 basse puissance sont spécifiés par la norme EN 62479. La norme EN 50566 est applicable à tous
43 les nouveaux dispositifs tenus à la main et/ou portés près du corps fabriqués et mis sur le marché
44 après le 12 octobre 2013.

45 3.2.3 **Évolutions réglementaires**

46 Le nouveau cadre législatif européen, qui s'appliquera à tous les produits vendus sur le marché
47 européen, implique de nombreuses évolutions dans les directives européennes. Ainsi, la directive

1 « R&TTE », qui expire le 13 juin 2016, sera remplacée par la directive 2014/53/UE sur les
2 équipements radioélectriques (*Radio Equipment Directive*). Cette nouvelle directive définit un
3 équipement radioélectrique comme « un produit électrique ou électronique qui émet et/ou reçoit
4 intentionnellement des ondes radioélectriques à des fins de radiocommunication et/ou
5 radiorepérage, ou un produit électrique ou électronique qui doit être complété d'un accessoire, tel
6 qu'une antenne, pour émettre et/ou recevoir intentionnellement des ondes radioélectriques à des
7 fins de radiocommunication et/ou radiorepérage ». La radiocommunication est quant à elle définie
8 comme la communication au moyen d'ondes radioélectriques.

9 Les changements principaux introduits par la directive sont les suivants :

- 10 - elle inclut les communications et l'identification radioélectrique (RFID, radar, détection de
11 mouvement etc.) ;
- 12 - elle s'applique désormais sans limite basse de fréquence ;
- 13 - le marquage CE n'est plus utilisé dans le manuel d'utilisation du produit. En revanche, il est
14 rappelé que la conformité incombe au seul fabricant. Dans le cas d'importation de produits
15 de pays tiers à l'Union européenne, la vérification de la conformité doit avoir été effectuée.
16 Le marquage CE peut être apposé sur l'emballage du produit ;
- 17 - la conformité des dispositifs « devrait également être exigée dans des conditions
18 d'utilisation qui peuvent être raisonnablement prévues ».

19 Cette dernière disposition opère un changement important par rapport à la directive 1999/5/CE qui
20 mentionnait des conditions d'utilisations prévisibles, c'est-à-dire telles que définies notamment par
21 les constructeurs dans les notices d'utilisation. Ainsi, nombre d'appareils radioélectriques sont
22 prévus, dans les notices, pour être utilisés à plusieurs centimètres du corps, leur conformité au
23 regard des exigences essentielles est donc testée à cette distance, même si on ne peut
24 raisonnablement exclure qu'ils soient, en réalité, utilisés bien plus près du corps. Des tablettes
25 numériques, des *talkies-walkies* par exemple, sont ainsi prévus pour être utilisés à 5 cm du corps,
26 alors même que les tablettes peuvent être posées sur les jambes, par exemple, et *les talkies-*
27 *walkies* collés à l'oreille, par exemple en cas de mauvaise réception sonore...

28 3.3 Panorama international des dispositions prenant en compte 29 spécifiquement les enfants

30 3.3.1 En France

31 À la suite des recommandations de l'Afssset en 2005 qui préconisaient de limiter l'usage des
32 téléphones mobiles par les enfants, les opérateurs français de téléphonie mobile membres de la
33 Fédération Française des Télécoms (FFTe) se sont engagés, dans le cadre d'une charte avec le
34 Ministère en charge des affaires familiales, à ne pas commercialiser de téléphone mobile
35 spécifiquement dédié aux jeunes enfants et à ne pas mener d'actions de *marketing* ou de
36 promotion de leurs offres en direction des enfants. Par la suite, des dispositions réglementaires
37 sont venues encadrer l'usage des téléphones mobiles par les enfants, ainsi que la publicité des
38 offres commerciales (Loi dite « Grenelle 2 »). Le décret français n° 2002-775 du 3 mai 2002
39 reprend les valeurs limites d'exposition de la recommandation européenne 1999/519/CE pour
40 définir les niveaux d'exposition à ne pas dépasser pour le grand public, dans le cas où il est
41 exposé à des dispositifs radioélectriques (tels que définis dans la directive européenne
42 « R&TTE »).

43 3.3.1.1 La loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement, 44 article 183 : prise en compte de l'exposition des enfants

45 La loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement, dite
46 « Grenelle 2 », comporte trois articles insérés dans le code de la santé visant à réduire l'exposition
47 des enfants :

- 1 - « Art. L. 5231-3. – Toute publicité, quel qu'en soit le moyen ou le support, ayant pour
2 but direct de promouvoir la vente, la mise à disposition, l'utilisation ou l'usage d'un
3 téléphone mobile par des enfants de moins de quatorze ans est interdite. »
- 4 - « Art. L. 511-5. – Dans les écoles maternelles, les écoles élémentaires et les collèges,
5 l'utilisation durant toute activité d'enseignement et dans les lieux prévus par le
6 règlement intérieur, par un élève, d'un téléphone mobile est interdite. »
- 7 - « Art. L. 5231-4. – La distribution à titre onéreux ou gratuit d'objets contenant un
8 équipement radioélectrique dont l'usage est spécifiquement dédié aux enfants de moins
9 de six ans peut être interdite par arrêté du ministre chargé de la santé, afin de limiter
10 l'exposition excessive des enfants. »

11 3.3.2 En Belgique : arrêté royal relatif à l'interdiction de mise sur le marché de 12 téléphones mobiles spécifiquement conçus pour les jeunes enfants

13 L'article 2 indique qu'« Il est interdit de mettre sur le marché des téléphones mobiles
14 spécifiquement conçus pour les jeunes enfants ».

15 Un téléphone mobile spécifiquement conçu pour les jeunes enfants est défini comme un
16 « téléphone mobile rendu visuellement attrayant pour les jeunes enfants ou dont le fabricant
17 déclare qu'ils sont destinés aux enfants de moins de sept ans ».

18 Cet arrêté est entré en vigueur six mois après sa publication au Moniteur belge, le 30 août 2013.

19 3.3.3 Autres dispositions nationales

20 Afin de préparer la rédaction du chapitre 14 de la future monographie de l'OMS sur les risques
21 sanitaires liés à l'exposition aux radiofréquences consacré aux pratiques de gestion des risques,
22 une enquête a été réalisée dans le but de recueillir auprès des différents correspondants
23 régionaux de l'OMS dans le monde des données sur les dispositions réglementaires, normatives
24 ou d'applications volontaires liées à la gestion des risques potentiels de l'exposition aux
25 radiofréquences. Les résultats de cette enquête, regroupés dans un « *background paper* », ont été
26 discutés lors d'un colloque organisé par l'OMS à Paris en mai 2013. Les éléments présentés ci-
27 après sont extraits de ce document¹⁴ et de la publication associée (Dhungel et al. 2014).

28 Parmi les pays ayant répondu à l'enquête, 33 % ont formulé des recommandations ou encouragé
29 à prendre des mesures volontaires pour limiter l'usage des téléphones mobiles par les enfants.
30 Parmi ceux-ci, 52 % visent à limiter l'usage du téléphone mobile par les enfants en fournissant des
31 informations aux parents, et 4 (Russie, France, Zambie, Belgique) déclarent avoir émis des limites
32 d'âge pour leur utilisation. La Figure 4 présente les pays qui intègrent au moins une forme de
33 recommandation concernant l'usage des téléphones mobiles par les enfants. Douze pays (48 %) ont
34 restreint l'usage des téléphones mobiles à l'école. Dans 75 % de ces cas, les raisons
35 invoquées sont uniquement de nature éducative : éviter la perturbation dans l'école, maintenir la
36 discipline, etc. Dans 3 pays (France, Oman, Espagne), il existe des limitations de la publicité
37 ciblant les enfants.

¹⁴ http://www.who.int/peh-emf/meetings/seminar_radiofrequency_june2013/en/

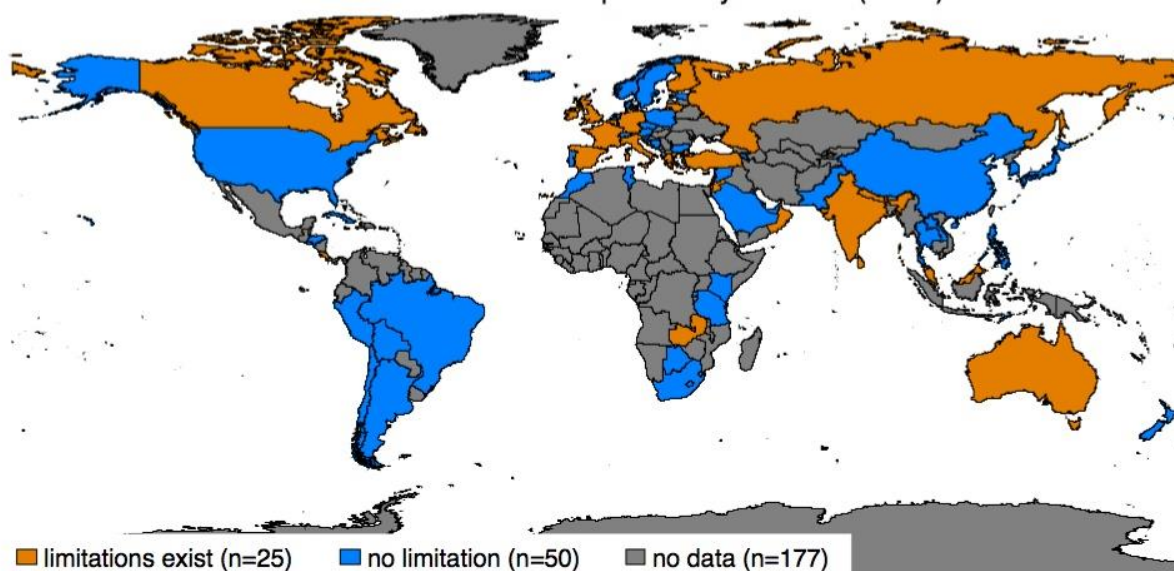


Figure 4 : Pays intégrant des limitations volontaires ou des informations sur l'usage des téléphones mobiles par les enfants

Une tendance à prendre des mesures de précaution pour les enfants est observée dans les pays européens, comme c'est le cas par exemple en Allemagne, Autriche, France, Finlande, Irlande, Russie et au Royaume-Uni. En revanche, les Pays-Bas n'ont pas intégré de limitations d'usage des téléphones mobiles pour les enfants, en raison d'absence de nouvelles données spécifiques sur les risques, même s'ils continuent à conduire des études sur l'exposition des enfants aux téléphones mobiles.

À titre d'exemple des dispositions ciblant les enfants, l'Angleterre, à travers son Agence de sécurité sanitaire (*Health Protection Agency*, aujourd'hui *Public Health England*), recommande un usage précautionneux du téléphone mobile, dans le cas où des effets à long terme, actuellement inconnus, seraient démontrés ultérieurement. Plus précisément, compte tenu de la possibilité d'effets cancérogènes à long terme, un usage excessif des téléphones mobiles par les enfants devrait être découragé.

De son côté, la Russie, par l'intermédiaire de son Ministère de la santé, et compte tenu des éléments fournis par son Comité national de protection contre les rayonnements non ionisants (*National Committee on Non-Ionizing Radiation Protection*), indique que les personnes âgées de moins de 18 ans ne devraient pas utiliser de téléphones mobiles.

Le Sultanat d'Oman a ainsi développé une politique visant à décourager l'usage des téléphones mobiles par les enfants en ne leur permettant pas la fourniture de cartes SIM.

D'autres pays, comme l'Australie, demandent aux acheteurs d'avoir un certain âge et de posséder une pièce d'identité.

3.4 Synthèse sur la réglementation et la normalisation des appareils radioélectriques pour enfants

Les valeurs limites d'exposition de la population générale aux champs électromagnétiques radiofréquences définies par l'Icnirp (inchangées depuis leur publication en 1998¹⁵) intègrent des coefficients de sécurité par rapport aux effets sanitaires aigus observés chez l'animal. Ces coefficients permettent, selon l'Icnirp, de prendre notamment en compte les variabilités dans la

¹⁵ À noter que l'Icnirp organise du 26 au 28 mai 2015 une conférence intitulée « *Thresholds of thermal damage* » dans le cadre de travaux de mise à jour des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques.

<http://www.icnirp.org/en/workshops/article/workshop-thermal-damage.html>.

1 population générale, en matière par exemple de sensibilité thermique (personnes âgées,
2 nourrissons, enfants, personnes malades, etc.), mais aussi les dernières connaissances
3 scientifiques en matière de dosimétrie, notamment au regard des spécificités des enfants.

4 Ces valeurs limites ont été reprises dans un grand nombre de recommandations internationales ou
5 de réglementations nationales, comme par exemple la recommandation européenne 1999/519/CE
6 ou le décret français n° 2002-775. D'autres, comme au Canada, proposent une lecture différente
7 des dernières avancées en matière de connaissance des expositions des enfants, en proposant
8 par exemple des valeurs limites d'exposition au champ électrique plus basses que l'Icnirp, afin de
9 tenir compte de l'exposition plus élevée des enfants comparativement aux adultes (cf. Annexe 6).

10 Les appareils radioélectriques à destination des enfants (veille-bébé, jouets télé-commandés,
11 tablettes tactiles connectées etc.) sont couverts par la directive européenne « R&TTE ». Celle-ci
12 prévoit que ces dispositifs doivent répondre à plusieurs exigences essentielles, en matière
13 notamment de sécurité électrique, de compatibilité électromagnétique mais aussi d'exposition du
14 public aux champs électromagnétiques. L'évolution de la directive, avec l'avènement d'un nouveau
15 texte communautaire en 2016, introduira des modifications dans le processus de certification de la
16 conformité aux exigences essentielles des dispositifs concernés, notamment en transformant la
17 notion d'usage prévu par le constructeur en usage raisonnablement prévisible. Cette évolution
18 pourrait avoir un impact non négligeable sur les mesures de DAS des dispositifs, qui pourraient
19 être testés plus près du corps qu'actuellement.

20 Plusieurs pays dans le monde ont pris des dispositions visant à limiter l'usage des téléphones
21 mobiles par les enfants, soit au moyen d'informations délivrées aux parents, soit par des mesures
22 de restriction. Ainsi, en France, la loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national
23 pour l'environnement, dite « Grenelle 2 », a introduit dans le code de la santé publique la
24 possibilité d'interdire, par arrêté du ministre chargé de la santé, la distribution à titre onéreux ou
25 gratuit d'objets contenant un équipement radioélectrique dont l'usage est spécifiquement dédié aux
26 enfants de moins de six ans. Plus récemment, la Belgique, *via* un arrêté royal, a interdit la mise sur
27 le marché de téléphones mobiles spécifiquement conçus pour les jeunes enfants. Cet arrêté est
28 entré en vigueur six mois après sa publication au Moniteur belge, le 30 août 2013.

29

4 Caractérisation des expositions

Il est aujourd'hui très difficile d'identifier la part des expositions liées aux appareils radioélectriques spécifiquement destinés aux enfants de leur exposition globale aux sources radiofréquences. Les sources d'exposition sont en effet très nombreuses, diverses en nature, en intensité et par la fréquence des rayonnements émis. Par ailleurs, la multiplicité et la diversité des lieux fréquentés par les enfants (domicile, école, lieux publics, installations sportives et culturelles, etc.) engendrent des situations d'expositions très variables, alors même que les usages des dispositifs radioélectriques (tablettes tactiles, jouets, etc.) évoluent rapidement. Enfin, les capacités techniques des exposimètres sont encore limitées pour décrire précisément l'exposition des personnes à des sources à la fois lointaines et proches du corps, en temps réel.

4.1 Identification des sources d'exposition spécifiques aux enfants

Dans le cadre d'une convention passée avec le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), l'Anses a souhaité recenser les produits de consommation émettant des ondes électromagnétiques destinés à des enfants de moins de 6 ans disponibles sur le marché français.

Dans le cadre de sa mission d'évaluation de la qualité et de la sécurité des produits et équipements grand public, le LNE procède en effet notamment à une surveillance du marché. Il travaille en étroite collaboration avec les importateurs européens et les fournisseurs asiatiques au travers de ses deux filiales LNE Asia et LNE China, afin de vérifier la mise en conformité des produits destinés à la mise sur le marché européen.

Le LNE a donc procédé à une étude, en 2012, afin de recenser les produits émetteurs de champs électromagnétiques radiofréquences spécifiquement destinés aux enfants. Les 250 dispositifs identifiés se répartissent dans les catégories suivantes : les « veille-bébés » (babyphone), les jouets radiocommandés, les *talkies-walkies*, les robots communicants, les téléphones mobiles pour enfants, les tablettes tactiles pour enfants et les modules anti-éloignement. La répartition en nombres et pourcentages des dispositifs spécifiquement dédiés aux enfants recensés par le LNE est donnée ci-dessous :

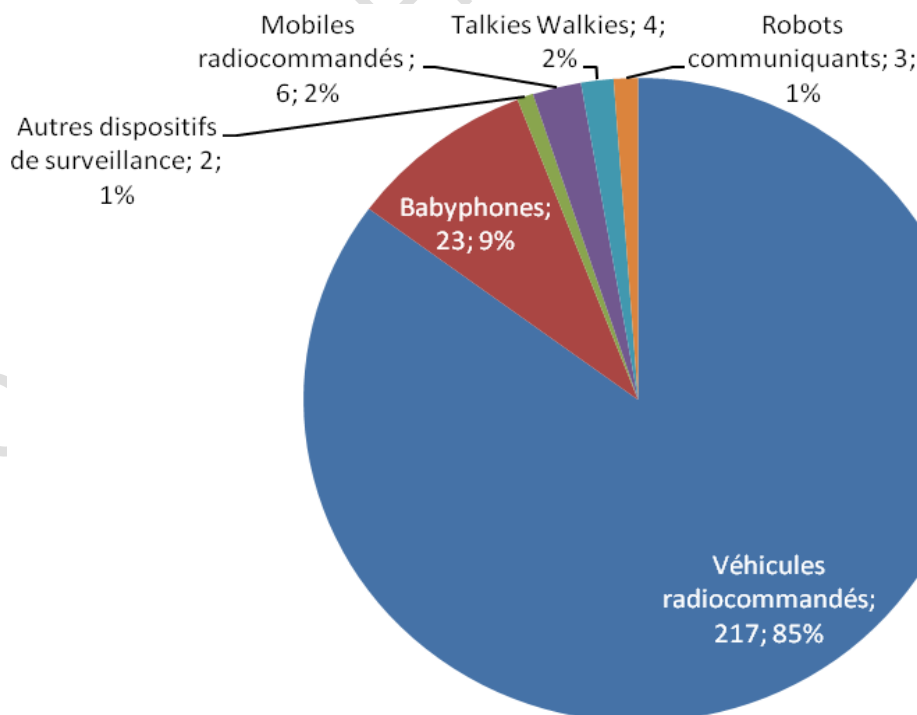


Figure 5 : Types de produits radioélectriques à destination des enfants de moins de 6 ans existants sur le marché français, en nombre et pourcentage du marché (LNE, 2012)

1 Les mobiles à télécommande à suspendre par exemple au-dessus des berceaux et lits de bébé
2 ont fait l'objet d'une surveillance du marché. Ils ont cependant été sortis du cadre de cette
3 expertise, car la télécommande émettrice représente un niveau d'émission extrêmement faible en
4 intensité et des durées d'utilisation également très faibles comparativement aux autres sources
5 radioélectriques. Par ailleurs, s'agissant de mobiles à destination de très jeunes enfants, la
6 télécommande est *a priori* uniquement utilisée par les parents.

7 Depuis l'étude réalisée par le LNE en 2012, le nombre de « veille-bébés » disponibles sur le
8 marché, notamment *via* le commerce en ligne, a beaucoup progressé. En 2014, environ 200
9 références sont disponibles sur le marché.

10 4.1.1 Les veille-bébés (ou *babyphone*)

11 Les veille-bébés ont pour objectif commercial de maintenir une connexion à distance entre les
12 parents et leur enfant en bas âge. Ils utilisent différentes technologies telles que la détection de
13 son ou la vidéo surveillance (caméra intégrée dans le dispositif enfant).

14 Le module « enfant » fonctionnant en émetteur est positionné à proximité de l'enfant. Dans la
15 plupart des cas, le module émetteur se déclenche automatiquement lorsqu'un niveau sonore
16 minimum est atteint (par exemple dès que l'enfant commence à pleurer). En revanche, dans le cas
17 de certains dispositifs fonctionnant avec une caméra, l'émission du module « enfant » peut se faire
18 de façon continue.

19 Certains modules « enfant » sont équipés d'un récepteur qui permet aux parents de communiquer
20 à distance avec l'enfant.

21 Certains veille-bébés permettent de s'assurer que le module « parents » est toujours situé à portée
22 du module « enfant ». Dans ce cas, un signal test est émis régulièrement (toutes les x secondes)
23 par le module « enfant ».

24 En fonction de leurs technologies, les veille-bébés peuvent fonctionner à des fréquences très
25 différentes, de 27 MHz à 2,4 GHz (voir Tableau 2). Le mode de transmission dépend de la
26 fréquence (modulation d'amplitude ou de fréquence à 27 ou 40 MHz, DECT à 1,9 GHz, ou
27 impulsif à 2,4 GHz). La puissance d'émission des appareils varie entre 10 et 500 mW ERP¹⁶
28 pour les plus puissants (*talkie-walkies* avec fonction veille-bébé), de même que leur portée peut
29 varier de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. Les veille-bébés fonctionnent avec
30 des piles ou un adaptateur secteur.

31 Le Tableau 2 présente les puissances maximales autorisées en fonction de la fréquence
32 d'émission. Ces données proviennent des normes de l'Institut européen des normes de
33 télécommunication (ETSI¹⁷) et des recommandations présentées précédemment (*cf.* 3.2.2.3 et
34 Annexe 2).

35
36
37
38
39
40
41
42
43
44

¹⁶ ERP : *Effective Radiated Power*, c'est-à-dire puissance rayonnée efficace.

¹⁷ *European Telecommunications Standards Institute*.

1 Tableau 2 : Fréquences et puissances d'émission des dispositifs veille-bébé

Fréquence (MHz)	Longueur d'onde (m)	Puissance d'émission maximale autorisée (mW)	Portée maximale théorique (m)	Terminologie	Valeur limite en champ électrique Icnirp (V/m)
27	11	100	400	Application audio sans fil <i>Baby monitoring</i>	28
40,7	6,5	10	150	Application à courte portée non spécifique	28
446	0,7	500	5 000 ¹⁸	Radiocommunication (<i>talkie-walkie</i>)	29
865	0,35	10	400	Application audio sans fil	40
1 800	0,17	20	300	Application audio sans fil	58
1 900	0,16	10	300	DECT	60
2 400	0,125	10	300	Application à courte portée non spécifique	61

2

3 L'exposition aux rayonnements émis par des veille-bébés a notamment été étudiée par Kramer *et*
4 *al.* en 2005 (Kramer *et al.* 2005). Pour une sélection de veille-bébés, les niveaux de champs
5 électriques mesurés ne dépassaient pas 11 % des valeurs limites définies par l'Icnirp à une
6 distance de 1 m. Les DAS mesurés ne dépassaient pas 0,08W/kg.

7 4.1.2 Les jouets radiocommandés

8 Les jouets radiocommandés ont été recherchés dans les boutiques en ligne de sites marchands
9 listés ci-après : *Google, Amazon, Aubert, JouéClub, Jouet Land, La Grande Récréée, King Jouets,*
10 *Maxi Toys, Eveil et Jeux, Toys R Us,* sites de fabricants, *etc.* La recherche a ensuite été affinée
11 par tranches d'âges de zéro à six ans.

12 Avec celui des veille-bébés, le marché des jouets radiocommandés est l'un des plus importants en
13 ce qui concerne les appareils radioélectriques à destination des enfants. De nombreux jouets
14 peuvent être radiocommandés, tels que des véhicules (voitures, bateaux, avions, hélicoptères,
15 locomotives), des peluches, ou encore des robots (*cf.* Figure 7).

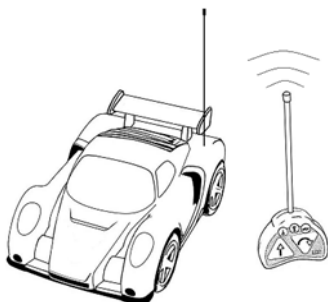
16 Ces jouets fonctionnent grâce à une télécommande qui permet de commander l'objet à distance.
17 Elle est généralement équipée de deux leviers permettant le contrôle de la puissance du moteur et
18 de la direction. Elles peuvent comporter une molette et une détente pour certains modèles réduits
19 de voiture. Leurs fonctionnalités peuvent être très élaborées, avec par exemple la possibilité de
20 changer de canaux radioélectriques.

21 L'ensemble du jouet radiocommandé est composé :

- 22 – d'un émetteur, équipé d'un module haute-fréquence situé dans la télécommande. Les
23 émetteurs récents disposent de microprocesseurs et de fonctions de réglage avancées ;
- 24 – d'un ou plusieurs récepteurs situés dans le jouet qui reçoivent et traitent le signal de
25 l'émetteur, le traduisant en signaux qui sont transmis à des servomoteurs ;
- 26 – d'un jeu d'antenne d'émission / réception pour communiquer entre le jouet et la
27 télécommande ;
- 28 – de servomoteurs qui transmettent mécaniquement aux gouvernes mobiles les ordres reçus
29 par le récepteur, permettant de faire avancer ou changer de direction le jouet ;

¹⁸ Ce dispositif est en fait un *talkie-walkie* dont le fabricant annonce la possibilité d'être utilisé comme veille-bébé. Il présente d'ailleurs, toujours selon le fabricant, un « aspect premier âge ». La puissance d'émission (500 mW ERP) annoncée permettrait une portée théorique de 5 km.

- 1 – d'un ensemble de batteries ou de piles.



2
3 Figure 6 : Voiture radiocommandée

4 Ces jouets fonctionnent généralement à 27 ou 40 MHz. Seule la télécommande émet des ondes
5 électromagnétiques, le jouet ne fait que les recevoir et les traiter. Toutefois, d'après l'Agence
6 sanitaire britannique, une large gamme de fréquences et de puissances émise est utilisée (Health
7 Protection Agency (HPA) 2012).

8 **4.1.3 Les talkies-walkies**

9 Les *talkies-walkies* permettent à deux (ou plusieurs) personnes de communiquer à l'aide de deux
10 (ou plusieurs) modules « émetteur / récepteur », chaque enfant possédant un module.
11 Contrairement aux veille-bébés ou aux jouets radiocommandés, où la liaison sans fil est
12 unilatérale, la liaison sans fil des *talkies-walkies* est bilatérale (c'est une liaison dite « *half*
13 *duplex* »), mais de manière successive (chaque interlocuteur parle à tour de rôle). Avant de
14 commencer à parler, l'enfant doit appuyer sur un bouton ou maintenir un poussoir (en fonction du
15 modèle de *talkie-walkie*), et le relâcher dès qu'il a fini de parler. L'autre peut alors répondre en
16 effectuant la même action. Le fait d'émettre ne permet plus la réception. Si un troisième appareil
17 est utilisé, il peut recevoir les transmissions simultanées des deux autres.

18 La gamme de fréquences utilisée se situe principalement autour de 433 MHz ou 446 MHz, mais
19 ces jouets peuvent être utilisés dans d'autres bandes, telles que 27 ou 40 MHz. Les puissances
20 émises sont généralement de 100 mW à 500 mW, limite de la bande de fréquence PMR¹⁹ à
21 446 MHz. Les portées typiques peuvent atteindre quelques centaines de mètres à quelques
22 kilomètres pour les émetteurs les plus puissants. Les modulations utilisées sont analogiques
23 (modulation de fréquence), mais aussi à présent numériques, avec l'utilisation du PCM (*Pulse*
24 *Code Modulation* – modulation par impulsion de code).

25 **4.1.4 Les robots communicants**

26 Les robots communicants sont des modules pouvant gérer différents flux de communication dans
27 une maison. Ils permettent par exemple de rester en communication permanente avec certaines
28 applications internet. Ils peuvent ainsi signaler l'arrivée d'un *e-mail*, donner l'état du trafic routier ou
29 fournir des prévisions météorologiques. Certaines applications sont spécifiquement dédiées aux
30 enfants, telles que la lecture d'un livre. Un des robots communicants les plus connus est le lapin
31 *Karotz* (anciennement *Nabaztag*) (Figure 7).

32

¹⁹ PMR : réseau *Professional Mobile Radio*.



Figure 7 : Lapin Karotz

1
2
3
4

Les technologies utilisées par les robots communicants sont généralement le Wi-Fi, le *bluetooth* et parfois la RFID.

5 4.1.5 Les téléphones mobiles pour enfants

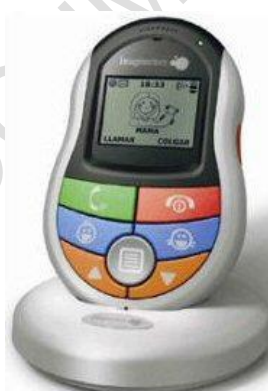
6 Après quelques tentatives de très courte durée, les téléphones mobiles pour enfants (*Kiditel*,
7 *Babymo*, etc.) n'ont plus intégré le marché français à partir de 2005. Ils restent cependant présents
8 sur le marché européen et il est possible de se les procurer par le biais du commerce en ligne.

9 Le MO1 (Figure 8-A), un téléphone mobile à destination des enfants avec des fonctions
10 simplifiées, était commercialisé en France par la Société espagnole *Imaginarium*. L'appareil ne
11 comprenait que sept touches colorées, dont deux avec numérotation rapide, et possédait une
12 interface intuitive adaptée aux aptitudes des enfants.

13 Le *Babymo*, commercialisé par la société ITT (cf. Figure 8-B), était un téléphone mobile
14 comportant une seule touche permettant aux enfants d'appeler leurs parents.

15 La Figure 9 présente une sélection de téléphones mobiles spécifiquement dédiés aux enfants
16 disponibles actuellement, notamment par la vente en ligne sur des sites internet de commerces en
17 Europe. Plusieurs dizaines de références existent, depuis les téléphones très simples avec bouton
18 unique, orientés vers les très jeunes enfants, jusqu'aux téléphones dédiés aux adolescents.

19 Il faut noter également que des offres d'abonnement à des forfaits « famille » existent, intégrant la
20 possibilité de rassembler plusieurs lignes par foyer, et donc la possibilité pour des enfants de
21 disposer de leur propre téléphone.



A



B

22

Figure 8 : Téléphones MO1 (à gauche) et BabyM (à droite)



Figure 9 : téléphones mobiles pour enfants

1
2
3

4 Par ailleurs, les téléphones mobiles « pour adultes » peuvent constituer une source d'exposition
5 pour les nourrissons, car ils peuvent être utilisés en tant que dispositif veille-bébés. Par exemple,
6 *Apple* distribue une application pour *i-Phone* nommée « Bébé-phone ». Cette application permet
7 aux parents de transformer leur téléphone en veille-bébé et de déclencher à distance des mélodies
8 ou des enregistrements de la voix des parents.

9 4.1.6 Les tablettes tactiles pour enfants

10 Les enfants constituent un nouveau marché pour les tablettes tactiles, avec des modèles au
11 *design* spécifiquement orienté vers eux. Celles-ci permettent de visionner des films, de jouer,
12 d'apprendre de manière ludique, etc. Elles n'intègrent pas à l'heure actuelle de fonction de
13 téléphone mobile, mais ont souvent une connexion internet par Wi-Fi.

14 À l'heure actuelle, le marché des tablettes est en constante progression. En effet, d'après
15 l'entreprise *NPD group*²⁰, la tablette *Storio 2*, qui s'était déjà hissée en tête des ventes sur
16 l'ensemble de l'Europe en 2012, est devenue le jouet le plus vendu en France en 2013 toutes
17 catégories confondues. D'après les derniers résultats hebdomadaires de *NPD Group* (jusqu'à fin
18 novembre 2013) les ventes de tablettes pré-scolaires (à partir de 18 mois et jusqu'à 6 ans) et de
19 leurs jeux respectifs ont presque doublé comparées aux chiffres à la même période en 2012. Au
20 1^{er} décembre 2013, près de 440 000 tablettes pour enfants ont été vendues en France depuis le
21 début de l'année²¹.

22 Cependant, compte tenu du prix de ces tablettes, certains guides d'achat²² recommandent aux
23 parents d'acheter à leurs enfants des tablettes adultes, plus abordables, plus évolutives et qui
24 possèdent en outre une option de contrôle parental. Or, l'usage par les enfants de tablettes pour
25 adulte peut engendrer une exposition à des signaux 3G/4G, en plus des connexions Wi-Fi
26 classiques.

27 Par ailleurs, les expérimentations sur l'utilisation des tablettes tactiles dans l'enseignement sont en
28 progression continue depuis 2010. Le portail national des professionnels de l'éducation, *éduscol*²³,
29 citait ainsi en septembre 2014 que « parmi les expérimentations et les premiers déploiements
30 suivis par le ministère, on comptait environ 15 000 tablettes en expérimentation dans les
31 établissements scolaires (écoles, collèges, lycées) en juin 2013. On en recensera environ 115 000

²⁰ *NPD Group* est un paneliste qui réalise des études de marché dans divers secteurs industriels.

²¹ <https://www.npdgroup.fr/wps/portal/npd/fr/actu/communiqués-de-presse/grace-a-une-croissance-retrouvee-depuis-le-debut-de-lannee-noel-sannonce-prometteur-pour-le-marche-du-jouet> ;

²² <http://www.tablette-tactile.net/guide-achat/tablette-tactile-enfant-2-131465/> ;
<http://www.quechoisir.org/telecom-multimedia/informatique/guide-d-achat-tablettes-tactiles-pour-enfants>

²³ <http://eduscol.education.fr/cid71927/tablettes-tactiles-retours-d-experimentations-et-potentialites-pedagogiques.html>.

1 en septembre 2014 ». Pour l'instant, les tablettes semblent cependant s'intégrer principalement à
2 l'école à partir du premier degré (école primaire).

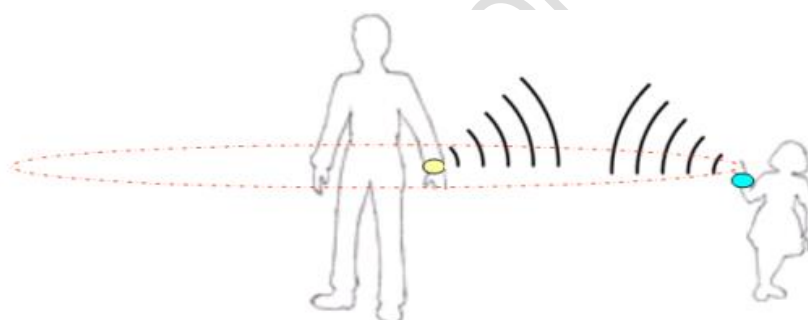
3 4.1.7 Les jouets connectés

4 Au croisement des jouets radio-commandés et des téléphones mobiles, se trouvent aujourd'hui
5 des jouets connectés, notamment des voitures, hélicoptères etc. dont les mouvements sont pilotés
6 par des téléphones mobiles ou tablettes, au moyen d'une connexion *Bluetooth*. Si la norme
7 *Bluetooth* utilise des niveaux de puissance très faibles pour communiquer, la nécessité de
8 disposer d'une application dédiée pour piloter ces jouets, et donc d'un téléphone mobile ou d'une
9 tablette, peut potentiellement engendrer une exposition non désirée des enfants qui les
10 utiliseraient. À noter qu'il existe également des jouets connectés utilisant des sons de hautes
11 fréquences (autour de 20 kHz) pour communiquer (par exemple la peluche *Furby*), qui ne rentrent
12 donc pas dans le champ de cette expertise.

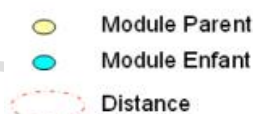
13 4.1.8 Les modules anti-éloignement et applications de géolocalisation

14 Les modules « anti-éloignement » servent à prévenir les parents lors du déplacement de leur
15 enfant (cf. Figure 10). Ils peuvent se présenter sous forme :

- 16 – de tapis pouvant être disposés à proximité d'une zone sensible (à la sortie du lit de l'enfant,
17 devant une fenêtre) et émettant un signal au module « parent » lorsque l'enfant marche
18 dessus ;
- 19 – d'objet portatif s'accrochant sur l'enfant (bracelet, étiquette collée aux vêtements, fixation
20 portée à la ceinture ou sur les chaussures, etc.) émettant un signal lorsque celui-ci
21 s'éloigne d'un périmètre donné.



Si l'enfant sort de la zone « Parent – Enfant »
⇒ Buzzer + Rétro-éclairage du Module Parent



22 Figure 10 : Fonctionnement d'un module anti-éloignement

23 Ces dispositifs fonctionnent généralement à 433 MHz, des fréquences de 27 et 40 MHz peuvent
24 également être parfois utilisées. Le module récepteur (ou module enfant) est similaire à une
25 étiquette RFID, il n'émet généralement pas de signal radiofréquence.

26 Certains de ces dispositifs sont utilisés dans des maternités comme technologie d'alarme, pour
27 dissuader les enlèvements de nouveaux-nés. Ils sont composés de bracelets émetteurs accrochés
28 aux poignets ou chevilles des enfants, qui déclenchent un signal s'ils passent les détecteurs situés
29 aux ouvertures des services de maternité. Les émissions sont peu fréquentes et de très faible
30 amplitude (cf. rapport de l'Afsset sur les technologies RFID [Afsset, 2009]).

31 Il existe par ailleurs des applications de géolocalisation des enfants, disponibles sur téléphones
32 mobiles et tablettes, qui peuvent ainsi envoyer leur position géographique aux téléphones ou
33 tablettes des parents. Des modules comprenant un récepteur GPS et un émetteur GSM sont
34

1 également disponibles, sans possibilité de communication orale. Ces dispositifs envoient un SMS
2 au numéro enregistré toutes les 1 à 3 minutes. Un bouton « SOS » permet d'envoyer un message
3 d'alerte. D'autres systèmes n'envoient des messages que si la balise s'éloigne trop d'une zone
4 prédéfinie par exemple. Ces systèmes se déclinent sous formes de badges portés à la ceinture, de
5 montres ou d'accessoires à fixer aux chaussures. Une montre disponible aux États-Unis permet de
6 passer des appels à 5 numéros préenregistrés, c'est donc un téléphone mobile au poignet...

7 Ne disposant pas de données précises sur l'usage de ces différents dispositifs, par ailleurs en
8 évolution extrêmement rapide, il est actuellement impossible de déterminer la part de l'exposition
9 des enfants due aux appareils leur étant dédiés par rapport à l'exposition aux autres sources
10 radiofréquences dans l'environnement (antennes-relais, relais FM, TV, Wi-Fi etc.).
11

1 4.2 Taux d'équipement en téléphone mobile et habitudes téléphoniques 2 des enfants et adolescents

3 À ce jour, aucune donnée n'est disponible sur le taux d'équipement des ménages français en
4 veille-bébé ou en jouets radiocommandés. En revanche, il existe quelques données parcellaires
5 concernant la téléphonie mobile.

6 4.2.1 Taux d'équipement

7 Depuis moins de 10 ans, l'usage du téléphone mobile s'est beaucoup répandu chez les enfants et
8 les adolescents, avec une importante progression du taux d'équipement en France, passant de
9 72 % en 2003 à 90 % en 2013 (Credoc 2013) (cf. Tableau 3). Le taux d'équipement en
10 *smartphone* chez les 12 - 17 ans est passé de 22 % en 2011 à 55 % en 2013 (Credoc, 2013).
11 Aucune donnée n'est disponible pour les plus jeunes enfants. Si le taux d'équipement des jeunes
12 enfants (d'âge inférieur à 6 ans) n'est pas connu, leur usage des téléphones mobiles n'est pas non
13 plus précisément quantifié, notamment en France.

14 À l'étranger, la progression du taux d'équipement est également très importante.

15

1 Tableau 3 : Données relatives au taux d'équipement des enfants et adolescents en téléphone mobile

Référence de l'étude	Ville ou état Pays	Nombre d'enfants	Âges des enfants	Taux d'équipement	Usage	Date de l'étude
(Böhler & Schüz 2004)	Mayence, Allemagne	1 933	10 ans (âge médian)	34,7 %	6,2 % des enfants utilisent un téléphone au moins une fois par jour pour passer un appel 6,4 % l'utilisent plusieurs fois par semaine 45,3 % l'utilisent seulement une fois de temps en temps	Nov. 2002-Fév. 2003
(Davie et al. 2004)	Gloucestershire, Angleterre	351	10-11 ans	45 %	47% des enfants utilisent le plus souvent leur téléphone pour appeler leurs parents	Non précisé
(Mezei et al. 2007)	Pecs, Bekescsaba, et Szekszard Hongrie	1 301	9 - 12 ans	76 %	24 % des enfants utilisent leur téléphone quotidiennement, 33 % l'utilisent au moins plusieurs fois par semaine, 5 % envoient des SMS tous les jours et 24 % en envoient au moins plusieurs fois par semaine.	Avril 2005
(Eurobaromètre 2008)	Finlande	503	6-10 ans	70,2 %	-	2008
	Allemagne	419		46,6 %	-	
	Danemark	501		32,9 %	-	
	Hongrie	503		28,4 %	-	
	Europe	12 803		26,5 %	-	
	France	503		7,1 %	-	
(Divan et al. 2010)	Danemark	1) 12 796 2) 28 745	7 ans	-	1) 30,5 % et 2) 35,2 % utilisent occasionnellement un téléphone, moins de 1 % des enfants l'utilisent plus d'1 h par semaine	Déc. 2008
(Inyang et al. 2010 a)	Melbourne Australie	317	10 - 14 ans	77 %	94 % des enfants ont déjà utilisé un téléphone mobile, 79 % l'utilisent régulièrement	Déc. 2005 – Déc. 2006
Credoc, 2013	France	2 215 personnes de plus de 12 ans (nb de 12-17 ans non précisé)	12 - 17 ans	72 %	-	2005
				82 % (22 % de <i>smartphone</i>)	-	2011
				90 % (55 % de <i>smartphone</i>)	-	2013

2 4.2.2 Habitudes téléphoniques

3 Les usages du téléphone mobile et *de facto*, l'exposition, sont en constante évolution, notamment
4 avec l'apparition des *smartphones* qui entraîne une exposition en mode « visionnage », en
5 complément de l'exposition en mode conversation (à l'oreille).

6 Âge de la première utilisation

7 Divan *et al.* (2010) ont réalisé une étude sur 28 745 enfants danois, selon laquelle 35,2 % d'entre
8 eux utilisent un téléphone mobile dès l'âge de 7 ans (Divan *et al.* 2010).

9 Redmayne *et al.* (2010) ont réalisé une enquête transversale explorant les habitudes
10 téléphoniques des adolescents néozélandais entre mi-juin et octobre 2009 (Redmayne *et al.*
11 2010). Trois cent dix-sept adolescents, âgés en moyenne de 12,3 ans (10,3 - 13,7 ans), ont été
12 tirés au sort dans des écoles autour de Wellington, fournissant un échantillon représentatif de la
13 région du point de vue du niveau socioéconomique de l'école, du type d'école et de la ruralité. Les

1 participants ont rempli un questionnaire inspiré de celui de l'étude MoRPhEUS, complété par des
2 mesures de la distance entre le téléphone et le corps pendant une utilisation type. Une estimation
3 du temps passé près d'un téléphone mobile allumé a été réalisée, ainsi que le temps et le nombre
4 d'appels avec différents types de téléphones sans fil (mobile ou DECT), et le type d'utilisation
5 (appel, envoi de messages texte, fonctions utilisées, utilisation à l'école, etc.). L'étude révèle que
6 87 % des adolescents ont un téléphone sans fil à la maison et 77 % possèdent leur propre
7 téléphone mobile. Une relation statistiquement significative a été retrouvée entre l'utilisation du
8 téléphone sans fil et du téléphone mobile.

9 En 2013, les mêmes auteurs rapportent que la première utilisation survient majoritairement à
10 10 ans, mais 37 % des participants ont déjà utilisé un téléphone mobile entre 7 et 9 ans, et 5,5 %
11 déclarent avoir utilisé un téléphone mobile avant l'âge de 7 ans (Redmayne *et al.*, 2013a).

12 *Consommation téléphonique*

13 D'après Redmayne (2013a), le nombre médian d'appels vocaux est de 3,2 par semaine (de 0 à
14 69) et celui des messages textes est de 103 (de 0 à 1 187) pour les adolescents australiens
15 (Redmayne 2013).

16 Les utilisations principales du téléphone mobile sont :

- 17 - envoyer des messages textes ;
- 18 - recevoir des appels et appeler ;
- 19 - prendre des photos.

20 Environ 20 % des participants de l'étude gardent leur téléphone actif dans leur poche plus de
21 10 heures d'affilées par jour, 60 % des participants déclarent garder leur téléphone mobile près
22 d'eux pendant la nuit et 12,4 % le gardent sous l'oreiller. La distance médiane mesurée entre le
23 visage et le téléphone pour envoyer un message est de 30 cm.

24 Inyang *et al.* (2010a) ont réalisé une enquête sur 317 adolescents australiens, âgés de 10 à
25 14 ans, ayant rempli eux même un questionnaire concernant leur exposition au téléphone mobile.
26 L'analyse des résultats montre que 94 % des adolescents utilisent un téléphone mobile (et 77 %
27 des adolescents possèdent leur propre téléphone). Dix pourcent des sujets utilisent le téléphone
28 mobile avec l'oreille gauche, 63 % avec l'oreille droite et 25 % avec les 2 oreilles indifféremment,
29 2 % ne se souviennent plus. En revanche, 10 % sont gauchers, 87 % sont droitiers et 3 % sont
30 ambidextres. De nombreux traits de personnalité ou facteurs environnants influencent l'utilisation
31 du téléphone mobile : les garçons d'une part et les enfants uniques d'autre part semblent être plus
32 jeunes lors de leur première utilisation. De plus, le statut socio-économique parental et la
33 perception des risques liés aux téléphones mobiles sont aussi corrélés avec l'utilisation du
34 téléphone mobile par les enfants (Inyang *et al.* 2010).

35 Selon Divan *et al.* (2010), moins de 1 % des enfants de 7 ans utiliseraient un téléphone mobile
36 plus d'une heure par semaine (Divan *et al.* 2010).

37 Dans une étude analysant l'association entre l'utilisation du téléphone mobile et la perte d'audition
38 chez les enfants de 7 ans (voir paragraphe 5.3.3.1), Sudan *et al.*, révèlent que 36 % des enfants
39 (n = 18 935, cohorte danoise nationale des naissances) utilisent un téléphone mobile à l'âge de
40 7 ans, mais moins de 1 % l'utilisent plus d'une heure par semaine (Sudan *et al.* 2013a)

41 **4.2.3 Commentaires sur la méthodologie des études d'exposition**

42 Les données d'exposition sur l'utilisation des téléphones mobiles sont souvent collectées par des
43 questionnaires remplis par les sujets eux-mêmes. Des études ont été conduites pour évaluer la
44 pertinence de ces données auto-rapportées.

45 En 2009, une étude incluant 59 enfants âgés entre 11 et 12 ans en Australie a testé la corrélation
46 entre les données d'exposition auto-rapportées par questionnaire et celles obtenues en utilisant
47 des téléphones GSM dont le logiciel a été modifié pour enregistrer certaines données d'exposition
48 (par exemple durée et fréquence des appels...) (Inyang *et al.* 2009). Les résultats sont illustrés par

1 une corrélation médiocre ($r^2_{\text{fréquence des appels}} = 0,3$ et $r^2_{\text{durée des appels}} = 0,1$). Selon les auteurs, la
2 véracité et la précision des données fournies par les adolescents sont compromises par leur
3 difficulté à se remémorer des événements. De plus, les adolescents ont tendance à détourner
4 leurs réponses en fonction de leur volonté d'acceptation sociale.

5 La même équipe s'est intéressée à la validité des déclarations de latéralité chez les adolescents
6 (Inyang *et al.* 2010). Quatre-cent quarante-cinq appels ont été enregistrés chez 30 étudiants
7 (moyenne d'âge de 14 ans). Pendant une semaine, les adolescents ont utilisé un téléphone
8 modifié pour enregistrer certains paramètres dosimétriques tels que la latéralité, la date, la durée
9 et le nombre des appels. Ces données ont été comparées avec celles obtenues par auto-
10 questionnaire sur la latéralité et l'estimation de l'utilisation du téléphone mobile pendant une
11 semaine type. Elle a mis en évidence de fréquentes erreurs de déclaration quant à la latéralité de
12 l'utilisation (coefficient de concordance kappa = 0,3, $IC_{95\%} = [0,0 - 0,6]$) et la durée des appels
13 (coefficient de concordance kappa = 0,01, $IC_{95\%} = [0,0 - 0,37]$), mais une concordance acceptable
14 concernant le nombre d'appel (coefficient de concordance kappa = 0,38, $IC_{95\%} = [0,07 - 0,69]$).

15 En 2011, dans le cadre de l'étude cas témoins CEFALO, Aydin *et al.*, ont conduit une étude
16 préliminaire de validation pour estimer les effets des erreurs aléatoires et systématiques chez
17 26 % des cas et 22 % des témoins (sujets possédant leur propre téléphone mobile, dont des
18 données opérateurs d'exposition étaient disponibles). Dans cette étude de validation, les cas ont
19 surestimé de 9 % en moyenne leur nombre d'appels, et de 52 % la durée de leurs appels, alors
20 que les témoins surestimaient de 34 % leur nombre d'appels et de 163 % la durée de leurs appels.
21 Cette étude a montré que l'impact combiné des biais sur les OR estimés est complexe ;
22 cependant, les auteurs en concluent qu'il est peu probable que ces biais et erreurs créent une
23 fausse association positive, que ce soit dans le sens d'un risque ou d'un effet protecteur
24 (Redmayne *et al.* 2013a).

25 En 2013, Redmayne *et al.* ont testé sur leur échantillon de 373 élèves (voir 4.2.2) issus d'écoles de
26 la région de Wellington (Nouvelle-Zélande) la concordance entre le nombre de messages texte
27 déclarés et réellement envoyés, grâce à l'interrogation du suivi de consommation fourni par
28 l'opérateur (Redmayne *et al.* 2013a). Les résultats révèlent que l'autodéclaration surestime très
29 largement la réalité. Les auteurs ont également développé un modèle afin de réduire les biais lors
30 de l'utilisation de ce type de données dans des études épidémiologiques.

31 **4.3 Mesures de l'exposition au champ électromagnétique émis par des** 32 **appareils destinés à être utilisés par des enfants de moins de 6 ans**

33 Les données d'exposition aux champs électromagnétiques induits par les dispositifs
34 radioélectriques destinés aux enfants sont peu nombreuses. Quelques éléments ont pu être
35 recueillis dans la littérature, à travers des tests réalisés sur des veille-bébés principalement et des
36 jouets de type *talkie-walkie*. Dans le cadre d'une convention particulière, le LNE a ainsi été sollicité
37 par l'Anses afin de réaliser des mesures de l'exposition aux dispositifs radioélectriques destinés
38 aux enfants repérés au préalable par une étude de marché (*cf.* chapitre 3.1).

39 Même si, grâce à un accord tacite entre autorités et opérateurs de téléphonie mobile, aucun
40 téléphone spécifiquement destiné aux enfants de moins de 6 ans n'est proposé dans le cadre des
41 offres des opérateurs mobiles français, il est tout à fait possible pour un jeune enfant d'utiliser un
42 téléphone mobile. Ainsi, la section 3 de ce chapitre est consacrée à l'étude des spécificités de
43 l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques, à travers leurs caractéristiques
44 morphologiques mais aussi biologiques particulières. Depuis quelques années, les progrès de la
45 modélisation et de la simulation numérique ont autorisé en effet l'étude des interactions entre les
46 champs électromagnétiques et le vivant, depuis le fœtus jusqu'à l'âge adulte.

47 **4.3.1 Données d'exposition issues de la littérature**

48 Hormis les spécifications des appareils, lorsque celles-ci sont disponibles, qui peuvent renseigner
49 sur les puissances émises et donner un ordre de grandeur de l'exposition résultante, il existe peu

1 de publications consacrées à l'étude de l'exposition liée aux appareils radioélectriques à
 2 destination des enfants. Les fréquences utilisées par ces appareils se répartissent sur une grande
 3 partie du spectre électromagnétique, ce qui rend les études extrêmement complexes. Ainsi, dans
 4 le cas des veille-bébés par exemple, les fréquences utilisées vont de 27 MHz à 2,4 GHz. Les
 5 techniques de mesure de l'exposition ne sont pas les mêmes pour ces fréquences extrêmes, et si
 6 les communications mobiles dans la bande 800 MHz – 3 GHz ont considérablement aidé au
 7 développement des outils de mesure dans cette bande, les mesures restent beaucoup plus
 8 délicates à réaliser autour de 30 – 40 MHz.

9 4.3.1.1 Veille-bébés

10 Dans l'étude réalisée par la Fondation IT'IS sur mandat de l'Office fédéral de la santé publique
 11 suisse (OFSP), Kramer *et al.* (2005) ont mesuré le champ électrique généré par trois veille-bébés
 12 différents : le Philips SC263, le Vivanco BM 800 et le Vivanco BM 900. Cette étude de bonne
 13 qualité a exploré 3 des fréquences les plus utilisées pour ces dispositifs (Kramer *et al.* 2005).

14 Le veille-bébé Philips SC263 inclut 2 canaux de communication utilisant une fréquence de
 15 40 MHz, pour une puissance de 10 mW. Lors des mesures, la fréquence réelle était de
 16 40,695 MHz. À cause de sa fréquence d'émission relativement basse, les conditions de mesure en
 17 champ lointain ne pouvaient être satisfaites aux distances usuelles d'utilisation (0,2 - 2,5 m).
 18 Cependant, grâce à des sondes spécifiques, des mesures du champ électrique émis par ces
 19 dispositifs ont pu être réalisées en champ proche, c'est-à-dire pour des distances allant d'environ
 20 25 à 2 cm. Les valeurs du champ électrique mesuré sont alors comprises entre 2,5 et 75 V/m
 21 environ. Ces valeurs relativement élevées nécessiteraient de mesurer en complément l'énergie
 22 électromagnétique effectivement déposée dans des modèles (DAS), pour obtenir une estimation
 23 plus pertinente de l'exposition. Mais en l'absence de protocole de mesure du DAS normalisé pour
 24 des fréquences de l'ordre de 40 MHz, il n'a pas été possible de réaliser une mesure du DAS émis
 25 par ce type de dispositif.

26 Le Vivanco BM 800 fonctionne théoriquement à une fréquence de 863 MHz. La puissance
 27 maximale d'émission, faible, est de 10 mW. Le signal n'est pas modulé en amplitude. De ce fait, si
 28 le détecteur est excité continuellement, des signaux de transmission sont émis en continu.
 29 L'appareil est équipé d'un contrôle de portée, qui transmet un signal test toutes les 5 secondes. Le
 30 bébé est donc exposé régulièrement, y compris lorsqu'il ne pleure pas.

31 Le Vivanco BM 900 utilise une fréquence de 446 MHz. La puissance maximale d'émission est de
 32 500 mW. L'appareil peut être équipé d'un microphone. Celui-ci peut être placé à côté du bébé,
 33 alors que le module récepteur peut être placé plus loin (jusqu'à 1,5 m). L'appareil est également
 34 équipé d'un contrôle de portée.

35 Le Vivanco BM 800 et le Vivanco BM 900 ont été testés selon le même protocole. Un signal audio
 36 de fréquence 800 Hz est émis par 2 haut-parleurs situés à 1 m du veille-bébé. Même si le veille-
 37 bébé ne doit pas être placé près du corps en utilisation normale, les valeurs de DAS des deux
 38 appareils ont été déterminées. Pour effectuer ces mesures, les appareils ont été réglés sur un
 39 signal continu en régime permanent, créant le rayonnement le plus important possible. Les
 40 résultats sont reportés dans le Tableau 4. Pour une analyse de la variation du DAS à différentes
 41 orientations, le veille-bébé Vivanco BM 800 a été tourné de 90° par rapport à l'axe de son antenne.

42

43 Tableau 4 : Caractéristiques physiques des veille-bébés Vivanco BM 800 et Vivanco BM 900

Appareil	Fréquence (MHz)	Puissance d'émission (mW)	DAS (10g) (W/kg)	DAS (1g) (W/kg)
Vivanco BM 800	863	10	0,00958	0,012
Vivanco BM 800 (rotation de 90°)	863	10	0,018	0,012
Vivanco BM 900	446	500	0,077	0,115

44

Source : Kramer *et al.* (2005)

1 Les DAS obtenus sont inférieurs à la limite de 2 W/kg recommandée par l'Icnirp. Cependant, les
 2 DAS (1 g) et (10 g) sont augmentés respectivement de 20 % et 50 % après rotation du Vivanco
 3 BM 800, montrant ainsi l'influence du diagramme de rayonnement de ces dispositifs sur
 4 l'exposition.

5 4.3.1.2 Tablettes tactiles

6 En décembre 2013, la société *Experip* a publié une étude comparative de DAS mesurés pour des
 7 tablettes tactiles. Cette étude est basée sur les données des constructeurs, il faut donc la
 8 considérer avec les précautions d'usage. Les données sont présentées dans le Tableau 5.

10 Tableau 5 : Résultats des mesures de DAS pour différentes tablettes 3G

Valeur du DAS en W/Kg	0,50 > DAS ≥ 0,20	0,80 > DAS ≥ 0,50	DAS ≥ 0,80
Tablette	1 tablette	1 tablette	8 tablettes

11 Source : <http://www.experip.com>

12

13 La méthodologie de mesure n'est pas précisée dans l'étude (fréquence, distance, etc.).

14 Des situations plus complexes que par le passé, aussi bien pour les zones exposées que pour les
 15 durées d'exposition, posent des problèmes méthodologiques pour l'évaluation des expositions.
 16 D'une part, les zones soumises à un rayonnement ont varié (main et poignet plus qu'oreille),
 17 d'autre part les puissances émises correspondent à des services pouvant être combinés ou
 18 simultanés (télécharger un fichier et naviguer sur internet simultanément, etc.).

19 Les tablettes sont plus souvent connectées en Wi-Fi qu'un *smartphone*. Le rayonnement émis par
 20 un équipement en Wi-Fi est généralement plus faible qu'en 3G. Le DAS correspondant se situe en
 21 moyenne autour de 0,25 W/kg.

22 La difficulté de la mesure du DAS des tablettes provient de la pertinence de sa définition (le calcul
 23 ne peut se faire comme pour les téléphones mobiles au niveau de la tête et la distance de mesure
 24 est à définir). Les normes IEC 62209-2:2010 ont été publiées pour répondre à ces spécificités,
 25 elles sont d'ailleurs susceptibles d'évoluer. Par ailleurs, la directive européenne n° 2014/53/CE
 26 introduira la notion d'usage raisonnablement prévisible pour définir la distance à observer entre le
 27 dispositif et le mannequin de test lors de la vérification de la conformité en DAS, en remplacement
 28 de l'usage prévu par le constructeur.

29 4.3.1.3 Exposition aux signaux Wi-Fi dans les écoles

30 Dans son rapport publié en 2012, l'Agence de sécurité sanitaire anglaise (HPA) a investigué les
 31 différents types d'équipement Wi-Fi utilisés par les enfants dans des écoles anglaises, et a évalué
 32 l'exposition des enfants fréquentant ces établissements. L'exposition a été mesurée selon les
 33 recommandations de l'Icnirp. Dans un premier temps, les champs électriques et les puissances
 34 rayonnées ont été évalués autour de 15 ordinateurs portables et 12 points d'accès Wi-Fi
 35 représentatifs des équipements des écoles anglaises (Peyman *et al.* 2011). Dans un second
 36 temps, le DAS a été déterminé en utilisant des techniques de modélisation chez des modèles de
 37 fantômes d'adultes et d'enfant. Un fantôme modélisant le corps entier d'un enfant de 10 ans a ainsi
 38 été utilisé (Findlay & Dimbylow 2010). Enfin, des données ont été récoltées sur la durée d'émission
 39 des signaux dans des salles de classes anglaises. Six écoles primaires et secondaires ont été
 40 visitées et les mesures ont été réalisées pendant la classe (Khalid *et al.*, 2011).

41 Les valeurs de puissance maximales mesurées à 50 cm des ordinateurs portables et des points
 42 d'accès Wi-Fi atteignaient respectivement 22 et 87 mW/m² et diminuaient jusqu'à 4 et 18 mW/m² à
 43 1 m de distance. Concernant le calcul de DAS, en prenant en compte un scénario d'exposition
 44 mettant en jeu un dispositif Wi-Fi émettant à 2,4 GHz avec une puissance de sortie de 100 mW,
 45 les valeurs de DAS maximales dans la tête et dans le torse atteignent les valeurs respectives de
 46 5,7 et 14,4 mW/kg. Ces valeurs sont à mettre en perspective avec celles obtenues dans l'étude
 47 publiée par l'Arcep en 2006 et réalisées par Supélec (Arcep, 2006), qui montraient des valeurs de
 48 DAS pour des cartes Wi-Fi de l'ordre de 10 à 200 mW/kg. L'intégration des émetteurs Wi-Fi dans

1 les ordinateurs portables, en lieu et place des cartes Wi-Fi dont les antennes étaient proéminentes,
2 pourrait expliquer la différence observée entre ces deux études.

3 Parmi les 146 ordinateurs portables investigués, la densité de puissance moyennée serait de
4 $220 \mu\text{W}/\text{m}^2$ à une distance de 50 cm. Le pic de DAS dans la région thoracique à 34 cm de
5 l'antenne serait de $80 \mu\text{W}/\text{kg}$.

6 Pour un scénario pire-cas prenant en compte une classe avec 30 ordinateurs portables et un point
7 d'accès Wi-Fi émettant une densité de puissance maximale à 50 cm, l'exposition des élèves de la
8 classe pourrait atteindre $16,6 \text{ mW}/\text{m}^2$, ce qui est nettement inférieur aux niveaux de référence
9 recommandés par l'Icnirp de $10 \text{ W}/\text{m}^2$.

10 **4.3.2 Caractérisation de l'exposition induite par certains dispositifs** 11 **radioélectriques**

12 Parmi l'ensemble des appareils identifiés sur le marché français par le Laboratoire national de
13 métrologie et d'essais, 12 appareils ont été sélectionnés afin de réaliser des mesures d'exposition
14 au champ électromagnétique :

- 15 – 4 véhicules radiocommandés (jouets) ;
- 16 – 3 veille-bébés (à différentes fréquences, comme indiqué dans le Tableau 6) ;
- 17 – 3 *talkies-walkies* ;
- 18 – 1 module anti-éloignement à fixer sur la chaussure ou la ceinture de l'enfant ;
- 19 – 1 robot communicant.

20 Les appareils ci-dessus ont été choisis afin de constituer un échantillon représentant la diversité
21 des dispositifs, technologies et puissances émises. Le LNE n'a pas eu pour mission de tester de
22 téléphone mobile spécifiquement dédié aux enfants (non disponibles sur le marché français, hors
23 internet). Les informations spécifiques sur l'exposition des enfants aux téléphones mobiles en
24 général sont détaillées dans la section 4.4.

25 En l'absence de données précises sur les niveaux d'émission de ces dispositifs, les objets ont été
26 sélectionnés en fonction de deux critères :

- 27 - objets pour lesquels la consommation électrique est *a priori* importante, compte tenu du
28 nombre de batteries nécessaires, ce qui peut être représentatif de la puissance
29 consommée (ou lié de façon contraire à une importante autonomie, et donc à un temps
30 d'exposition prolongé...) ;
- 31 - les fréquences émises par les appareils, de manière à en choisir plusieurs réparties
32 dans le spectre électromagnétique.

33 Même si les effets bien établis des champs électromagnétiques correspondent à des niveaux
34 d'exposition instantanée intenses ou à une puissance délivrée suffisamment élevée dans le temps
35 pour occasionner un échauffement des tissus, il est intéressant de considérer le temps
36 d'exposition engendré par les différents dispositifs recensés. En effet, il existe de grandes
37 disparités entre les appareils, qui présentent des modes de fonctionnement parfois très différents.
38 Certains peuvent fonctionner en émission pratiquement continue mais de faible intensité, alors que
39 d'autres vont émettre des impulsions très brèves, peu souvent, mais d'intensité plus élevée.
40 Idéalement, la connaissance des intensités crête des champs émis, associée à celle du DAS, qui
41 représente l'absorption d'énergie cumulée dans le temps, permet d'obtenir une vision plus précise
42 de l'exposition engendrée par un dispositif émetteur.

43 Le Tableau 6 décrit les caractéristiques techniques des appareils sélectionnés.

44

45

46

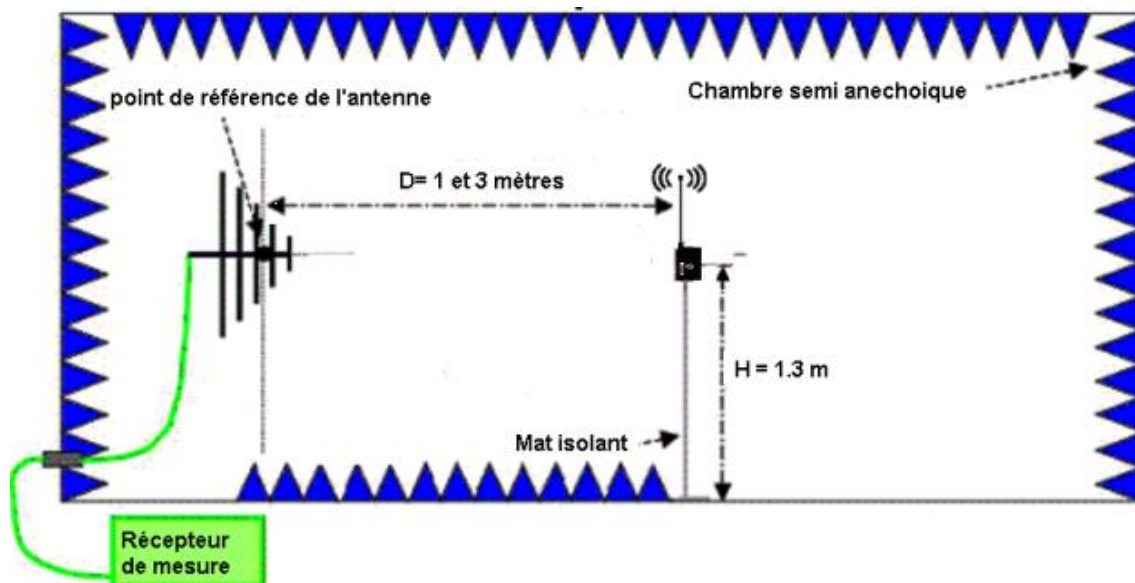
1 Tableau 6 : Liste et descriptif des appareils sélectionnés pour la campagne de mesures

Catégorie	Marque	Désignation	Référence	Fréquence	Alimentation
Veille-bébé	Babymoov	Babyphone video	A014401 / VBC-36	864,81 MHz 2,4166 à 2,45 GHz	Pile 9 V ou secteur
	Badabulle	Bébé Online 500	BC20 / B014000	plusieurs canaux 40,66 et 40,69	Pile 9 V ou secteur
	Chicco	Baby monitor audio digital plus	02500	1,889 GHz (DECT)	7,5 V (3 * 1,5 V) ou secteur
Talkie-walkie	IMC Toys	Talkie-walkie Spiderman	550124	40,685 MHz	Pile 9 V
	Vtech	Talkie-walkie Kidi Talkie	1153	446,022 MHz	Pile 7,5 V (3 * 1,5 V)
	Der echte Scout	Scout Talkie-walkie	19270	40,71 MHz	Pile 9 V
Robot communicant	VIOLET	Karotz	03022011	2,4166 à 2,45 GHz	Batterie 5 V
Module anti-éloignement	Parameo	SOS TEDDY	---	433,94 MHz	Pile au lithium 3,5 V
Véhicule radio commandé	CHICCO	Carolina Cabriolina	---	40,66 MHz	Pile 7,5 V (3 * 1,5 V)
	Smoby	Voiture radio commandée RC Sneider	BAO	27,146 MHz	Pile 9 V
	Chicco	Billy big wheels	---	40,67 MHz	Pile 7,5 V (3* 1,5 V)
	Carrera RC	---	8348	27,094 MHz	Pile 9 V

- 2
- 3 Pour obtenir des mesures comparables entre elles, l'exposition aux champs électromagnétiques a
- 4 été mesurée à deux distances des objets : 1 m et 3 m. Il n'était pas possible de se rapprocher plus
- 5 dans le cadre de cette étude. En effet, les dispositifs fonctionnant aux fréquences les plus basses
- 6 de la sélection, de l'ordre de 27 MHz, émettent en zone de champ proche sur une distance
- 7 relativement grande, au sein de laquelle il est techniquement difficile de réaliser des mesures.
- 8 Afin d'être isolées des perturbations électromagnétiques extérieures (radio AM, FM, Wi-Fi, GSM,
- 9 etc.), les mesures ont été effectuées en chambre faradisée²⁴. La mesure du champ électrique a
- 10 été réalisée à l'aide d'une antenne de mesure large bande couvrant les fréquences de 20 MHz à
- 11 3 GHz, installée avec l'appareil à tester dans une chambre faradisée semi-anéchoïque (pour éviter
- 12 les réflexions parasites). L'antenne a été placée successivement à 3 mètres et 1 mètre de distance
- 13 des jouets, et connectée à un récepteur de mesure, lequel est destiné à afficher les différentes
- 14 fréquences et l'amplitude du signal. Par conséquent, il permet la mesure de la puissance des
- 15 signaux électriques dans le domaine fréquentiel. La Figure 11 illustre le protocole de mesure.
- 16 Les mesures ont été effectuées successivement à 1 et 3 mètres en polarisation verticale et
- 17 horizontale aux fréquences des différents émetteurs.
- 18 Pour chaque mesure, les appareils ont été disposés de telle sorte que leur antenne d'émission soit
- 19 en face de l'antenne de mesure, afin d'obtenir un champ électromagnétique maximum.

²⁴ Une chambre faradisée est une enceinte métallique qui permet d'obtenir une atténuation très importante des rayonnements électromagnétiques provenant de l'extérieur, afin d'éviter toute perturbation des expérimentations.

1 De même, la position de l'antenne de mesure a varié de 1 à 4 m de hauteur, afin de rechercher
2 l'émission maximale des dispositifs. Le récepteur a été configuré en mode « *max hold* » pour
3 retenir la valeur maximale. Il faut noter que compte tenu des signaux complexes émis par ce type
4 d'appareils, il aurait été utile de réaliser des mesures de la puissance maximale émise par ces
5 dispositifs en chambre réverbérante, technique permettant d'accéder à cette caractéristique.



6
7 Figure 11 : Installation de l'équipement en chambre anéchoïque

8

9 Les valeurs mesurées à l'analyseur de spectre sont données en échelle logarithmique, l'unité est
10 le décibel microvolt (dB μ V).

11 Afin d'obtenir la valeur réelle du champ électrique (E), il convient de prendre en compte le facteur
12 d'antenne²⁵, ainsi que les pertes en ligne du câble (plus la fréquence est élevée, plus les pertes
13 sont importantes), entre l'antenne et le récepteur.

14 Les résultats des mesures en polarisation horizontale et verticale sont donnés pour 1 et 3 m, ainsi
15 que la valeur totale du champ électrique (somme quadratique des deux polarisations) (*cf.*

16

17 Tableau 7).

18

²⁵ Le facteur d'antenne est le rapport entre le champ électrique incident et la tension lue par le récepteur en sortie d'antenne.

1
2
3

Tableau 7 : Mesure du champ électrique émis par des dispositifs radioélectriques destinés aux enfants, à 3 mètres et 1 mètre de distance

Catégorie	Marque	Référence	Fréquence	Champ électrique à 1 mètre (mV/m)			Champ électrique à 3 mètres (mV/m)		
				Horizontal	Vertical	Total	Horizontal	Vertical	Total
Veille-bébé	Babymoov	A014401 / VBC-36	864,81 MHz	52	88	103	9	88	55
			2,4166 à 2,45 GHz	23	87	90	4	34	34
	Badabulle	BC20 / B014000	plusieurs canaux 40,66 et 40,69 MHz	76	375	382	18	125	127
	Chicco	02500	DECT 1,889 GHz	693	358	780	303	217	373
Talkie-Walkie	IMC Toys	550124	40,685 MHz	15	107	108	4	55	56
	Vtech	Kiditalkie 1153	446,022 MHz	736	1 489	1 661	610	788	996
	Der echte Scout	19270	40,71 MHz	225	25	227	2	116	116
Module anti-éloignement	Parameo	CL103	433,94 MHz	220	196	294	92	61	110
Robot communicant	VIOLET	Karotz	2,4166 à 2,45GHz	39	171	175	12	87	88
Véhicule radio commandé	CHICCO	Carolina Cabriolina	40,66 MHz	6	42	42	4	18	19
	Smoby	BAO	27,146 MHz	9	50	51	4	34	34
	Chicco	Billy big Wheels	40,67 MHz	14	27	31	2	13	14
	Carrera RC	8348	27,094 MHz	37	273	275	14	149	150

4

1 4.3.2.1 Considérations sur les champs électriques mesurés

2 Les positions des antennes à l'intérieur des jouets sont propres à chaque appareil et ne sont pas
3 forcément verticales. La direction principale d'émission du champ électrique dépend donc de
4 chaque jouet.

5 Pour certains appareils, les mesures n'ont pas été réalisées en condition de champ lointain. Ainsi,
6 à une distance de mesure d'1 mètre, et pour une taille maximum des antennes de 10 cm, les
7 champs aux fréquences inférieures à 300 MHz ne sont pas mesurés en condition de champ
8 lointain. Les fréquences de 40 MHz et 27 MHz ne sont, pour leur part, pas mesurées en champ
9 lointain à 1 m comme à 3 m. Ceci implique l'incertitude élargie pour ces mesures, et une forme de
10 décroissance du champ électrique qui ne s'exprime plus selon l'inverse du carré de la distance r à
11 la source ($1/r^2$), mais selon d'autres formes (notamment $1/r^3$).

12 Ces mesures doivent donc être considérées comme des estimations, qui permettent d'obtenir une
13 approximation du champ électrique émis par les dispositifs testés, et de vérifier notamment que les
14 émetteurs les plus puissants produisent bien les champs les plus intenses. C'est le cas notamment
15 du *talkie-walkie Kiditalkie*, dont la puissance d'émission annoncée de 0,5W explique les niveaux de
16 champs mesurés, relativement élevés en comparaison avec les autres dispositifs. De par sa
17 technologie DECT, utilisée pour les téléphones sans-fil domestiques, l'un des veille-bébés testé
18 est également un émetteur sensiblement plus puissant que les autres.

19 4.3.2.2 Extrapolation des champs aux distances d'utilisation

20 Les veille-bébés peuvent être placés, dans les conditions de pire cas, à proximité des nourrissons
21 dans leur berceau. Une distance minimale de 20 cm de l'enfant a ainsi été prise en compte pour
22 l'extrapolation.

23 Les *talkies-walkies* et les télécommandes des véhicules radiocommandés sont tenus à la main par
24 les enfants. L'antenne d'émission se situe approximativement à 5 cm de la main, mais les enfants
25 peuvent également mettre les antennes très près de la tête. Dans ce cas, même si les
26 revêtements en plastique des antennes empêchent une transmission de l'énergie radioélectrique
27 par conduction, le rayonnement reste très près du visage. On notera que certains constructeurs
28 demandent dans la notice d'emploi de respecter une distance de 5 cm entre le *talkie-walkie* et le
29 corps.

30 Les modules anti-éloignement sont portés par les enfants par-dessus les vêtements. Dans le
31 message publicitaire d'accompagnement de l'appareil testé, il est conseillé d'accrocher le module
32 de réception (qui n'émet pas de signal radiofréquence) à l'enfant, mais les parents peuvent
33 préférer garder avec eux le module de réception qui donne le signal d'alarme lorsque la distance
34 maximale est dépassée et confier l'émetteur à l'enfant. Une distance arbitraire de 2 cm entre
35 l'émetteur et la peau de l'enfant a ainsi été retenue.

36 Les robots communicants ne sont pas destinés à être portés par les enfants. Une distance
37 minimale de 20 cm entre les enfants et ce type d'émetteur a été prise en compte.

38 4.3.2.3 Détermination des valeurs de champ électrique pour les distances considérées.

39 L'estimation de la valeur de champ électrique aux distances considérées ci-dessus nécessiterait
40 d'utiliser par exemple des sondes spécifiques de mesure en champ proche, non disponibles au
41 moment de la réalisation de l'étude. Mieux encore, c'est la mesure du DAS qui permettrait
42 d'obtenir une bonne indication de l'exposition dans ces conditions d'usage, mais les techniques de
43 mesure aux fréquences voisines de 40 MHz ne sont pas encore normalisées ou facilement
44 accessibles. Ainsi, le LNE a proposé de réaliser une approximation uniquement à caractère
45 indicatif des niveaux de champ électrique qu'il serait possible d'observer à proche distance des
46 dispositifs étudiés. Un facteur de proportionnalité du champ avec la distance a donc été estimé,
47 qui, même imparfait, permet donc d'estimer un ordre de grandeur du champ électrique aux
48 distances d'utilisation minimales des dispositifs.

1
2
3

Tableau 8 : Valeurs de champs électriques d'appareils radioélectriques destinés aux enfants

Catégorie	Marque	Référence	Fréquence	Champ électrique total mesuré à 1 m (V/m)	Valeurs limites Icnirp (V/m)	Distance considérée (cm)	Champ électrique extrapolé (V/m)
Veille-bébé	Babymoov	A014401 / VBC-36	864,81 MHz	0,103	40	20	0,5
			2,4166 à 2,45 GHz	0,090	61	20	0,5
	Badabulle	BC20 / B014000	40,66 et 40,69 MHz	0,382	28	20	2
	Chicco	02500	DECT 1,889 GHz	0,780	58	20	4
Talkie-walkies	IMC Toys	550124	40,685 MHz	0,108	28	5	2
	Vtech	1153 (kiditalkie)	446,022 MHz	1,661	29	5	33
	Der echte Scout	19270	40,71 MHz	0,227	28	5	5
Module anti-éloignement	Parameo	CL103	433,94 MHz	0,294	29	2	15
Robot communicant	VIOLET	Karotz	2,4166 à 2,45 GHz	0,175	61	20	1
Véhicule radio commandé	CHICCO	Carolina Cabriolina	40,66 MHz	0,042	28	5	1
	Smoby	BAO	27,146 MHz	0,051	28	5	1
	Chicco	Billy big Wheels	40,67 MHz	0,031	28	5	0,5
	Carrera RC	8348	27,094 MHz	0,275	28	5	6

4

1 Dans le
2
3 Tableau 8, les niveaux de champ « crête » (instantanés) relevés pour les différents appareils
4 testés représentent des pire cas de l'exposition, à comparer aux valeurs limites de l'Icnirp qui ont
5 été pour leur part établies pour une valeur moyenne des champs dans le temps. La modulation du
6 signal des appareils peut donc apporter un facteur de modération aux résultats présentés ci-
7 dessus. Par ailleurs, les valeurs limites de l'Icnirp exprimées en champ électrique (appelées dans
8 ce cas « niveaux de référence »), correspondent aux valeurs maximales d'exposition au champ
9 électrique pour le corps entier, déduites des restrictions de bases exprimées par exemple en DAS.
10 Par conséquent, la comparaison entre les valeurs de champ électrique mesurées ou extrapolées à
11 proximité des sources et les valeurs limites de l'Icnirp doit être interprétée avec précaution, *a priori*
12 comme une situation d'exposition maximale et en tout cas sans valeur réglementaire. En réalité,
13 pour les sources très proches du corps, l'interaction entre le champ électromagnétique et les tissus
14 est complexe, il faudrait donc utiliser des grandeurs « internes » (DAS, courant et champ induits)
15 pour représenter l'exposition, malheureusement très difficiles voire impossibles d'accès à l'heure
16 actuelle, autrement que par des simulations numériques. Dans le cas de l'usage de dispositifs
17 radioélectriques près du corps, les mains, une partie du tronc ou encore la tête, par exemple, sont
18 beaucoup plus exposées que le reste du corps, et l'exposition de ces parties ne peut pas être
19 extrapolée à celle du corps entier.

20 Le champ électrique extrapolé à une distance de 5 cm du *talkie-walkie* « kiditalkie » de Vtech est
21 élevé. Cet appareil de communication pour les enfants est en réalité un véritable *talkie-walkie*
22 identique à celui utilisé par les agents de sécurité. Comme les appareils de ce type, il utilise la
23 technologie d'émission PMR446 (la puissance maximale de ce type de dispositif varie de 0,5 à
24 4 W). Les deux autres *talkies-walkies* pour enfant testés utilisent une technologie différente
25 (émission plus faible et fréquence de 40 MHz). L'émission PMR446 à 446 MHz est une émission
26 continue en modulation de fréquence lorsque le bouton est actionné.

27 La notice d'emploi de l'appareil précise les éléments suivants :

28 « Afin de contrôler l'exposition de l'enfant et d'être en conformité avec les recommandations de la
29 directive R&TTE, il faut toujours respecter ce qui suit :

30 • Appuyer sur la touche Conversation uniquement pour parler.
31 • Relâcher la touche Conversation pour écouter l'interlocuteur.
32 • Ne pas parler plus de 50% du temps lors de la conversation.

33 Pour parler, tenir KidiTalkie à la verticale en gardant le microphone à 5 cm minimum de la bouche.
34 Pour envoyer des messages, placer l'antenne de l'appareil à 5 cm minimum du corps ».

35 Le certificat de conformité aux exigences essentielles de la directive « R&TTE » de l'appareil
36 mesuré, cependant, ne mentionne que des références à des exigences normatives relatives à la
37 compatibilité électromagnétique et à la performance radioélectrique. Aucune norme d'évaluation
38 de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques n'est citée dans le document.

39 L'emploi classique du *talkie-walkie* ne nécessite pas que l'antenne soit accolée à la tête, comme
40 c'est le cas pour un téléphone mobile, cependant, cet usage par des enfants ne peut être
41 totalement exclu.

42 Il semble qu'un certain flou entoure les mesures normatives de l'exposition à ce type de dispositifs.
43 La commission fédérale des communications (FCC²⁶), organisation nord-américaine qui édite
44 notamment des normes de test pour l'exposition humaine aux champs électromagnétiques, prévoit
45 qu'un rapport cyclique de 50 % soit appliqué lors des tests de ces *talkies-walkies*, pour tenir
46 compte du fait qu'ils sont *a priori* utilisés en moyenne la moitié du temps lors d'une conversation

²⁶ Federal Communications Commission

1 entre deux personnes. Cette disposition ne se retrouve pas dans d'autres normes de tests,
2 notamment en Europe. Le 31 mai 2015, la modification des normes EN 300296-1 et EN 300296-2
3 devrait rendre obligatoire l'intégration dans les *talkies-walkies* d'un système « anti-bavard », qui
4 coupera l'émission après 180s, pour redonner la parole à l'autre correspondant...

5 Dans une communication au congrès de l'Union radio-scientifique internationale (Ursi) en 2005,
6 Martens et Vermeeren ont présenté les résultats de mesures et simulations du DAS créé par un
7 *talkie-walkie* positionné à différentes distances d'un fantôme plan et face au visage du fantôme
8 *visible human* (Martens *et al.*, 2005). En-dessous de 15 mm de distance, le DAS moyenné dans
9 10 g est supérieur à 2 W/kg, à la fois dans le cas de la simulation en fantôme plan, et pour le
10 fantôme anatomique. Le DAS obtenu est même supérieur dans ce dernier cas, indiquant que le
11 fantôme plan n'est pas un pire cas par rapport au fantôme anatomique.

12 En conséquence, l'Agence a souhaité obtenir des mesures du DAS engendré par le *kiditalkie*,
13 dans la configuration d'utilisation telle que prévue par le constructeur (à 5 cm de distance), mais
14 aussi dans des configurations raisonnablement prévisibles d'utilisation, c'est-à-dire l'appareil placé
15 contre la tête. L'Agence a ainsi fait réaliser plusieurs essais de mesures de DAS par le laboratoire
16 Emitech, accrédité par le Cofrac (Comité français d'accréditation).

17 *Mesure de DAS selon la norme EN 62209-2*

18 Le *talkie-walkie kiditalkie* a été testé selon la norme EN 62209-2 pour évaluer la conformité des
19 dispositifs de communications sans fils tenus à la main ou portés près du corps avec les
20 restrictions de base de la Recommandation du Conseil Européen 1999/519/CE, Annexe II.
21 L'appareil est testé dans la configuration prévue dans le manuel d'utilisation, à savoir lorsque le
22 dispositif est tenu devant le visage à une distance minimale de 5 cm. L'appareil est également
23 testé dans une situation de pire cas, lorsqu'il est porté en contact avec le corps (distance nulle).
24 L'échantillon testé a été déclaré conforme selon la norme EN 62209-2 dans les deux
25 configurations de test, avec des valeurs de DAS respectivement de 0,03 W/kg et de 0,16 W/kg.
26 Ces valeurs intègrent un facteur de réduction de 0,5, correspondant à une utilisation maximale
27 pendant 50 % du temps, telle que recommandée par le constructeur. Même en considérant un
28 facteur de charge de 100 %, le DAS reste inférieur à la valeur limite de 2 W/kg. Il faut noter que
29 l'appareil a également été testé à une distance de 2,5 cm du corps, distance par défaut pour ce
30 type d'appareils prévue par la norme, produisant une valeur de DAS tout à fait cohérente avec les
31 résultats obtenus à 0 cm et 5 cm de distance.

32 *Mesure de DAS du talkie-walkie porté à l'oreille*

33 Afin de tester d'autres configurations d'usage que celles prévues par le constructeur, l'Agence a
34 fait mesurer l'appareil lorsqu'il est porté à l'oreille, correspondant par exemple à une situation de
35 mauvaise réception sonore, incitant l'enfant à porter l'écouteur de l'appareil contre son oreille.
36 Dans cette situation, compte tenu de la taille et de la forme de l'appareil, l'antenne externe se
37 trouve relativement éloignée de la tête, et le DAS mesuré corrigé (facteur de charge de 50 %) est
38 de 0,11 W/kg.

39 En conclusion, les mesures de DAS, réalisées par le laboratoire de mesures accrédité par le
40 Cofrac, ont mis en évidence un DAS maximum inférieur à 0,35 W/kg, lorsque le *talkie-walkie* est
41 placé contre le corps.

42

4.4 Spécificités de l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques

L'augmentation de l'utilisation des appareils de télécommunications parmi les jeunes a conduit à orienter les recherches sur les différences d'exposition aux champs électromagnétiques entre les enfants et les adultes. Les deux principaux facteurs qui pourraient induire une différence d'exposition entre les adultes et les enfants sont les différences des propriétés diélectriques des tissus en fonction de l'âge et les spécificités morphologiques des enfants (taille du corps, épaisseur des os, etc.). En effet, le DAS, représentant l'absorption d'énergie électromagnétique dans les tissus biologiques, exprimé en W/kg, est fonction du champ électrique local interne dans le corps et de la conductivité électrique des tissus en tout point :

$$DAS = \frac{\sigma E^2}{2\rho}$$

avec E le champ électrique (V/m), σ (S/m) la conductivité électrique des tissus et ρ (kg/m^3) leur masse volumique.

Les milieux biologiques, d'un point de vue électromagnétique, sont des matériaux à la fois non magnétiques, conducteurs d'ions et diélectriques à pertes (c'est-à-dire absorbant de l'énergie électromagnétique). La présence d'ions (charges électriques libres) dans les tissus biologiques explique la possibilité de circulation de courants de conduction (loi d'Ohm, reliant la densité de courant au champ électrique par la conductivité électrique). Les ions, sous l'effet d'un champ électrique, peuvent en effet se déplacer ainsi plus ou moins librement, en fonction notamment de la fréquence du champ appliqué. Les molécules polaires électriques (par exemple la molécule d'eau), soumises à des champs électriques de sens alternatifs, participent aussi aux frottements induits et donnent ainsi aux milieux biologiques leur caractère diélectrique à pertes, conduisant à la transformation de l'énergie électromagnétique apportée en énergie mécanique, et en chaleur. La polarisation de la matière (orientation des dipôles électriques) sous l'action d'un champ électrique a pour effet de générer un courant de déplacement, relié au champ électrique par la permittivité du milieu.

La conductivité électrique du milieu (σ en *Siemens/m*) représente donc le facteur de proportionnalité entre la densité de courant qui circule dans la matière et le champ électrique qui a mis en mouvement les charges électriques.

La permittivité relative (ou constante diélectrique) du matériau représente la capacité de polarisation du matériau (orientation des molécules dipolaires), et ce faisant, indirectement, sa capacité à transformer l'énergie électromagnétique reçue en énergie de frottement, donc potentiellement en énergie thermique ; c'est une grandeur sans unité. L'annexe 6 décrit plus précisément les caractéristiques diélectriques des tissus biologiques du point de vue électromagnétique.

Les premières études dosimétriques ont utilisé des modèles humains adultes qui ont été ajustés proportionnellement à la taille des enfants (Gandhi et al. 1996, Gandhi & Kang 2001, Wang & Fujiwara 2003). Puis, les tissus de divers mammifères à différents âges ont été utilisés pour modéliser l'évolution des propriétés diélectriques au cours de la vie (cf. (Peyman et al. 2001, 2009). Ces modèles paramétriques ont été développés pour reproduire la conductivité et la permittivité relative dans certains tissus en fonction de la fréquence des rayonnements et de l'âge de l'individu. Plus récemment, des modèles de crâne d'enfants ont été développés, en utilisant des images d'IRM pour obtenir une représentation plus réaliste de la morphologie des enfants. Plus généralement, la modélisation a bénéficié des avancées permises notamment par le *Visible human project*²⁷, représentation numérique d'un corps humain (homme et femme) « normal »

²⁷ http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html.

1 obtenue à partir de sections d'1 mm d'épaisseur pour l'homme et d'un tiers de millimètre pour la
2 femme issues de données d'imagerie médicale ou de cadavres cryogénisés.

3 Les fantômes numériques disponibles aujourd'hui sont relativement nombreux, offrant une certaine
4 diversité morphologique qui n'existait pas encore au milieu des années 1990. On trouve ainsi les
5 fantômes suivants :

6 masculins

- 7 - l'anglais *Norman* (*normalized man*) (Dimbylow 1997) ;
- 8 - le coréen *ETRI* ; (Lee *et al.*, 2006)
- 9 - le coréen *HDRK* ; (Kim *et al.*, 2008) ;
- 10 - le japonais *Taro* (Nagaoka *et al.*, 2004) ;
- 11 - l'américain *Zubal* (Zubal *et al.*, 1994) ;
- 12 - l'américain *Visible Human* (Ackerman 1998, Mason *et al.*, 2000) ;

13 féminins

- 14 - la japonaise *Hanako* (Nagaoka *et al.*, 2004) ;
- 15 - l'anglaise *Naomi* (aNAAtOMIcal Women) (Dimbylow 2005) ;

16 femmes enceintes

- 17 - différents âges gestationnels (Wu *et al.*, 2006) ;
- 18 - corps tronqué avec un fœtus de 28 semaines (Hand *et al.*, 2006) ;
- 19 - Modèle hybride à 28 semaines (Nagaoka *et al.*, 2006) et 26 semaines (Nagaoka *et al.*,
20 2007) ;
- 21 - des représentations mathématiques représentant une mère et le fœtus à 8, 13, 26 et
22 38 semaines de gestation (Dimbylow 2006) ;

23 enfants

- 24 - la fille Karla de 6 ans ;
- 25 - un garçon coréen de 7 ans ;

26 familles

- 27 - la *Virtual Family* (Christ *et al.*, 2007), avec une femme (Ella), un homme (Duke), un
28 garçon de 6 ans (Thelonus) et une fille de 11 ans (Billie) ;
- 29 - et la *Virtual Classroom* (Szczerba *et al.*, 2010), composée d'une fille âgée de 5 ans
30 (Roberta), d'une fille âgée de 8 ans (Eartha), d'un garçon âgé de 8 ans (Dizzy) et d'un
31 garçon âgé de 14 ans (Louis).

32

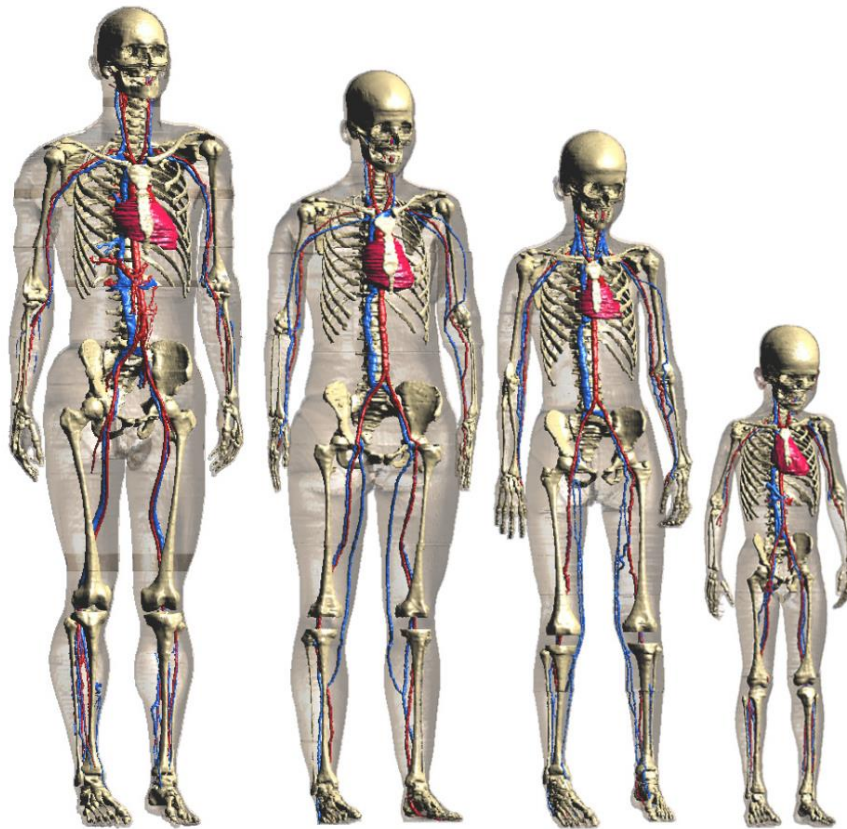


Figure 12 : La famille virtuelle : Duke, Ella, Billie, Thelonious (Christ *et al.* 2007)

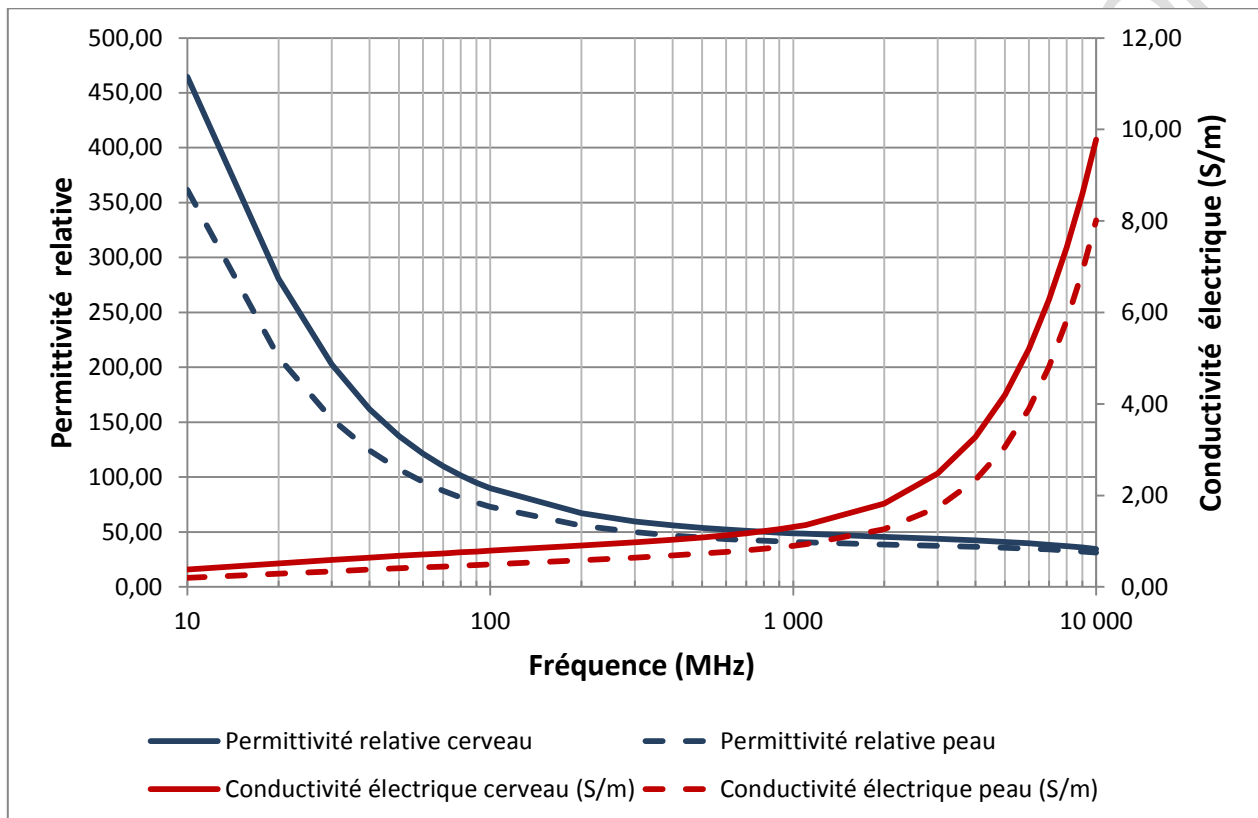
4.4.1 Influence des propriétés diélectriques (permittivité et conductivité)

Dans les précédents rapports de l'Agence sur les effets sanitaires des radiofréquences (Afsset 2009 ; Anses 2013) figurent des éléments détaillés sur la caractérisation de l'exposition aux radiofréquences au moyen de la mesure du DAS. Deux paramètres des tissus influent sur la valeur du DAS. D'une part, la permittivité relative des tissus, qui dépend de la fréquence des rayonnements, influe sur l'absorption des rayonnements par les tissus et donc la valeur du champ électrique interne. D'autre part, la conductivité électrique, également dépendante de la fréquence et de la nature des tissus, intervient directement dans le calcul du DAS.

La littérature scientifique concernant les propriétés diélectriques des tissus biologiques est abondante, les premières publications remontent aux années 1945-50, en lien avec le développement des technologies radar. C. Gabriel a contribué activement à recenser des données animales et humaines, produisant ainsi une publication de référence en 1996 (Gabriel 1996). Si la plupart des données concernant les propriétés diélectriques des tissus biologiques proviennent de mesures faites dans diverses espèces de mammifères (rat, cochon, mouton ou lapin), des données humaines sont également disponibles. Elles ont été recueillies lors d'autopsies, ou pour des tissus comme la peau et la langue par des mesures effectuées *in vivo*. Dans le rapport de C. Gabriel publié en 1996²⁸, il est précisé que les tissus animaux ont été utilisés principalement dans les deux heures suivant la mort, alors que les propriétés des tissus humains ont pu être mesurées 24 à 48 heures après le décès. Les sondes coniques utilisées avec les analyseurs d'impédance nécessitent des échantillons relativement grands, au moins un cube de 5 cm de côté. En conséquence, il est difficile d'obtenir des mesures fiables aux basses fréquences.

²⁸ <http://niremf.ifac.cnr.it/docs/DIELECTRIC/Report.html>.

1 D'autres références existent, dont certaines basées sur des modèles (par exemple le modèle de
2 Cole-cole (Cole & Cole 1941)).
3 La fondation de recherche suisse It'is, spécialisée dans les technologies liées à la recherche des
4 effets biologiques des champs électromagnétiques, met à disposition, en ligne, une base de
5 données des paramètres diélectriques dans les différents tissus aux différentes fréquences. Cette
6 base de données a été construite à partir des éléments fournis par C. Gabriel et de la littérature
7 ultérieure. La Figure 13 présente les variations de permittivité et de conductivité diélectriques pour
8 les tissus de la peau et du cerveau, en fonction de la fréquence, issus de cette base de données,
9 pour des adultes.
10
11



12 Figure 13 : Propriétés diélectriques des tissus de la peau et du cerveau en fonction de la fréquence
13

14 4.4.1.1 Variations des propriétés diélectriques avec l'âge

15 Peyman *et al.* (2001) ont étudié la variation des propriétés diélectriques des tissus de rats en
16 fonction de leur âge, dans la bande 130 MHz à 10 GHz (Peyman *et al.* 2001). Les résultats
17 montrent une décroissance générale des valeurs de propriétés diélectriques avec l'âge. Cette
18 tendance est plus marquée pour le cerveau, les os et la peau, et moins pour les tissus
19 abdominaux. La variation des propriétés diélectriques s'explique par les modifications de la teneur
20 en eau et de la composition des tissus. En 2007 et 2009, cette même équipe a étudié la sensibilité
21 du DAS à la variation des propriétés électromagnétiques dans des modèles d'enfants d'environ 3
22 et 7 ans et d'adultes exposés à des champs électromagnétiques de fréquences comprises entre
23 450 MHz et 2,4 GHz. Pour cela, elle a utilisé les propriétés diélectriques de tissus de porc de 10 kg
24 (correspondant à un enfant de 1 à 4 ans), de 50 kg (enfant de 11-13 ans) et de 250 kg (adultes),
25 considérant que l'animal était un bon substitut au tissu humain en ce qui concerne les propriétés
26 diélectriques et leur évolution en fonction de l'âge. Les résultats montrent une réduction
27 significative de la permittivité et de la conductivité avec l'âge sur 10 des 15 tissus évalués. La
28 variation de la teneur en eau des tissus en fonction de l'âge est avancée par les auteurs pour
29 expliquer les différences dans les valeurs de paramètres diélectriques. D'une manière générale,

1 plus les tissus sont jeunes, plus ils contiennent d'eau, et plus les valeurs des paramètres
 2 diélectriques sont élevées. Aux fréquences micro-ondes utilisées pour les communications mobiles
 3 (> 300 MHz), la diminution de la permittivité et de la conductivité avec l'âge serait ainsi due à la
 4 diminution de la teneur en eau des tissus au fur et à mesure de la croissance de l'animal, alors
 5 qu'à des fréquences plus basses, c'est la structure cellulaire des tissus qui a un effet majeur
 6 (Peyman et al. 2009, Peyman 2011a).

7 Ibrani *et al.* (2011) ont construit un modèle mathématique pour évaluer les propriétés
 8 électromagnétiques des tissus (peau, muscle, tissu cérébral) à différents âges des enfants, en se
 9 basant sur leur courbe de croissance (poids et tailles moyens) et sur le recueil des propriétés
 10 électriques des adultes de Gabriel (1996) (Ibrani *et al.* 2011). Les auteurs ont supposé que le
 11 corps humain est schématiquement composé d'eau et de tissus spécifiques de l'organe considéré.
 12 Bien que la composition de l'organe (concentration et nature des protéines, *etc.*) évolue au cours
 13 du temps, les auteurs ont admis que les tissus spécifiques de l'organe ne varient pas en fonction
 14 de l'âge, tandis que la teneur en eau intrinsèque à l'organe évolue au fil des années. Les variations
 15 de permittivité en fonction de l'âge et de la fréquence et du tissu sont reportées dans la Figure 14.

16

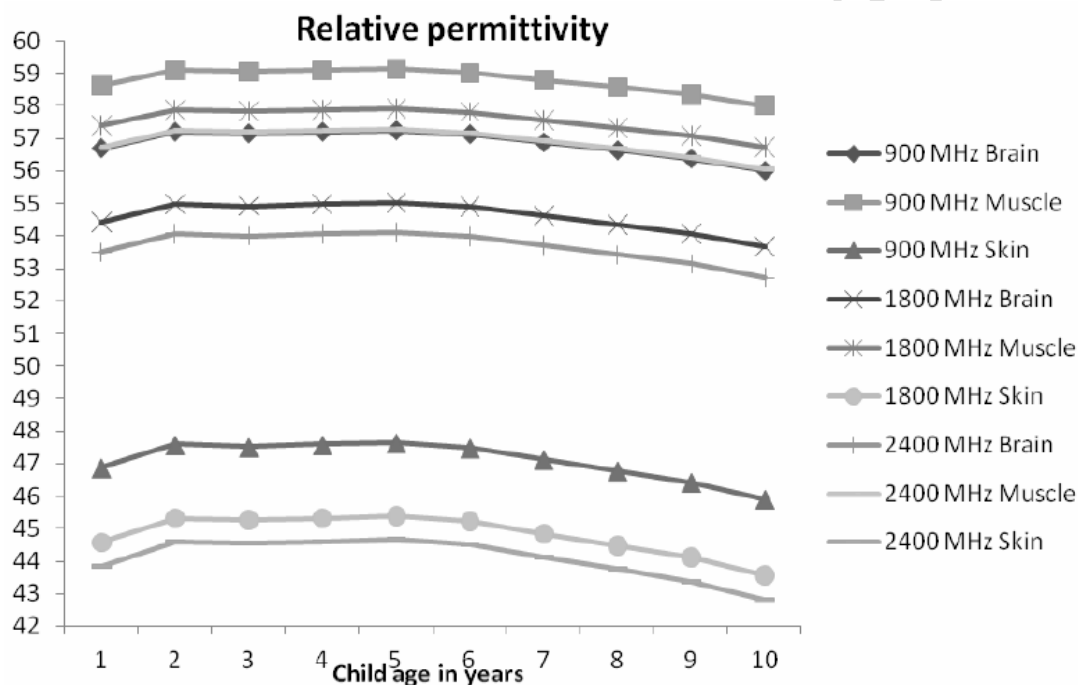
Source : Ibrani *et al.* 2011

Figure 14 : Permittivité relative des tissus en fonction de l'âge de l'enfant et de la fréquence d'émission

17

18

19

20

21 La différence de permittivité de la peau entre un enfant de 5 ans et un enfant de 10 ans pour la
 22 même fréquence, d'après le modèle d'Ibrani *et al.*, est inférieure à 5 %. Chez un enfant de 5 ans,
 23 la différence entre les permittivités de la peau à 900 MHz, 1 800 MHz et 2,4 GHz atteint 6 %. Pour
 24 le tissu musculaire, la différence entre les permittivités d'un enfant de 5 et 10 ans à 900 MHz est
 25 inférieure à 2 %. La différence de permittivité entre une fréquence de 900 MHz et 2,4 GHz est
 26 d'environ 3 %. Les valeurs de permittivité les plus élevées sont obtenues pour le cerveau et les
 27 plus basses pour la peau. Les auteurs notent une différence d'au plus 10 % entre un enfant et un
 28 adulte pour la permittivité des tissus musculaires (Ibrani *et al.*, 2011). Le comportement de la
 29 conductivité en fonction de l'âge est similaire à celui de la permittivité.

30 Ainsi, dans le cerveau, l'augmentation de la myélinisation et la diminution du contenu en eau en
 31 fonction de l'âge serait la raison de la baisse de la permittivité et de la conductivité de la matière
 32 blanche (pas de variation observée pour la matière grise) et de la moelle osseuse en fonction de

1 l'âge chez le cochon (Peyman *et al.* 2007). Les os présentent les variations de la teneur en eau les
2 plus importantes, en raison du degré de minéralisation de la matrice osseuse qui se calcifie durant
3 la croissance, conduisant à une baisse significative de la permittivité et de la conductivité. La
4 moelle osseuse présente des variations de propriétés diélectriques parmi les plus importantes. Elle
5 est composée de moelle rouge, lieu de synthèse des globules rouges et blancs, et de moelle jaune
6 qui contient des cellules graisseuses, du tissu conjonctif et qui produit certains globules blancs.
7 Chez les animaux en croissance, la moelle rouge est prépondérante, alors que chez les animaux
8 plus âgés, la proportion de graisse devient plus importante, et la moelle osseuse est
9 majoritairement jaune. La moelle rouge contient plus d'eau que la moelle jaune, ce qui lui confère
10 des valeurs de propriétés diélectriques supérieures (Peyman *et al.* 2009).

11 4.4.1.2 Impact des variations des propriétés diélectriques sur le DAS

12 Un nombre limité d'études a utilisé des propriétés diélectriques des tissus spécifiques de l'âge des
13 modèles de tête et/ou de corps d'enfants pour calculer le DAS résultant de l'exposition aux
14 champs électromagnétiques. Dans certaines publications, les propriétés diélectriques ont été
15 calculées en utilisant celles de l'adulte et en les ajustant pour un tissu plus jeune, en faisant
16 l'hypothèse de teneurs en eau plus élevée (*cf.* la revue de (Peyman 2011b)).

17 Peyman *et al.* (2001) ont mis en évidence, à partir d'expériences réalisées chez le rat de la
18 naissance à l'âge adulte, que les modifications en fonction de l'âge de la conductivité et de la
19 permittivité de différents tissus n'avaient qu'un impact limité sur le DAS (Peyman *et al.* 2001).

20 De même Gabriel (2005) ont utilisé les propriétés diélectriques de tissus de rats à différents âges
21 pour évaluer l'exposition de modèles de rats à des ondes planes à 27, 160, 400, 900 et 2 000 MHz
22 (Gabriel 2005). Trente-quatre tissus ont été pris en compte dans 3 modèles de rats (âge : 10, 30 et
23 70 jours). Les résultats montrent que bien que la variation des propriétés diélectriques modifie le
24 DAS local, les effets sur le DAS corps entier sont faibles. Les auteurs notent qu'il est important de
25 différencier les modifications des propriétés des tissus d'autres facteurs qui peuvent affecter
26 l'exposition, comme la taille de l'animal ou la polarisation et la direction du champ (voir § ci-
27 dessous).

28 Peyman *et al.* (2009) ont étudié la sensibilité du DAS aux variations des propriétés diélectriques de
29 modèles d'enfants et d'adultes exposés à des *talkies-walkies* à 446 MHz (utilisation pour les
30 modèles de tête de tissus de cochon à différents âges). Ces auteurs ont montré que les variations
31 du DAS_{10g}²⁹ étaient inférieures à 10 % et ne reflétaient donc pas l'importance des variations des
32 propriétés diélectriques avec l'âge pourtant observées. *In fine*, les DAS obtenus étaient compris
33 dans les valeurs limites d'exposition recommandées (Icniirp). Ceci pourrait être lié au fait que le
34 DAS_{10g} résulte d'un moyennage spatial du DAS local, avec pour conséquence de diluer les effets
35 de variations des propriétés diélectriques, en donnant plus de poids à l'influence de l'absorption
36 dans la peau par rapport aux autres tissus (Peyman *et al.* 2009).

37 Ces résultats ont été complétés par des expérimentations plus récentes. Ainsi, Christ *et al.* (2010)
38 ont évalué l'impact des variations des propriétés diélectriques en fonction de l'âge sur l'absorption
39 locale et globale dans le crâne, en utilisant plusieurs modèles de tête humaine (âges : 3, 6, 7, 11,
40 34 et 38 ans) (Christ, Gosselin, Christopoulou, *et al.* 2010). Les valeurs de permittivité et de
41 conductivité utilisées étaient celles de Peyman *et al.* (2009) et de Gabriel *et al.* (1996). Les
42 simulations réalisées ont montré notamment que l'exposition à un téléphone mobile dans deux
43 bandes de fréquences (à 900 et 1 800 MHz) de certaines régions du cerveau de jeunes enfants,
44 telles que l'hypothalamus et l'hippocampe, pouvait dans ces conditions dépasser l'exposition des
45 adultes d'un facteur 1,6 à 3,2. De même, l'exposition de la moelle osseuse des enfants pouvait
46 dépasser celle des adultes de 10 dB (facteur 10), à cause de la grande diminution de la
47 conductivité de ce tissu avec l'âge. Toujours dans cette étude, l'exposition des yeux des enfants a

²⁹ DAS_{10g} = DAS évalué sur 10 grammes de tissus contigus, soit approximativement un cube de 2,2 cm de côté.

1 été estimée supérieure à celle des adultes. Les régions du cerveau situées à proximité du
2 téléphone mobile peuvent par ailleurs révéler de grandes différences d'exposition entre les adultes
3 et les enfants. Par exemple, le cervelet des enfants peut présenter un DAS maximal supérieur de
4 4 dB (soit un rapport 2,5) par rapport à l'exposition locale chez les adultes. Les auteurs de cette
5 étude soulignent que, conformément aux résultats d'études antérieures, le DAS moyenné dans la
6 tête entière n'est pas plus élevé chez les enfants que chez les adultes.

7

DOCUMENT EN CONSULTATION

1
2
3

Tableau 9 : Études investiguant les propriétés diélectriques des tissus et les conséquences de leurs variations sur le DAS

Auteurs	Modèles biologiques	Gamme de fréquences	Principales conclusions
Peyman <i>et al.</i> , 2001	Dix tissus de rats de différents âges	130 MHz – 10 GHz	Diminution de la permittivité et de la conductivité en fonction de l'âge.
Gabriel 2003	Cerveau, peau, squelette de rat	300 kHz – 300 MHz	Autour de 100 MHz, la permittivité et la conductivité diminuent linéairement quand l'âge augmente. La variation des propriétés diélectriques, liées au contenu des tissus en eau, affecte le DAS corps entier dans une proportion de moins de 5 %, dans un scénario pire-cas. À des fréquences plus basses, les propriétés diélectriques varient avec l'âge, en raison des modifications des structures cellulaires.
Peyman <i>et al.</i> , 2007	Tissu cérébrospinal de porc ; mesures <i>in vitro</i> et <i>in vivo</i>	50 MHz – 20 GHz	Diminution de la permittivité et de la conductivité dans la matière blanche et dans la moelle épinière avec l'âge, mais pas dans la matière grise.
Peyman <i>et al.</i> , 2009	Quinze tissus de porc	50 MHz – 20 GHz	Diminution de la permittivité et de la conductivité avec l'âge dans 10 des 15 tissus investigués. Les variations sur le DAS moyenné dans 10 g sont inférieures à 10 % et ne reflètent pas les variations sur les propriétés diélectriques.
Christ <i>et al.</i> , 2010	Modèle mathématique	900 et 800 MHz	Les variations des propriétés diélectriques n'entraînent pas de modifications importantes du DAS moyenné dans la tête entière. En revanche, certaines régions du cerveau peuvent être plus exposées chez les enfants que chez les adultes (hypothalamus, hippocampe ainsi que la moelle osseuse), des augmentations du DAS local d'un facteur 10 sont ainsi retrouvées dans la moelle osseuse.
Ibrani <i>et al.</i> , 2011	Modèle mathématique à partir de valeurs adultes corrigées en fonction des courbes de croissance des enfants	900 MHz ; 1 800 MHz ; 2,4 GHz	Une variation des propriétés diélectriques des tissus est observée en fonction de l'âge pour le cerveau, le tissu musculaire et la peau, pour toutes les fréquences étudiées.

4.4.2 Influence des différences morphologiques sur l'exposition

Initialement, les études dosimétriques se sont focalisées sur le crâne, qui est la partie du corps la plus exposée lors de l'utilisation d'un téléphone mobile en mode de conversation sans kit mains-libres, écouteur contre l'oreille. Plus tard, il est devenu possible de calculer l'exposition pour le corps entier en utilisant des modèles adaptés. Les premiers travaux utilisaient des modèles d'adultes linéairement mis à l'échelle des enfants.

4.4.2.1 Exposition des fœtus

À l'origine, la mesure de l'exposition des fœtus aux radiofréquences a principalement concerné des applications spécifiques, comme les détecteurs de métaux, à des fréquences de quelques MHz (Kainz *et al.*, 2003,) et des dispositifs d'imagerie IRM à plusieurs dizaines de MHz (Wu *et al.* 2006 ; Hand *et al.*, 2006).

Des représentations mathématiques d'une femme et d'un fœtus à 8, 13, 26 et 38 semaines de gestation ont été réalisées, ainsi que des modèles numériques de femmes enceintes à divers âges gestationnels (Wu *et al.*, 2006). Dimbylow (2007) a développé un modèle de femme enceinte en combinant une femme non enceinte et un modèle mathématique de fœtus (Dimbylow 2007). On trouve également dans la littérature un modèle de corps tronqué d'une mère portant un fœtus de 28 semaines (Hand *et al.*, 2006), ainsi que des modèles hybrides à 28 semaines (Nagaoka *et al.* 2006) et 26 semaines (Nagaoka *et al.*, 2007).

Dimbylow et Bolch ont évalué le DAS corporel dans les modèles NAOMI de femme enceinte et non enceinte pour des fréquences entre 20 MHz et 3 GHz (Dimbylow & Bolch 2007). Le DAS corporel dans le modèle de femme enceinte est inférieur au DAS du modèle de femme non enceinte, avec un écart en augmentation en fonction de l'âge gestationnel, pour être inférieur de près de 15 % chez la femme enceinte à 28 semaines. Ceci s'explique par le fait que le DAS corporel est inversement proportionnel à la masse, qui augmente pendant la grossesse, alors que la taille ne change pas. L'étude a également montré que le DAS corps entier du fœtus était maximal à 70 MHz, lorsque la mère était isolée électriquement du sol, et que les niveaux de DAS étaient inférieurs pour le fœtus à ceux de la mère.

L'exposition à une onde plane d'un modèle japonais de femme enceinte (26 semaines de gestation) a été examinée par Nagaoka *et al.* (2007). Le DAS corporel calculé a révélé une faible différence par rapport au modèle de femme non enceinte. Le modèle de nouveau-né féminin de l'Université de Floride a été utilisé pour évaluer le DAS à différentes fréquences : une résonance primaire a été observée à environ 400 MHz, et une résonance secondaire à 900 MHz (Dimbylow *et al.*, 2010).

En modélisant uniquement la région de l'abdomen, et en étudiant 9 âges gestationnels différents, Wu *et al.* (2006) ont montré une augmentation significative du DAS et de la température pour les femmes en fin de grossesse. Nagaoka *et al.* (2007) ont produit un modèle de femme enceinte plus réaliste, en intégrant un modèle de fœtus issu de données IRM à l'intérieur d'un modèle de femme non enceinte. Les courants induits et le DAS des fœtus sont généralement équivalents ou inférieurs aux courants induits et au DAS de la mère.

Aux fréquences microondes, les champs électromagnétiques sont plus vite atténués qu'aux fréquences plus basses, l'énergie électromagnétique qui atteint le fœtus est donc négligeable en comparaison. Une étude utilisant le modèle de femme enceinte de Nagaoka a montré que le DAS moyen dans le fœtus était inférieur à celui de la mère tenant un téléphone mobile à proximité de son abdomen (Togashi *et al.*, 2008).

Pour des résultats plus précis, il serait nécessaire de mieux connaître les paramètres diélectriques des femmes enceintes et des fœtus. Kawai *et al.* (2006) ont rapporté que la conductivité de fœtus de lapins est 1,3 fois supérieure à celle du muscle à 150 MHz. Le DAS local moyenné dans 10 g dans le fœtus exposé au signal d'un terminal radio de puissance 5 W, à 150 MHz, a été estimé inférieur à 1,5 W/kg. Des progrès restent également à accomplir dans le domaine de la simulation des accroissements de température, dans la mesure où les seuils d'effets thermiques ne sont pas

1 connus. Les mêmes auteurs (Kawai *et al.*, 2010) ont par la suite montré que le DAS moyen
2 d'embryons exposés à des ondes planes de puissance incidente inférieure aux niveaux de
3 référence de l'Icnirp était inférieur à 0,08 W/kg.

4 4.4.2.2 Exposition du crâne

5 Certaines études ont montré des DAS plus élevés dans le crâne de modèles d'enfants par rapport
6 aux adultes (Anderson 2003, Fernandez *et al.* 2005, Wiart *et al.* 2008) alors que d'autres ne
7 montrent pas de différence ou ne concluent pas définitivement (Martínez-Búrdalo *et al.* 2004,
8 Christ & Kuster 2005, Keshvari & Lang 2005, Wang, Fujiwara, & Watanabe 2006, Wang, Fujiwara,
9 Kodera, *et al.* 2006, Lee *et al.* 2007, Wiart *et al.* 2007)

10 En utilisant un modèle de crâne d'enfant linéairement mis à l'échelle à partir de modèles d'adultes,
11 Gandhi *et al.*, en 1996, ont observé une pénétration des rayonnements plus profonde et une
12 augmentation du DAS maximum évalué sur 1 g de tissu dans les crânes des enfants. Cependant,
13 cette approche ne tient pas compte du fait que les dimensions relatives des tissus cérébraux
14 dépendent elles aussi de l'âge. En effet, la tête d'un enfant n'est pas la tête d'un adulte en
15 réduction. Le cerveau humain grandit rapidement jusqu'à 3 ans et atteint sa taille adulte entre 6 et
16 14 ans ; à l'âge de 5 ans, le cerveau pèse déjà 90 % de son poids final (Huttenlocher 1979).

17 Anderson (2003) a calculé le DAS dans un modèle de tête d'adultes et d'enfants exposés à des
18 rayonnements radiofréquences émis par une antenne dipôle à une fréquence utilisée dans les
19 communications mobiles (900 MHz). Le modèle utilisé est une sphère comprenant 3 couches
20 concentriques de tissus (peau, squelette et cerveau) d'épaisseurs différentes. Les données
21 utilisées pour obtenir un modèle représentatif sont la conductivité des tissus, obtenue par les lois
22 de mélange à partir de la teneur en eau du corps, l'épaisseur du crâne, l'épaisseur du cuir chevelu,
23 l'épaisseur de l'oreille et la taille de la tête. Huit modèles différents ont été construits : quatre
24 modèles représentant des enfants de 4, 8, 12 et 16 ans, un modèle d'un jeune adulte de 20 ans, et
25 deux autres modèles d'adultes ont été réalisés pour représenter la variation du DAS dans la
26 population adulte. Comparés au DAS moyen chez les adultes, le DAS maximum moyenné sur 1 g
27 pour un enfant de 4, 8, 12, et 16 ans est augmenté respectivement d'un facteur 1,38, 1,28, 1,17 et
28 1,08. Les facteurs correspondants pour un DAS moyenné sur 10 g sont 1,31, 1,23, 1,15, 1,07,
29 montrant une tendance similaire bien que moins prononcée. Ces modèles ont été par ailleurs
30 comparés à un modèle sphérique utilisant les valeurs des propriétés diélectriques du fantôme SAM
31 (*Specific Anthropomorphic Mannequin*) utilisé pour les tests de conformité des téléphones mobiles
32 dans les documents normatifs. Les valeurs de DAS obtenues avec le modèle sphérique SAM
33 étaient supérieures à celles de tous les autres modèles, adultes et enfants. D'après cette étude, le
34 paramètre le plus influent pour la valeur du DAS est l'épaisseur des os du crâne par rapport au
35 volume de la tête. Ceci pourrait expliquer l'augmentation de la profondeur de pénétration des
36 ondes dans le cerveau chez l'enfant, comparée à l'adulte.

37 Martínez Burdalo *et al.*, (2004) ont calculé le DAS maximal moyenné dans 1 et 10 g de tissus et
38 dans la tête entière, sur un modèle numérique de tête. Dans un modèle linéairement mis à
39 l'échelle, le DAS maximal a tendance à diminuer avec la taille de la tête, tandis que le DAS dans la
40 tête entière, et donc le pourcentage d'énergie absorbée augmente. Des différences sont par
41 ailleurs observées entre les résultats obtenus à 900 MHz et 1 800 MHz, ainsi qu'en fonction des
42 épaisseurs du crâne considérées. Les auteurs suggèrent donc que le DAS moyenné dans le
43 cerveau entier serait plus élevé chez les enfants que chez les adultes (Martínez-Búrdalo *et al.*
44 2004).

45 Keshvari et Lang (2005) ont calculé le DAS en utilisant des modèles anatomiques de 2 adultes et 2
46 enfants, âgés de 3 et 7 ans. Aucune différence significative n'a été trouvée dans le DAS maximal
47 entre les adultes et les enfants. Les auteurs ont conclu que les différences de DAS observées
48 entre les adultes et les enfants proviendraient plutôt de la différence interindividuelle dans
49 l'anatomie ou la géométrie de la tête que de l'âge de l'individu. Il semblerait en effet que la forme
50 externe du crâne et la distribution des différents tissus dans la tête joue un rôle significatif dans
51 l'absorption de l'énergie. De même, l'inclusion ou l'exclusion du pavillon de l'oreille dans le modèle,

1 en modifiant la distance entre l'antenne et le tissu cérébral, induit une différence non négligeable
2 dans la quantité d'énergie absorbée (Keshvari & Lang 2005).

3 Bit Babik *et al.*, (2005) ont comparé des modèles d'enfant linéairement réduits et adaptés selon la
4 forme spécifique du crâne juvénile. Le DAS maximal moyenné dans 1 g et dans 10 g de tissus et
5 la profondeur de pénétration de l'énergie étaient à peu près équivalents dans tous les modèles,
6 pour les mêmes conditions d'exposition.

7 Dans leur revue publiée en 2005, Wiart *et al.* indiquent que le DAS maximal moyenné dans 10 g
8 dans un modèle d'enfant de 12 ans obtenu à partir d'un modèle d'adulte réduit de façon non
9 uniforme et de données IRM (imagerie par résonance magnétique) est 30 % supérieur à celui
10 obtenu dans la tête adulte. Le DAS induit dans différents tissus cérébraux a également été évalué.
11 Le DAS moyenné dans 1 g de peau obtenue à partir du modèle d'enfant de 12 ans basé sur le
12 modèle « *visible human* » et mis à l'échelle de façon non linéaire est plus élevé que pour l'adulte.
13 En revanche, le DAS dans 1 g du cerveau obtenu sur ce même modèle est inférieur. Les auteurs
14 ont calculé le DAS maximal dans 1 g de peau, de muscle, d'os, de liquide céphalorachidien et de
15 cerveau en utilisant plusieurs modèles de téléphone et de tête (adulte, enfant de 12 ans et enfant
16 de 4 ans) basés sur des données IRM. Les calculs ont été effectués pour différentes fréquences
17 (835, 900 et 1 800 MHz). Les résultats ont été comparés avec ceux obtenus dans les mêmes
18 conditions d'exposition, mais en utilisant un modèle de *morphing* (non linéairement réduit). Les
19 auteurs concluent que le modèle de *morphing* sous-estime le DAS moyenné dans 10 g par rapport
20 au modèle basé sur des données IRM. Cependant, ces modèles ont souvent une grande
21 variabilité, et d'autres analyses sont nécessaires pour confirmer ces conclusions. Les DAS
22 obtenus dans les modèles d'enfants ont par ailleurs été comparés au DAS obtenu dans le modèle
23 SAM, ce dernier s'est avéré au moins deux fois plus élevé, confirmant ainsi son caractère
24 conservateur dans le cadre des évaluations normatives du DAS.

25 Beard *et al.* (2006) ont réalisé une grande étude (incluant 14 laboratoires) s'intéressant aux
26 différences entre les DAS des adultes et des enfants exposés à des téléphones mobiles. Un
27 protocole unique a été suivi utilisant différents modèles de crâne (modèle SAM), un modèle
28 anatomiquement réaliste pour les adultes et un modèle de crâne d'enfant de 7 ans linéairement
29 mis à l'échelle à partir d'un crâne adulte. Deux fréquences ont été étudiées (835 et 1 900 MHz)
30 avec 2 positions du téléphone (contre la joue et en mode vidéo, c'est-à-dire face au visage). Les
31 valeurs de DAS ont été normalisées à la puissance d'entrée de l'antenne et en considérant le point
32 d'alimentation en courant. À 1 900 MHz, les valeurs de DAS maximal moyennées dans 1 g de
33 tissu du modèle de crâne adulte étaient plus élevées que celles de l'enfant dans toutes les
34 positions du téléphone et pour tous les *scenarii* de normalisation. À 835 MHz, en revanche, les
35 valeurs de DAS étaient plus élevées dans le modèle de crâne d'enfant que dans le modèle de
36 crâne adulte, en particulier pour la position inclinée (*tilt*) et en normalisant par rapport au courant
37 injecté dans l'antenne (Beard *et al.*, 2006).

38 De Salles *et al.*, ont déterminé en 2006 le DAS dans des crânes d'adultes et d'enfants exposés à
39 des téléphones mobiles. Des modèles réalistes de tête d'adultes et d'enfants ont été utilisés. Les
40 valeurs de DAS sont comparées avec celles obtenues dans des modèles utilisant les propriétés
41 diélectriques d'adultes transposées aux enfants. Dans des conditions d'exposition similaires, le
42 DAS moyenné sur 1 g de tissu est plus élevé chez les enfants que chez les adultes. En utilisant le
43 modèle d'enfant âgé de 10 ans, les valeurs de DAS obtenues chez l'enfant sont supérieures de
44 60 % à celles des adultes (de Salles *et al.* 2006).

45 Wiart *et al.* (2008) ont utilisé des modèles de tête d'enfant (5-8 ans et 8-15 ans) et d'adultes
46 construits avec des données d'IRM, pour mesurer les niveaux de DAS liés à l'exposition à des
47 téléphones mobiles du commerce ou équivalents. La variabilité au sein d'une même catégorie
48 d'âge a été évaluée grâce à des méthodes de *morphing*. Les différents niveaux de DAS calculés à
49 900 MHz, 1 800 MHz, 2 100 MHz et 2 400 MHz montrent, pour les tissus cérébraux périphériques,
50 une variabilité importante du DAS moyenné dans 1 g en fonction de l'âge et de la morphologie
51 (facteur 2 entre un enfant de moins de 8 ans et un adulte). Les variations entre les DAS moyennés
52 dans 10 g chez les adultes et les enfants sont faibles par rapport aux différences entre les modèles

1 d'adultes entre eux. Pour les auteurs, ces données sont cohérentes avec l'épaisseur moindre de la
2 peau, de la boîte crânienne et du pavillon de l'oreille conduisant à une distance plus faible entre le
3 téléphone et les tissus et donc une exposition plus élevée (Wiar *et al.* 2008).

4 Hadjem *et al.* (2005) ont étudié l'influence des nouveaux usages des téléphones mobiles (envoi de
5 SMS, visionnage de vidéos, *etc.*) sur les DAS mesurés dans 3 modèles de têtes hétérogènes
6 (deux têtes d'enfants de 9 et 15 ans et une tête d'adulte (*visible human*) et un modèle de tête
7 adulte homogène (SAM). Le téléphone mobile est placé à 10 cm en face de la tête en position de
8 « visionnage ». Les modèles de tête sont exposés à des rayonnements de fréquences 900, 1 800
9 et 2 100 MHz pour un téléphone mobile « tribande » (fréquences utilisées en Europe) et à 835,
10 1 900 et 2 100 MHz pour un téléphone mobile fonctionnant sur un réseau nord-américain. Quelles
11 que soient les fréquences, aucune différence de DAS (local ou moyenné dans 10 g de tissu) ni de
12 puissance rayonnée n'est observée entre les enfants et les adultes. Le DAS calculé dans 10 g
13 obtenu avec le fantôme SAM est supérieur à ceux calculés sur les modèles hétérogènes d'adultes
14 et d'enfant, ce qui confirme que pour une utilisation en mode « visionnage » du téléphone mobile,
15 le DAS évalué sur le fantôme SAM est conservateur. De plus, quelles que soient les simulations,
16 les valeurs du DAS sont toujours inférieures à la limite réglementaire de 2 W/kg pour le DAS
17 moyenné dans 10 g dans la tête. Cependant, lorsque les valeurs de DAS sont calculées dans 1 g
18 (réglementation américaine), l'absorption d'énergie dans le cerveau du modèle d'enfant de 9 ans
19 est légèrement supérieure à celle de l'adulte.

20 Christ *et al.* (2010a) ont étudié les effets de la compression du pavillon de l'oreille dans différents
21 modèles d'adultes et d'enfant. D'après les auteurs, la présence du pavillon est équivalente à un
22 espacement entre le haut du téléphone et la tête. Le but de cet article était d'évaluer les variations
23 d'espacement en fonction de l'âge de la personne exposée, en fonction notamment de la force
24 exercée sur le pavillon et son impact sur le DAS. Les distances ont été mesurées pour les adultes
25 et les enfants en appliquant une force définie sur le pavillon de l'oreille grâce à un dispositif
26 adéquat. Bien que la distance entre le téléphone et la tête ne diffère pas significativement entre les
27 2 groupes (enfant et adultes), la compression du pavillon de l'oreille peut induire une augmentation
28 du DAS moyenné dans 10 g de 2 dB (rapport 1,6), si le maximum de l'émission est réalisé avec le
29 haut du téléphone, au niveau de l'oreille. L'antenne, dans les téléphones de cette génération, était
30 effectivement le plus souvent placée dans la partie supérieure des téléphones (Christ *et al.* 2010a).

31 Dans une autre étude, Christ *et al.* (2010b) ont étudié l'impact de l'âge sur l'exposition à travers
32 l'influence des propriétés diélectriques et de l'anatomie, aux fréquences de la téléphonie mobile,
33 sur des modèles d'adultes et d'enfants. Ils concluent que les méthodes normatives de vérification
34 de la conformité des téléphones mobiles sont conservatrices, et que les propriétés diélectriques
35 des tissus jeunes et les caractéristiques géométriques des enfants ne conduisent pas une
36 augmentation systématique et généralisée du DAS local. En revanche, l'exposition de régions à
37 l'intérieur du cerveau de jeunes enfants (hippocampe, hypothalamus *etc.*) peut être supérieure
38 d'un rapport 1,5 à 3 par rapport aux adultes. L'exposition de la moelle osseuse peut être
39 supérieure d'un facteur 10 à celle des adultes, en raison de la diminution importante de la
40 conductivité électrique de ce tissu avec l'âge. L'exposition des yeux des enfants est plus
41 importante que celle des adultes, mais l'élévation de température reste faible, l'exposition des yeux
42 engendrée par un téléphone mobile étant elle-même très faible. En raison de la position du
43 cerveau par rapport à l'oreille différente chez les enfants par rapport aux adultes, l'exposition du
44 cervelet peut être augmentée d'un facteur 2,5 chez l'enfant, même si ce résultat dépend très
45 fortement de la position du téléphone près de la tête (Christ, *et al.* 2010b).

46 Dans une revue, Wiar *et al.* (2011) ont étudié les résultats de simulations numériques réalisées
47 afin de calculer le DAS « corps entier » dans des modèles d'enfants et de fœtus. Les résultats
48 indiquent que les fantômes utilisés pour vérifier la conformité des téléphones mobiles aux
49 réglementations en vigueur permettent de prendre en compte l'exposition spécifique des enfants.
50 Cependant, ils confirment que des tissus spécifiques comme les tissus périphériques du cerveau
51 des enfants peuvent être exposés plus fortement que chez les adultes. Dans certains cas
52 cependant (Martens & Vermeeren 2005), des usages spécifiques comme ceux de *talkie-walkie* de

1 puissance 0,5 W placés très près du visage pourraient occasionner un dépassement des niveaux
2 de restriction de l'Icnirp.

3 La littérature scientifique met en évidence l'importance des paramètres morphologiques dans la
4 pénétration des rayonnements électromagnétiques à travers les structures biologiques. Des
5 augmentations du DAS, notamment local, sont retrouvées pour les enfants par rapport aux adultes
6 dans différents types de modèles, en particulier pour certains tissus comme la peau et les tissus
7 cérébraux situés en périphérie, mais également certaines structures profondes comme
8 l'hippocampe. Il semble que des modifications morphologiques (forme de la tête) puissent, en
9 fonction de la position des téléphones mobiles, induire des variations importantes du DAS calculé.
10 Néanmoins, selon certaines études, ces variations seraient contenues dans l'évaluation
11 conservative du DAS obtenue avec le fantôme SAM utilisé comme référentiel normatif pour étudier
12 la conformité des téléphones mobiles avec les valeurs limites d'exposition réglementaires.

13

1
2

Tableau 10 : Études investiguant l'impact de la morphologie des enfants sur DAS dans la tête

Auteurs	Modèles utilisés	Fréquences	Âges des modèles d'enfant	Conclusions
Gandhi <i>et al.</i> , 1996	Modèles homogènes et hétérogènes	835 et 1933 MHz	5 et 10 ans	Augmentation du DAS 1 g chez les modèles d'enfants par rapport au modèle adulte.
Anderson <i>et al.</i> , 2003	Modèle 3 couches	900 MHz	4, 8, 12, 16 ans	Diminution progressive du DAS 1 g et dans une moindre mesure du DAS 10 g en fonction de l'âge.
Martinez-Burdalo <i>et al.</i> , 2004	Modèle linéairement réduit	900 et 1 800 MHz	-	Le DAS 1 g et le DAS 10 g tendent à diminuer lorsque la taille de la tête diminue, mais le pourcentage d'énergie absorbée augmente.
Keshvari et Lang 2005	Modèle anatomique	900, 1 800 et 2 450 MHz	3 et 7 ans	Pas de différence entre le DAS déterminé chez les adultes ou chez les enfants. La prise en compte du pavillon de l'oreille dans la détermination du DAS est un paramètre influent.
Bit-Babik <i>et al.</i> , 2005	Modèle linéairement réduit	-	-	Les DAS 1 g et 10 g et la pénétration d'énergie sont les mêmes dans tous les modèles pour toutes les conditions d'exposition.
De Salles <i>et al.</i> , 2006	Modèle morphométrique	850 et 1 850 MHz	-	Le DAS 1 g est plus élevé chez les enfants que chez les adultes.
Wiat <i>et al.</i> , 2005	Modèle morphométrique Modèle hétérogène (IRM)	-	-	Revue.
Hadjem <i>et al.</i> , 2005	Modèle linéairement réduit Modèle morphométrique	900 et 1 800 MHz	-	DAS 10 g légèrement supérieur chez les enfants par rapport à l'adulte.
Beard <i>et al.</i> , 2006	Modèle linéairement réduit Modèle morphométrique	835 et 1 900 MHz	7 ans	À 1900 MHz, DAS 1 g chez l'enfant inférieur à celui des adultes. À 835 MHz, DAS 1 g supérieur chez l'enfant, en particulier pour la position inclinée.
Wiat <i>et al.</i> , 2008	Modèles hétérogènes (IRM)	900, 1 800, 2 100 et 2 400 MHz	5-8 ans et 8-15 ans	DAS 1 g plus élevé pour le modèle d'enfant de 5-8 ans par rapport à l'adulte pour les tissus cérébraux périphériques. Pas de différence entre les DAS adultes et enfants 8-15 ans.
Hadjem <i>et al.</i> , 2010	Modèles hétérogènes	900, 1 800 et 2 500 MHz	9 et 15 ans	Aucune différence de DAS n'est observée entre les enfants et les adultes pour une utilisation du téléphone mobile en mode « visionnage », téléphone devant le visage.
Christ <i>et al.</i> , 2010	Modèle anatomique haute résolution	900 MHz et 1 800 MHz	3-7 ans	Augmentation du DAS dans des tissus spécifiques du cerveau chez les enfants par rapport aux adultes, les méthodes normatives de test des téléphones mobiles restent cependant conservatives.

Auteurs	Modèles utilisés	Fréquences	Âges des modèles d'enfant	Conclusions
Christ <i>et al.</i> , 2010	Modèle anatomique haute résolution	-	6-8 ans	Augmentation du DAS avec la compression du pavillon de l'oreille par le téléphone.

DOCUMENT EN CONSULTATION

1 4.4.2.3 Exposition de type « corps entier »

2 La valeur limite d'exposition aux sources proches du corps (DAS « corps entier ») proposée par
3 l'Icnirp en 1998 a été construite en considérant le seuil des plus petits effets observés chez
4 l'animal de laboratoire. Par transposition à l'Homme, on considère ainsi qu'un DAS « corps entier »
5 de 4 W/kg, entraînant une augmentation de 1°C de la température corporelle pendant 30 min, est
6 la valeur seuil à partir de laquelle des effets aigus peuvent apparaître pour un adulte sain. En
7 appliquant un facteur de sécurité de 50 pour tenir compte des variabilités individuelles notamment
8 (cf. chapitre 2.1), la valeur limite du DAS « corps entier » pour la population générale est donc de
9 0,08 W/kg. En principe, l'application d'un facteur de sécurité devrait suffire à la prise en compte
10 des variations dues aux différents facteurs dosimétriques, incluant la taille ou le poids des
11 individus. Cependant, ces valeurs limites d'exposition pourraient être dépassées dans certaines
12 situations d'exposition de type pire cas pour les jeunes enfants, entre approximativement 50 et
13 100 MHz, et au-dessus de 1 GHz, comme le soulignait le *National Radiological Protection Board*
14 anglais en 2004 (NRPB 2004a et b). Même si la probabilité que des enfants soient exposés à des
15 champs électromagnétiques pour lesquels la restriction de base en DAS « corps entier » pourrait
16 être dépassée est faible, cette situation mérite d'être examinée, concernant notamment les fœtus
17 et les très jeunes enfants, et pour comprendre plus généralement les spécificités des enfants par
18 rapport aux adultes en matière d'exposition aux champs électromagnétiques.

19 Dimbylow *et al.* (1997) ont calculé le DAS « corps entier » pour un homme adulte et 3 modèles
20 d'enfants linéairement réduits âgés de 1, 5 et 10 ans. À des fréquences supérieures à 0,8 GHz,
21 l'exposition à un niveau égal au niveau de référence proposé par l'Icnirp entraîne une exposition
22 supérieure aux restrictions de base pour les modèles d'enfants. Ces résultats ont été confirmés
23 dans leur étude de 2002, dans laquelle la résolution des méthodes de calcul a été améliorée,
24 permettant de tester des fréquences inférieures à 10 MHz et supérieures à 3 GHz, et dans leur
25 étude de 2005 dans laquelle les modèles d'enfants ont été réalisés à partir d'un modèle de femme.
26 L'étude de Dimbylow et Bolch (2007) a consisté à exposer des modèles d'enfant linéairement
27 réduits de 9 mois, 4 ans, 8 ans, 11 ans et 14 ans à des ondes planes de fréquences 50 MHz à
28 4 GHz. Les résultats suggèrent qu'à des fréquences supérieures à 1 GHz, le dépassement des
29 restrictions de base de l'Icnirp lors d'expositions aux niveaux de références survient chez des
30 modèles d'enfant âgés de 9 mois et 4 ans, mais pas dans les modèles de 8, 11 et 14 ans. Les
31 valeurs limites de DAS corps entiers sont dépassées dans 2 gammes de fréquences : 45 –
32 170 MHz et 1,4 – 4 GHz. Le ratio le plus important (0,83) entre le champ électrique calculé et le
33 niveau de référence de l'Icnirp a été obtenu à une fréquence de 1,6 GHz, pour le modèle d'enfant
34 de 9 mois.

35 En 2006, Wang *et al.* ont également étudié le DAS moyen « corps entier » dans des modèles
36 d'adulte et d'enfant à des fréquences comprises entre 30 MHz et 3 GHz. Pour un enfant de 7 ans
37 exposé à des niveaux de références Icnirp, les restrictions de base sont dépassées de 30 %
38 environ à la fréquence de résonance et à environ 2 GHz (Wang *et al.* 2006).

39 Nagaoka *et al.* (2008) ont comparé le DAS dans des modèles différents d'enfants de 3, 5 et 7 ans.
40 Le premier type de modèle a été construit à partir des données IRM d'un adulte et mis à l'échelle,
41 de façon non linéaire, pour des enfants de 3, 5 et 7 ans dans des proportions moyennes de la
42 population japonaise. Le second type de modèle a été construit à partir d'un modèle adulte
43 linéairement mis à l'échelle. Les fréquences étudiées s'échelonnent entre 30 MHz et 3 GHz. Les
44 DAS « corps entier » ne diffèrent pas entre les modèles. L'exposition à un champ électrique aux
45 niveaux de référence définis par l'Icnirp aboutit à un dépassement des restrictions de base pour
46 les 3 âges étudiés. En 2009, cette même équipe a étudié la variation interindividuelle du DAS dans
47 des modèles homogènes d'enfants âgés entre 3 et 4 ans. La variation de DAS était en moyenne
48 de 13 % et 6,5 %, à la fréquence de résonance.

49 Conil *et al.* (2008) ont développé des modèles d'enfants âgés de 5, 8 et 12 ans, à partir de
50 modèles hétérogènes anthropomorphiques d'adultes et en utilisant des méthodes de *morphing*
51 respectant les proportions anatomiques. Le DAS « corps entier » a été calculé ainsi que les DAS

1 moyens des tissus spécifiques comme la peau, les muscles, la masse grasseuse ou les os, et des
2 régions anatomiques spécifiques comme la tête, les jambes, les bras ou le torse. Les modèles ont
3 été exposés aux niveaux de références de l'Icnirp. Les résultats montrent que la variabilité des
4 DAS entre les différents modèles adultes peut aller jusqu'à 30 % en fonction de la fréquence, alors
5 que le DAS corps entier chez les enfants dépasse celui des adultes jusqu'à 48 %. De plus, si le
6 respect des niveaux de référence garantit le respect des restrictions de base (DAS) pour les
7 adultes, le DAS moyen « corps entier » correspondant à une exposition aux niveaux de référence
8 peut dépasser la valeur limite de l'Icnirp de 40 % pour les modèles d'enfants utilisés dans cette
9 étude.

10 Kühn *et al.* (2009) ont exposé des modèles numériques d'adultes et d'enfants de 6 et 11 ans à des
11 ondes planes. Pour le modèle d'enfant de 6 ans, le DAS maximum dépassait les limites définies
12 par l'Icnirp à 100 MHz et au-dessus de 1 450 MHz. Les résultats montrent aussi une grande
13 variabilité du DAS à une fréquence de 450 MHz en fonction de la polarisation et des directions de
14 l'antenne émettrice.

15 Cette conclusion est cohérente avec les résultats d'Hirata *et al.* (2009), qui rapportent une
16 augmentation du DAS lors d'une exposition frontale à un champ électromagnétique polarisé
17 verticalement, à des fréquences supérieures à 2 GHz. Les auteurs ont utilisé un modèle d'enfant
18 morphométrique de 7 ans et un modèle d'enfant âgé de 9 mois réduit de façon linéaire à partir d'un
19 modèle d'enfant de 3 ans. Les modèles ont été exposés à une onde plane à des fréquences de 1 à
20 6 GHz.

21 Findlay *et al.* (2009) ont comparé les valeurs de DAS obtenues dans deux modèles hétérogènes
22 d'enfants de 7 ans, le premier développé par leur équipe et le second par l'institut de recherche
23 coréen ETRI (*Electronics and Telecommunications Research Institute*), dans différentes postures :
24 debout bras pendants, debout bras levés et assis. Les fantômes ont été exposés à une onde plane
25 à des fréquences de 10 MHz jusqu'à 3 GHz. Une petite différence a été observée entre les 2
26 modèles pour les DAS corps entier à la fréquence de résonance, pour chacune des postures
27 étudiées. Par ailleurs, le DAS a été augmenté de plus de 25 % dans le modèle avec les bras levés
28 par rapport au modèle avec les bras pendants. Les auteurs concluent donc que les niveaux de
29 références définis par l'Icnirp pourraient ne pas être protecteurs dans des conditions de type pire-
30 cas où la posture entre en compte.

31 Bakker *et al.* (2010) ont calculé le DAS moyen « corps entier » et le DAS maximal sur 10 g de tissu
32 dans 2 modèles d'adultes et 6 modèles d'enfants exposés à des ondes planes suivant 12
33 configurations différentes. L'analyse de sensibilité a montré une variabilité de 53 % pour le DAS
34 corps entier et de 58 % pour le DAS moyenné dans 10 g, liée aux variations entre les différentes
35 configurations et aux propriétés des tissus. Les résultats montrent également que les restrictions
36 de base de l'Icnirp peuvent être dépassées jusqu'à 45 % pour les enfants de petite taille, à une
37 fréquence autour de 2 GHz. Dans une seconde étude (Bakker *et al.* 2012), les auteurs ont cherché
38 à déterminer l'augmentation maximale de la température locale dans les modèles d'enfants utilisés
39 précédemment. Les résultats montrent que l'augmentation de la température peut atteindre
40 localement 1°C pour un scénario de type pire-cas, aux niveaux de références de l'Icnirp. Les
41 auteurs concluent que l'accroissement maximal de température serait un paramètre plus approprié
42 que le DAS maximum local pour prévenir un échauffement excessif des tissus. La durée de
43 l'exposition devrait aussi être considérée. Les auteurs proposent d'inclure l'accroissement maximal
44 de température pour des durées d'exposition spécifiques dans une éventuelle future évolution des
45 lignes directrices.

46 Dans une revue, Wiart *et al.* (2011) ont étudié les résultats de simulations numériques réalisées
47 afin de calculer le DAS « corps entier » dans des modèles d'enfants et de fœtus. L'exposition des
48 modèles à des ondes planes a montré que le DAS « corps entier » pouvait être plus élevé que
49 celui des adultes et que les niveaux de référence de l'Icnirp ne pouvaient garantir le respect des
50 restrictions de base de l'Icnirp. Concernant spécifiquement le fœtus, son exposition, qui dépend
51 fortement de sa position dans l'utérus, pourrait être inférieure à celle de la mère, selon des
52 résultats préliminaires.

1 La grande majorité de la littérature scientifique qui a exploré l'influence de la taille, à travers
2 l'utilisation de différents modèles d'enfants, sur l'absorption des rayonnements
3 électromagnétiques, rapporte une augmentation significative de l'exposition par rapport aux
4 adultes, notamment aux fréquences utilisées pour les communications mobiles. Dans de
5 nombreux cas, ces études signalent que les niveaux de référence de l'Icnirp ne seraient pas
6 protecteurs, les restrictions de base étant dépassées pour des expositions aux niveaux de
7 référence.

8 L'Icnirp, en 2009 (Icnirp, 2009), a réalisé une revue de ses lignes directrices concernant
9 l'exposition aux radiofréquences. Les résultats des études citées dans cette section ont été pris en
10 compte, mais l'Icnirp a considéré que l'élévation du DAS observée était négligeable par rapport au
11 facteur de réduction de 50 utilisé pour construire les restrictions de base pour le public. Le conseil
12 de santé des Pays-Bas a également présenté un avis dans ce sens en 2011 (Health Council of the
13 Netherlands 2011) (cf. chapitre 3.1.2).

14 En revanche, Santé Canada a révisé ses valeurs limites d'exposition, en diminuant les niveaux de
15 référence, notamment en s'appuyant sur les dernières études dosimétriques concernant les
16 enfants : « De récents développements dans le domaine de la dosimétrie électromagnétique
17 appuyée par des modèles voxel du corps humain fondés sur l'imagerie par résonance magnétique
18 (IRM) ont montré que pour certaines tailles de corps et fréquences, il est possible que les
19 restrictions de base du DAS corporel soient dépassées lors d'une exposition à des intensités de
20 champ (ou à des densités de puissance) correspondant aux niveaux de référence du SC6 (2009)
21 et de l'ICNIRP (1998) ».

22

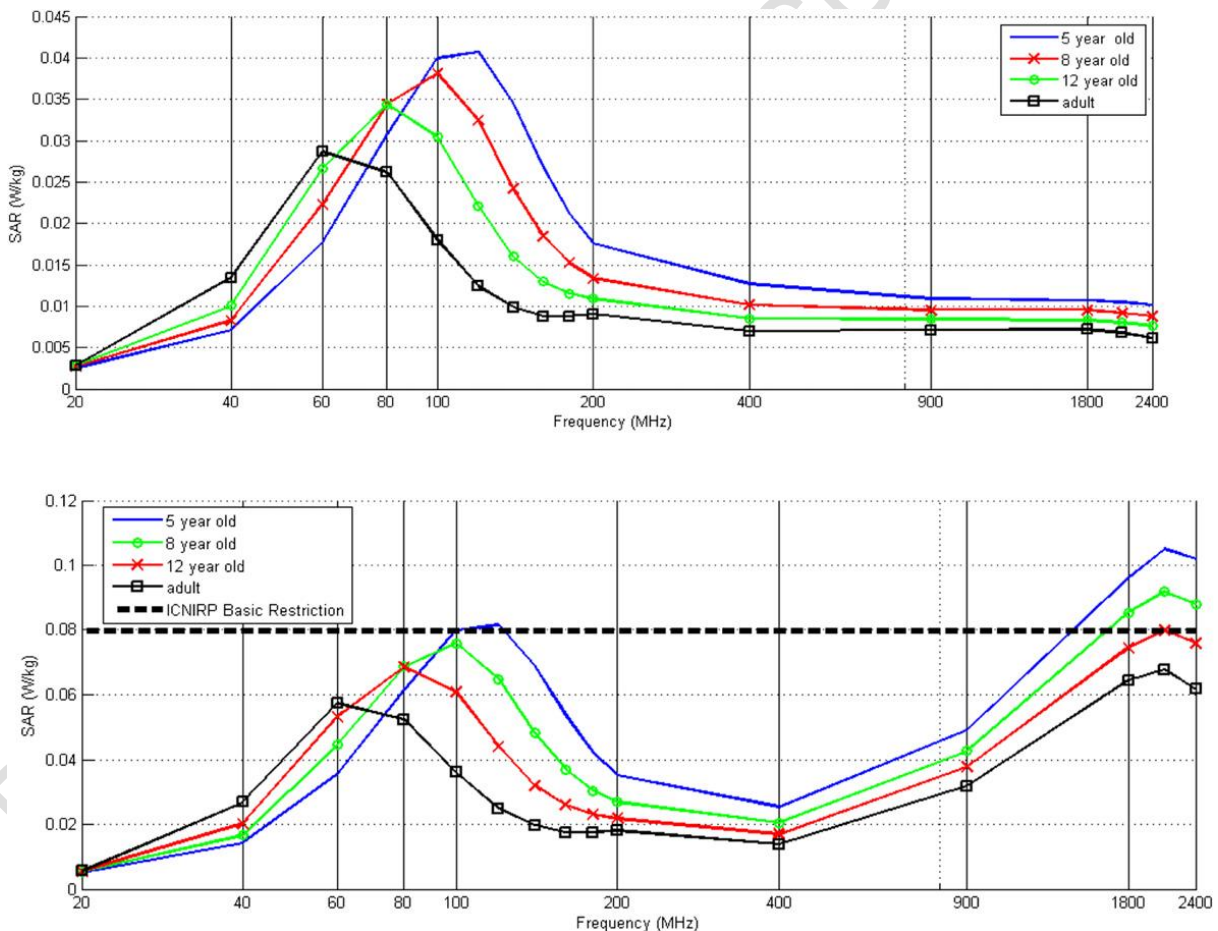
1

Tableau 11 : Études investiguant l'impact de la morphologie des enfants sur DAS « corps entier »

Auteurs	Modèles utilisés	Âge des modèles d'enfant	Conclusions
Dimbylow <i>et al.</i> , 1997 Dimbylow <i>et al.</i> , 2002, Dimbylow <i>et al.</i> , 2005,	Modèle linéairement réduit	1 ; 5 ; 10 ans	La valeur limite de DAS est dépassée dans 2 gammes de fréquences pour une exposition à des niveaux de référence : (45 – 170 MHz et 1,4 – 4 GHz.
Dimbylow et Bolch, 2007 Dimbylow <i>et al.</i> , 2007	Modèle linéairement réduit	9 mois, 4 ans, 8 ans, 11 ans et 14 ans	À des fréquences supérieures à 1 GHz, les restrictions de base de l'Icnirp sont dépassées pour une exposition aux niveaux de références dans des modèles d'enfants âgés de 9 mois et 4 ans, pas pour les modèles d'enfants de 8, 11 et 14 ans.
Nagaoka <i>et al.</i> , 2008	Modèle hétérogène (IRM) Modèle à réduction morphométrique	3,5 et 7 ans	À des fréquences comprises entre 30 MHz et 3 GHz, l'exposition à un champ électrique à des niveaux de référence Icnirp aboutit à un dépassement des restrictions de base pour les 3 âges étudiés.
Wang <i>et al.</i> , 2006	Modèle hétérogène Modèle à réduction morphométrique	7 ans	Pour un enfant de 7 ans exposé à des niveaux de références Icnirp, les restrictions de bases sont dépassées de 30 % environ à la fréquence de résonance et à environ 2 GHz dans le modèle à réduction morphométrique.
Conil <i>et al.</i> , 2008	Modèles hétérogènes Modèle à réduction morphométrique	5, 8 et 12 ans	En fonction de la fréquence, le DAS corps entier chez les enfants dépasse celui des adultes jusqu'à 48 %. Le DAS corps entier dépasse les restrictions de base jusqu'à 40 % pour les modèles d'enfants utilisés dans cette étude.
Kühn <i>et al.</i> , (2009)	Modèles hétérogènes	6 et 11 ans	Pour le modèle d'enfant de 6 ans, le DAS maximum dépasse les limites Icnirp à 100 MHz et au dessus de 1 450 MHz.
Hirata <i>et al.</i> , 2009	Modèle à réduction morphométrique Modèle linéairement réduit	9 mois, 3, 5, et 7 ans	La polarisation verticale du champ électrique entraîne une exposition supérieure par rapport aux niveaux de référence.
Bakker <i>et al.</i> , 2010, 2012	-	-	Les restrictions de base de l'Icnirp peuvent être dépassées jusqu'à 45 % pour les enfants de petite taille, à une fréquence autour de 2 GHz. L'augmentation de la température peut atteindre 1 °C pour un scénario de type pire-cas à des niveaux de références Icnirp.
Findlay <i>et al.</i> , 2009	Modèles hétérogènes	7 ans	La posture influe sur le DAS « corps entier » et est un paramètre à prendre en compte dans l'élaboration de scénarios de type pire-cas.

1 **4.4.3 Influence de la résonance sur l'exposition**

2 Le corps humain absorbe préférentiellement des ondes radioélectriques dans certaines conditions
 3 de résonance, en particulier lorsque la longueur d'onde du rayonnement est comparable avec les
 4 dimensions du corps. À des fréquences autour de 1 MHz, l'orientation du corps par rapport au
 5 champ incident intervient également. Le corps se comporte alors comme une antenne, absorbant
 6 l'énergie d'une manière dépendante de la longueur du corps en relation avec la longueur d'onde
 7 du rayonnement. La fréquence de résonance dépend de nombreux facteurs, comme la taille de
 8 l'individu, sa posture, l'isolation du corps vis-à-vis de la terre, la conductivité du corps et la
 9 polarisation ou l'orientation du champ électrique par rapport au corps. Pour des adultes se tenant
 10 debout, le pic d'absorption se situe dans la fréquence 70-80 MHz si le corps est isolé
 11 électriquement du sol et dans une fréquence moitié moindre (35-40 MHz) s'il est relié à la terre. Le
 12 pic de résonance se déplace vers des fréquences plus élevées pour les enfants et les adultes de
 13 petite taille (cf. Figure 15) (Wiant *et al.*, 2011). La Figure 15 représente le DAS « corps entier »
 14 induit par l'exposition à une onde plane polarisée verticalement dans un modèle adulte (Norman)
 15 et des modèles d'enfants construits à partir de celui-ci (5, 8 et 12 ans) en fonction de la fréquence.
 16 La figure du haut montre les résultats obtenus avec une amplitude constante sur la bande de
 17 fréquences considérées, et celle du bas avec une amplitude égale aux niveaux de référence de
 18 l'Ic Nirp en fonction des fréquences (cf. Tableau 2).



20 Figure 15 : Résonance en fonction de la fréquence et de l'âge (Wiant *et al.* 2011)

21 L'absorption électromagnétique du corps humain, dans le cas d'une exposition de type champ
 22 lointain, présente deux pics principaux aux fréquences radioélectriques : à la fréquence de
 23 résonance du corps considéré et autour du GHz. L'absorption à la fréquence de résonance
 24 dépend des dimensions du corps et des propriétés diélectriques des tissus, alors que c'est la
 25

1 dimension de la surface exposée du corps qui devient le paramètre déterminant autour de 2 GHz.
2 Il peut en résulter une sous-estimation du DAS pour une exposition dans les valeurs limites
3 définies par l'Icnirp (Hirata *et al.* 2007). La même constatation a été faite sur le modèle de Wang
4 (Wang *et al.* 2006 a) qui constate que le DAS « corps entier » déterminé selon les références de
5 l'Icnirp peut dépasser les niveaux de référence de 30 % dans les modèles d'enfants pour des
6 fréquences de résonance et autour de 2 GHz.

8 Les résultats de la littérature scientifique mettent en évidence une diminution des valeurs des
9 propriétés diélectriques des tissus biologiques en fonction de l'âge, qui serait essentiellement due
10 à la diminution de la teneur intrinsèque en eau de certains tissus. La diminution de ces paramètres
11 n'impacte pas systématiquement le DAS, et l'hypothèse que les variations des propriétés
12 diélectriques impliqueraient une exposition plus importante des enfants ne semble pas clairement
13 étayée. Cependant, des augmentations de l'exposition, dans la moelle osseuse ou dans le
14 cerveau, en particulier au niveau des aires cérébrales les plus proches de la boîte crânienne,
15 peuvent être observées. En effet, certaines régions du cerveau des enfants sont plus exposées
16 que chez les adultes, mais cette différence serait majoritairement liée à la localisation anatomique
17 -les structures cérébrales périphériques proches du crâne étant les plus exposées- plutôt qu'à des
18 différences de propriétés diélectriques.

19 Bien que la plupart des études recensées montrent que le modèle « SAM », notamment utilisé
20 pour vérifier la conformité des téléphones mobiles par rapport aux valeurs limites d'exposition
21 réglementaires (DAS_{10g}), est conservateur pour la détermination du DAS, y compris pour les
22 modèles d'enfants, une grande partie d'entre elles met clairement en évidence une augmentation
23 du DAS chez les plus jeunes enfants par rapport aux adultes, liée aux différences morphologiques
24 et anatomiques. Des augmentations du DAS, notamment du DAS local, sont retrouvées pour les
25 enfants par rapport aux adultes dans différents types de modèles, en particulier pour certains
26 tissus comme la peau et les tissus cérébraux périphériques. Par ailleurs, les études ayant évalué
27 le DAS « corps entier » rapportent des niveaux d'exposition plus élevés chez les enfants que chez
28 les adultes, en particulier dans 2 gammes de fréquence : vers 100 MHz et autour de 1 à 4 GHz.
29 Elles montrent que le DAS peut dépasser les restrictions de base de 40 % dans des conditions de
30 type pire-cas, ce qui signifie que pour des personnes de petite taille (inférieure à 1,30 m) les
31 niveaux de référence de l'Icnirp ne sont pas protecteurs. La plupart des études rapportent enfin la
32 grande variabilité des valeurs de DAS en fonction des caractéristiques morphologiques et
33 anatomiques des modèles, mais aussi de la position des sources (téléphones mobiles notamment)
34 par rapport à la tête. Les nouveaux usages des dispositifs de communication sans fil ainsi que les
35 nouvelles formes de téléphones posent donc la question de la pertinence du modèle de fantôme
36 « SAM » utilisé pour les mesures normatives.

37

5 Étude des effets potentiels des radiofréquences sur la santé des enfants

Les enfants constituent une population spécifique concernant l'exposition aux radiofréquences. En effet, les enfants d'aujourd'hui sont potentiellement exposés aux appareils de communications mobiles dès leur plus jeune âge. Par conséquent, ils seront exposés au cours de leur vie beaucoup plus longtemps que les adultes d'aujourd'hui. La phase de développement des enfants est particulièrement sensible, au regard de la rapidité des changements physiologiques et anatomiques qui interviennent, depuis la période embryonnaire jusqu'à la fin de l'adolescence. L'exposition à des facteurs environnementaux est par ailleurs susceptible d'interagir avec le développement des organes et des fonctions physiologiques.

5.1 Méthodologie d'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires

L'expertise présentée dans ce rapport reprend les principes méthodologiques exposés dans le chapitre 6 du rapport de l'Anses sur les effets des radiofréquences publié en octobre 2013 concernant le recensement des articles de la littérature scientifique et l'analyse des publications. À la suite d'échanges entre le groupe de travail « Radiofréquences et santé » et le Comité d'experts spécialisés « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements », les schémas d'évaluation des éléments de preuve ainsi que les matrices de classification du niveau de preuve des effets sanitaires ont été précisés. Ces schémas ainsi que la grille d'évaluation du niveau de preuve sont présentés ci-après (voir Figure 16, Figure 17, Figure 18)

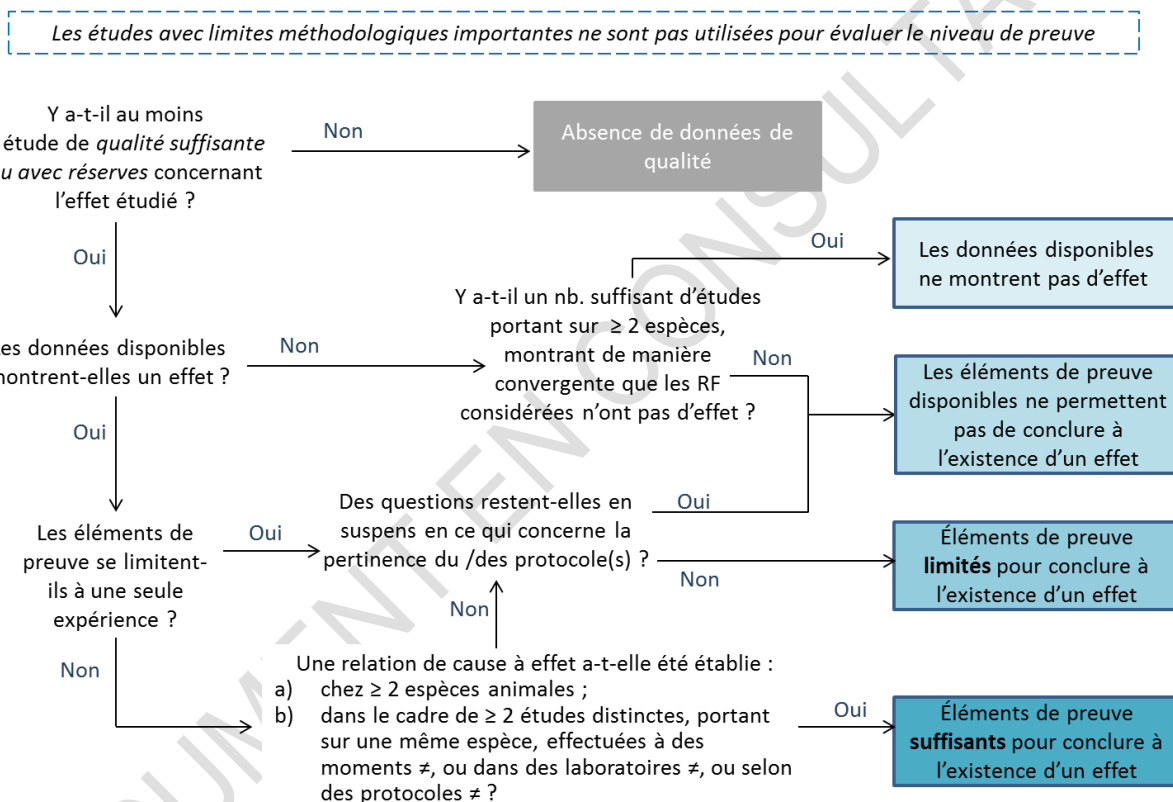
Certaines études scientifiques examinées par le groupe de travail « Radiofréquences et santé » et analysées dans le rapport de l'Anses publié en 2013 ont pu faire l'objet dans le présent rapport d'un nouvel examen. En effet, en l'absence de données spécifiques pour les jeunes enfants se rapportant à certains effets étudiés, les experts rapporteurs ont, dans le cas présent, choisi de prendre en compte des études s'intéressant aux adolescents. Des études épidémiologiques transversales ont ainsi été intégrées dans le *corpus* d'études examinées. Cependant, rappelons que les études observationnelles (*a fortiori* quand il s'agit d'études transversales) à elles seules ne permettent pas d'établir la causalité : la causalité se détermine à partir de l'existence d'un faisceau convergent de preuves à travers différentes études menées suivant des protocoles différents et en des lieux différents, ce faisceau de preuves tenant notamment compte de l'existence de relation dose-effet dans les publications. Le niveau de preuve apporté par les études transversales, dans le cas d'effets recherchés à long terme, est plus faible que les études cas-témoin ou les études de cohorte.

Les éléments de preuves concernant les effets sanitaires font l'objet d'une classification selon la méthodologie décrite dans le paragraphe suivant. Les études présentant les effets biologiques participent à l'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires observés, par exemple en tant qu'explication mécanistique ; elles sont décrites dans un paragraphe indépendant. Rappelons que les effets biologiques sont des changements d'ordre biochimique, physiologique ou comportemental qui sont induits dans une cellule, un tissu ou un organisme en réponse à une stimulation extérieure. Un effet biologique, habituellement réversible, se situe dans les limites de la régulation interne de l'organisme (homéostasie). 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. En effet, le corps humain est soumis en permanence à un ensemble de *stimuli* internes et externes et un effet biologique peut manifester simplement la réponse adaptative normale de la cellule, du tissu ou de l'organisme à cette stimulation. Un effet sanitaire n'intervient que lorsque les effets biologiques dépassent les limites d'adaptation du système biologique considéré. Il sort du cadre des réponses adaptatives physiologiques, de l'homéostasie, sous l'action de l'agent extérieur.

1 *Nota bene* : les publications retenues pour participer à l'évaluation du niveau de preuve des effets
 2 sanitaires sont celles pour lesquelles l'hypothèse de travail impliquait une analyse de l'exposition
 3 aux radiofréquences, que celle-ci soit mesurée effectivement ou évaluée à travers un indicateur
 4 d'utilisation d'appareils émettant des radiofréquences. Dans un certain nombre d'études
 5 analysées, l'objectif est clairement exprimé comme étant de rechercher si l'utilisation en elle-même
 6 d'un appareil de communication mobile est à risque pour la santé : dans ce cadre, dans la mesure
 7 où il s'agit d'une évaluation de l'impact de l'usage de l'appareil et non de l'effet des
 8 radiofréquences en tant que telles, ces études n'ont pas été incluses dans l'analyse finale de
 9 l'évaluation du risque lié aux radiofréquences. En revanche, ces études ont été analysées et leurs
 10 conclusions en matière de risques notamment comportementaux ont été rapportées.

11 5.1.1 Étude des effets des radiofréquences sur des modèles animaux (Figure 16)

12 Pour un effet sanitaire donné, l'ensemble des études disponibles sur des modèles animaux est
 13 considéré à travers le logigramme suivant, afin de caractériser les éléments de preuve apportés au
 14 lien entre l'exposition aux radiofréquences et l'effet considéré.



15

16

17

18

Figure 16 : Logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études sur les modèles animaux

19 Les données relatives à l'effet étudié pour l'animal de laboratoire sont classées selon les
 20 catégories ci-après.

21 **Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet** : une relation de cause à
 22 effet a été établie entre l'exposition aux radiofréquences considérées et l'effet étudié a) chez deux
 23 espèces animales ou plus ; ou b) dans le cadre de deux études distinctes ou plus, portant sur une
 24 même espèce, effectuées à des moments différents, ou dans des laboratoires différents, ou selon
 25 des protocoles différents.

26 **Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet** : les données disponibles
 27 laissent penser qu'il existe un effet, mais elles sont limitées et ne permettent pas de faire une

1 évaluation définitive parce que : a) les éléments de preuve de l'effet se limitent à une seule
 2 expérience mais dont le protocole a été jugé de bonne qualité sans limites méthodologiques
 3 majeures; ou b) plusieurs études de bonne qualité montrent des résultats convergents mais des
 4 questions restent en suspens en ce qui concerne la pertinence du protocole, la conduite ou
 5 l'interprétation des données ; ou l'incidence de l'effet observé peut être naturellement élevée chez
 6 certaines souches.

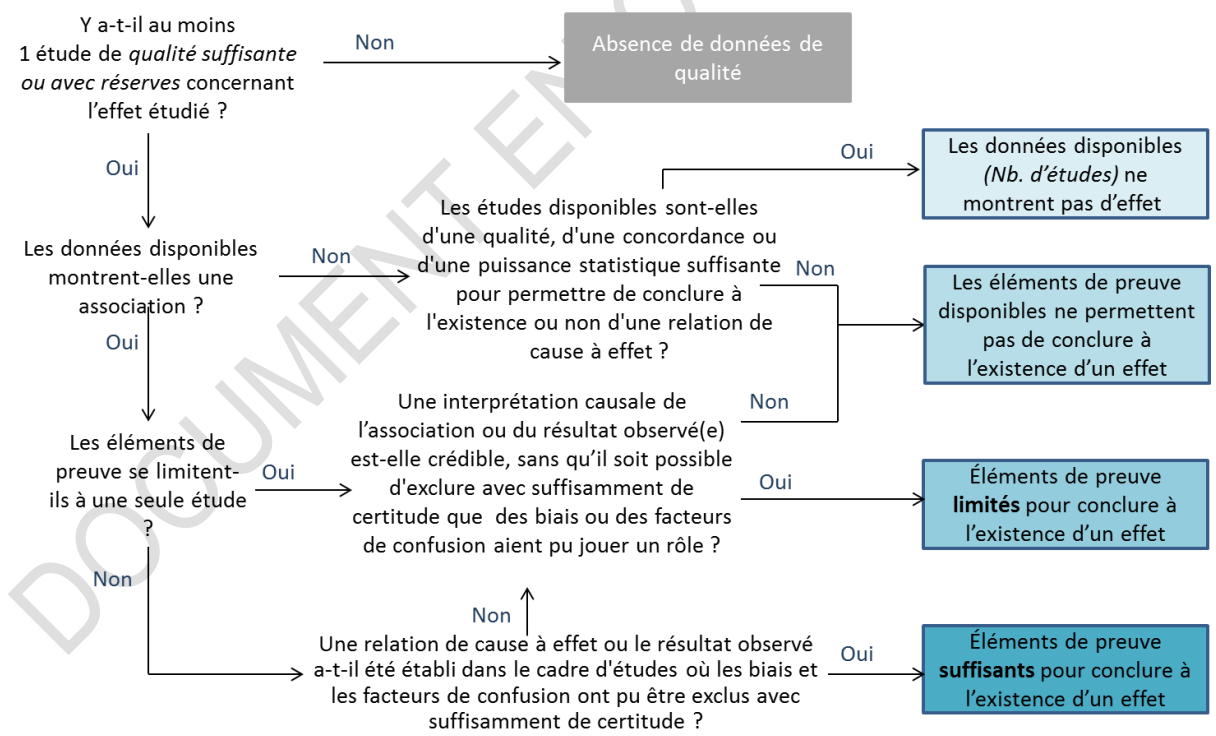
7 **Éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet** : les
 8 études ne peuvent pas être interprétées comme prouvant la présence ou l'absence de l'effet
 9 étudié, parce que : a) il n'y a qu'une seule étude qui ne montre pas d'effet b) il y a plusieurs études
 10 qui ne montre pas d'effet mais elles n'ont pas été effectuées chez 2 espèces animales au moins,
 11 ou bien c) elles présentent d'importantes faiblesses d'ordre qualitatif ou quantitatif.

12 **Les données disponibles ne montrent pas d'effet** : un nombre suffisant d'études sont
 13 disponibles, portant sur deux espèces au moins, qui montrent, de manière convergente et dans les
 14 limites des expériences réalisées, que les radiofréquences considérées n'ont pas d'effet. Lorsque
 15 les renseignements obtenus suggèrent une « absence d'effet », cette conclusion ne peut
 16 s'appliquer qu'à l'effet étudié, aux radiofréquences considérées, aux conditions et niveaux
 17 d'exposition et à la durée d'observation pris en considération dans les études.

19 **5.1.2 Étude des effets des radiofréquences chez l'Homme (Figure 17)**

20 Pour un effet sanitaire donné, l'ensemble des études disponibles chez l'Homme (cliniques,
 21 épidémiologiques, ...) est considéré à travers le logigramme suivant, afin de caractériser les
 22 éléments de preuve apportés au lien entre l'exposition aux radiofréquences et l'effet considéré.

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve



23
 24 Figure 17 : Logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études
 25 épidémiologiques
 26

1 Les données relatives à l'effet étudié provenant d'études sur l'Homme (épidémiologiques et
2 cliniques) sont classées en fonction des éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet,
3 dans l'une des catégories suivantes :

4 **Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet** : une relation de cause à
5 effet a été établie entre l'exposition aux radiofréquences considérées et l'effet étudié chez
6 l'Homme. En d'autres termes, une relation positive a été établie entre l'exposition et la survenue de
7 l'effet, dans le cadre d'études où les biais et facteurs de confusion ont pu être exclus avec
8 suffisamment de certitude (cf. critères dits de « Bradford-Hill » (Hill 1965)).

9 **Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet** : une association positive a
10 été établie entre l'exposition aux radiofréquences considérées et la survenue de l'effet étudié, et le
11 collectif d'experts estime qu'une interprétation causale de cette association est crédible, mais il n'a
12 pas été possible d'exclure avec suffisamment de certitude que les biais ou les facteurs de
13 confusion aient pu jouer un rôle.

14 **Éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet** : les
15 études disponibles a) ne montrent pas d'association et ne sont pas d'une qualité, d'une
16 concordance ou d'une puissance statistique suffisantes pour permettre de conclure à l'absence
17 d'effet ; b) montrent une association mais ne sont pas d'une qualité, d'une concordance ou d'une
18 puissance statistique suffisantes pour permettre de conclure à l'existence d'une relation de cause à
19 effet entre l'exposition aux radiofréquences considérées et l'effet étudié.

20 **Les données disponibles ne montrent pas d'effet** : plusieurs études suffisantes, couvrant la
21 totalité des niveaux d'exposition connus pour être rencontrés chez l'Homme et dont les résultats,
22 convergents, ne font pas ressortir d'association positive entre l'exposition aux radiofréquences
23 considérées et l'effet étudié et ce, quel que soit le niveau d'exposition examiné. Les résultats de
24 ces études, seuls ou combinés, devraient disposer d'intervalles de confiance étroits, dont la limite
25 supérieure devrait être proche d'une valeur nulle (par exemple un risque relatif de 1,0). Biais et
26 facteurs de confusion doivent être exclus avec une certitude raisonnable, et les études devraient
27 avoir un suivi suffisamment long. Lorsque les renseignements disponibles suggèrent « une
28 absence d'effet », cette conclusion ne peut s'appliquer qu'à l'effet étudié, aux radiofréquences
29 considérées, aux conditions et niveaux d'exposition et à la durée d'observation pris en
30 considération dans les études dont on dispose. Au demeurant, l'éventualité de l'existence d'un
31 risque très faible aux niveaux d'exposition étudiés ne peut jamais être exclue.
32

33 5.1.3 Évaluation globale (Figure 18)

34 Au final, tous les éléments d'appréciation sont examinés dans leur ensemble afin d'aboutir à une
35 évaluation globale pour l'Homme de l'impact des radiofréquences considérées pour chaque effet
36 étudié.

37 Chaque effet étudié est classé dans l'une des catégories ci-après (fortement inspirées de celles
38 utilisées pour étudier la cancérogénicité d'un agent dans les monographies du Circ). Le
39 classement d'un effet résulte d'un processus d'évaluation collective et s'appuie sur le caractère
40 plus ou moins probant des éléments d'appréciation tirés d'études sur l'Homme, l'animal de
41 laboratoire et d'autres informations pertinentes (mécanismes d'action par exemple).

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'enfant				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'enfant	Effet possible pour l'enfant			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'enfant	Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			
	Absence de données de qualité					
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'enfant

Figure 18 : Évaluation du niveau de preuve pour un effet donné en fonction des éléments de preuve en faveur de l'existence d'un effet

L'effet étudié est avéré pour l'enfant

Cette catégorie n'est utilisée que lorsque l'on dispose d'éléments de preuve suffisants de l'existence de l'effet étudié pour l'Homme. Exceptionnellement, un effet peut être placé dans cette catégorie lorsque les éléments de preuve concernant l'effet pour l'Homme ne sont pas tout à fait suffisants, mais qu'il existe des éléments de preuve suffisants de l'existence de l'effet étudié chez l'animal de laboratoire et de fortes présomptions que l'agent considéré (les radiofréquences) agisse suivant un mécanisme reconnu.

L'effet étudié est probable ou possible pour l'enfant

Cette catégorie comprend les effets considérés pour lesquels, au maximum, on a obtenu des éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques limités et, au minimum, les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet ou alors on ne dispose d'aucune étude clinique ou épidémiologique, mais on dispose d'éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié suffisants dans les études chez l'animal. Les dits effets sont classés soit dans la catégorie *effet probable pour l'enfant*, soit dans la catégorie *effet possible pour l'enfant* sur la base d'éléments de preuves issus des études épidémiologiques et expérimentales, de données mécanistiques et d'autres renseignements pertinents. Les termes *effet probable* et *effet possible* n'ont pas de signification quantitative et ne sont utilisés que pour décrire différents degrés d'éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet chez l'enfant, *effet probable* signifiant un niveau de preuve plus élevé qu'*effet possible*.

a- Effet probable pour l'enfant

On fait appel à cette catégorie lorsque l'on dispose d'éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié limités dans les études cliniques et épidémiologiques et d'éléments de preuve suffisants chez l'animal de laboratoire. Dans certains cas, l'effet étudié peut être classé dans cette catégorie lorsque les éléments de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet ou

1 que les éléments de preuve sont inexistants dans les études cliniques et épidémiologiques et que
2 les éléments de preuve sont *suffisants* pour l'animal de laboratoire et que de fortes présomptions
3 que l'effet étudié s'effectue par un mécanisme qui fonctionne également chez l'Homme.

4 Exceptionnellement, l'effet étudié peut être classé dans cette catégorie sur la seule base
5 d'éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié *limités* dans les études cliniques et
6 épidémiologiques.
7

8 **b- Effet possible pour l'enfant**

9 Cette catégorie concerne les effets pour lesquels les éléments de preuve en faveur de l'existence
10 de l'effet étudié sont *limités* dans les études cliniques et épidémiologiques, et que les éléments de
11 preuve ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet chez l'animal de laboratoire ou que
12 l'on ne dispose pas de données de qualité. On peut également y faire appel lorsque les éléments
13 de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet ou que l'on ne dispose pas de
14 données de qualité dans les études cliniques et épidémiologiques, mais que l'on dispose
15 d'éléments de preuve *suffisants* pour l'animal de laboratoire.

16 Dans certains cas, peut être classé dans ce groupe un effet pour lequel les éléments de preuve ne
17 permettent pas de conclure à l'existence d'un effet ou que l'on ne dispose pas de données de
18 qualité dans les études cliniques et épidémiologiques et d'éléments de preuve *limités* chez l'animal
19 de laboratoire, corroborés par des données mécanistiques et d'autres données pertinentes. Un
20 effet peut être classé dans cette catégorie sur la seule base d'indications solides provenant de
21 données mécanistiques et autres.
22

23 **Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié**

24 Cette catégorie comprend essentiellement les effets étudiés pour lesquels :

- 25 - les éléments de preuve disponibles chez l'Homme ne permettent pas de conclure à
26 l'existence d'un effet, ou
- 27 - on ne dispose pas de données de qualité dans les études cliniques et épidémiologiques
28 et chez l'animal de laboratoire ou que les éléments de preuve sont *limités* chez l'animal
29 de laboratoire.

30 Exceptionnellement, les effets étudiés pour lesquels les éléments de preuve ne permettent pas de
31 conclure à l'existence d'un effet ou que l'on ne dispose pas de données de qualité dans les études
32 cliniques et épidémiologiques mais sont *suffisants* chez l'animal de laboratoire peuvent être
33 classés dans cette catégorie lorsqu'il existe de fortes présomptions que le mécanisme d'action
34 chez l'animal de laboratoire ne fonctionne pas chez l'Homme.

35 On classe aussi dans cette catégorie les effets qui ne correspondent à aucune des autres
36 catégories.

37 Une évaluation dans la catégorie inclassable n'est pas un constat d'absence d'effet ou de sûreté
38 globale. Cela signifie souvent que davantage de recherches sont nécessaires, notamment quand
39 les données sur l'effet étudié sont compatibles avec des interprétations divergentes.
40

41 **Probablement pas d'effet pour l'enfant**

42 Relèvent de cette catégorie les effets étudiés pour lesquels on dispose d'éléments de preuve
43 suggérant *une absence d'effet* dans les études cliniques et épidémiologiques, ainsi que chez
44 l'animal de laboratoire, pour un grand nombre de conditions ou de scénarios d'exposition. Il est
45 très difficile de démontrer une absence d'effet.

46 Dans certains cas, peuvent être classés dans ce groupe des effets pour lesquels les éléments de
47 preuve ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet ou que l'on ne dispose pas de
48 données de qualité dans les études épidémiologiques ou cliniques, mais pour lesquels on dispose
49 d'éléments de preuve suggérant *une absence d'effet* chez l'animal de laboratoire, constamment et

1 fortement corroborées par une large gamme de données mécanistiques et d'autres données
2 pertinentes.

3 **5.2 Rappels physiologiques sur le développement de l'enfant**

4 Depuis l'essor des téléphones mobiles, les travaux scientifiques étudiant les effets des
5 radiofréquences sur la santé se sont focalisés sur 2 fonctions principales : la fonction cérébrale et
6 la fonction reproductrice. En effet, le téléphone mobile étant majoritairement utilisé à proximité de
7 la tête, le tissu cérébral est la partie du corps la plus exposée. Par ailleurs, les lésions potentielles
8 sur les organes reproducteurs peuvent avoir des conséquences sur le développement de
9 l'embryon. Or, depuis plusieurs années, une diminution de la fertilité et de la fécondité chez
10 l'Homme a été constatée (Skakkebæk *et al.* 2006), et l'exposition aux radiofréquences est une des
11 hypothèses explicatives qui a rapidement été soulevée. Les paragraphes suivants présentent un
12 état des connaissances scientifiques actualisé sur le développement cérébral chez l'Homme et sur
13 le développement de la fonction de reproduction.

14 **5.2.1 Le développement cérébral chez l'Homme**

15 5.2.1.1 Généralités

16 Le développement du cerveau humain, qui occupe une période particulièrement longue de la vie,
17 est un processus non linéaire et hétérogène à la fois au niveau structural et fonctionnel. Le
18 cerveau est composé de différents types de tissus, de structures cérébrales et de circuits
19 neuronaux qui ont des trajectoires développementales différentes et qui subissent des
20 changements dynamiques tout au long de la vie. Cependant, les phases de maturation durant la
21 période foetale et l'enfance sont les plus fondamentales et les plus importantes. L'essentiel du
22 potentiel mais aussi de la vulnérabilité du cerveau dépend probablement des 2 premières
23 décennies de la vie. Le cortex et les structures sous-corticales se développent pendant la vie
24 embryonnaire en séquences bien organisées de prolifération cellulaire, migration et maturation
25 (Figure 19). Ainsi, à la naissance, le cerveau humain possède environ 100 milliards de neurones,
26 les structures sous corticales sont clairement identifiables et ressemblent dans leur forme à celles
27 de l'adulte. Bien que les principales caractéristiques (sulci, gyri) du cortex cérébral soient
28 présentes, elles demeurent relativement immatures en matière de connectivité inter- et intra-
29 régionale. La taille du cerveau du nouveau-né ne représente seulement qu'un quart à un tiers de
30 son volume adulte. Il continue à grandir et à se spécialiser sous l'influence d'un programme
31 génétique avec des modifications pilotées par l'influence de l'environnement, qu'il soit bénéfique
32 ou délétère. Avec la myélinisation des fibres nerveuses qui connectent différentes régions
33 cérébrales, la conduction augmente environ d'un facteur 100. Enfin, l'augmentation substantielle
34 des connexions cérébrales chez le jeune enfant est suivie par un processus non encore élucidé
35 d'élimination des synapses et des dendrites qui conduit à l'amélioration de l'efficacité des
36 connexions qui sont continuellement remodelées tout au long de la vie (Toga *et al.* 2006).

37 5.2.1.2 Les principales étapes du développement cérébral (Figure 19)

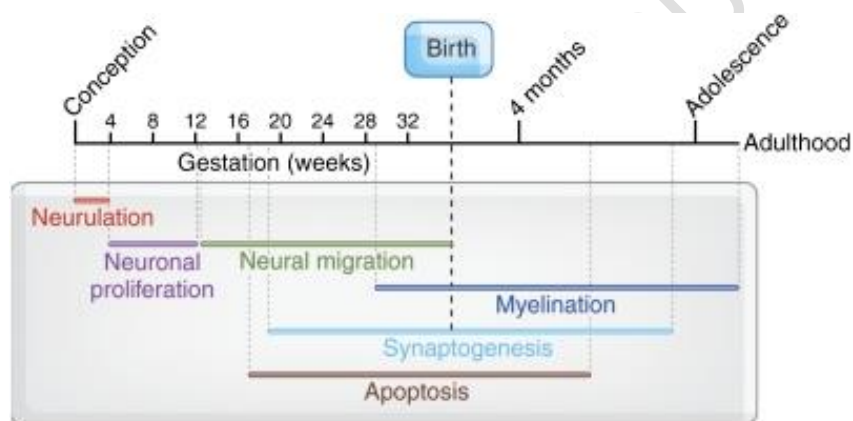
38 Période prénatale

39 Le processus neuro-ontogénétique commence à 2-3 semaines d'âge gestationnel avec le
40 repliement (« folding ») et la fusion de l'ectoderme pour former le tube neural. À 5-6 semaines de
41 gestation, les neuroblastes ou précurseurs neuronaux prolifèrent rapidement dans la zone
42 ventriculaire qui bordent les ventricules cérébraux. La migration neuronale présente un pic entre la
43 12^e et la 20^e semaine de gestation et est terminée entre la 26^e et la 29^e semaine de gestation. Les
44 axones et dendrites des neurones commencent à s'étendre et à partir de la 5^e semaine de
45 gestation forment un réseau primitif fonctionnel. À 32 semaines, le cortex est déjà constitué des
46 diverses couches contenant les principaux systèmes de neurotransmetteurs, une diversité de
47 cellules gliales et différents types de neurones. L'arborisation dendritique et la synaptogenèse
48 s'accroissent au 3^e trimestre de gestation pour produire un épaississement du cortex (Huttenlocher

1 & Dabholkar 1997), ce qui coïncide avec l'apparition des gyri et sulci corticaux. La 34^e semaine de
 2 gestation marque l'arrivée du pic de la synaptogenèse pendant laquelle environ 40 000 nouvelles
 3 synapses sont formées chaque seconde. Ce processus continue jusqu'au début de la vie
 4 postnatale Figure 19. Le nombre de neurones est le plus élevé à 28 semaines de gestation et plus
 5 de la moitié seront éliminés par apoptose d'ici la fin de l'adolescence (Tau & Peterson 2010).

6 Période postnatale

7 À la naissance, le cerveau du nouveau-né de 2-4 semaines représente environ 36 % de sa taille
 8 adulte et grandit pour atteindre 70 % à 1 an et 80 % à 2 ans de sa taille adulte (Knickmeyer *et al.*
 9 2008). Cette croissance est majoritairement due à l'expansion de la glie et à la myélinisation,
 10 même si la neurogénèse et la migration neuronale sont encore présentes. Cette période est
 11 caractérisée par des changements importants de la structure et de la fonction cérébrale. Bien que
 12 la taille du cerveau n'augmente que de 10 % environ entre l'âge de 2 et 5 ans, la myélinisation et
 13 le remodelage synaptique sont encore très actifs. Lenroot *et al.* (2007) montrent que le cerveau
 14 atteint 95 % de sa taille adulte vers l'âge de 6 ans avec un pic de volume de matière grise à
 15 10,5 ans pour les filles et 14,5 ans pour les garçons. Ainsi, au cours de l'enfance et jusqu'à
 16 l'adolescence, les circuits neuronaux continuent à se modeler en parallèle avec la formation de la
 17 myéline, la maturation du métabolisme cérébral (voir paragraphe 5.2.1.4)) et l'acquisition des
 18 fonctions cognitives (voir paragraphe 5.2.1.5).



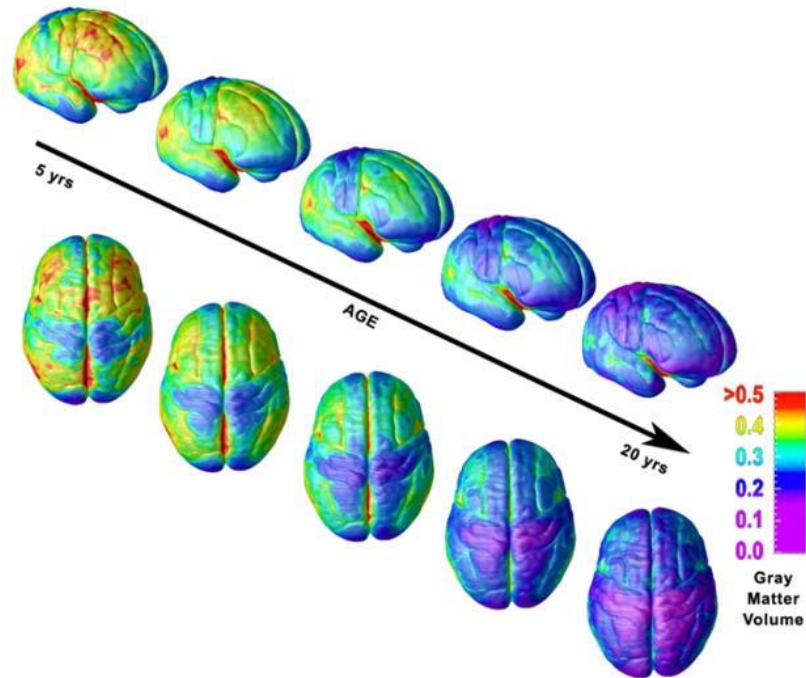
20 Figure 19 : Déroulement temporel des événements majeurs du développement cérébral. Image de Giedd (1999)
 21 dans la revue de Tau and Peterson 2010
 22

23 5.2.1.3 Le développement structural

24 **La matière grise**

25 Le développement cortical de la matière grise suit une séquence de maturation fonctionnelle
 26 hétérogène qui présente des vitesses différentes de maturation (Gogtay & Thompson 2010)
 27 (Figure 20). En premier se développent les cortex primaires visuels et sensorimoteurs le long des
 28 pôles frontal et occipital puis le reste du cortex se développe dans une direction pariétal vers
 29 frontal. Le cortex temporal supérieur, qui contient les aires associatives intégrant les informations
 30 de plusieurs modalités sensorielles ; se développe en dernier (Gogtay *et al.* 2004). Par exemple, le
 31 volume de matière grise dans le cortex occipital présente un pic rapidement après la naissance et
 32 est presque entièrement mature à la fin de l'enfance (Gogtay & Thompson 2010). En revanche, le
 33 volume de la matière grise du cortex préfrontal atteint un pic vers l'âge de 9 ans puis décline pour
 34 atteindre sa taille finale à la fin de l'adolescence voire chez l'adulte jeune (Petanjek *et al.* 2011).
 35 Sowell *et al.*, montrent que la croissance locale cérébrale est d'environ 0,4 – 1,5 mm de tissu par
 36 an entre l'âge de 5 et 11 ans : elle est la plus marquée dans les régions frontales et occipitales
 37 (Sowell *et al.*, 2004a, et 2004b). De même, le développement de la synaptogenèse qui est corrélée
 38 au volume de matière grise (Figure 21C) dépend des régions corticales et atteint un pic (150 % de

1 la valeur adulte) dans le cortex visuel primaire entre 4 et 12 mois alors que dans le cortex
2 préfrontal ce pic survient vers 8 mois et se poursuit la 2^e année (Tau & Peterson 2010).
3 Ainsi, le volume de matière grise présente une trajectoire développementale qui a la forme d'un U
4 inversé (cf. Figure 21A).
5



6
7 Figure 20 : Maturation régionale de l'épaisseur du cortex : Âge 4 -21 ans. Vues du dessus et vues latérales
8 de la maturation de la matière grise sur la surface corticale. La barre de légende à droite montre une
9 représentation en couleur des unités de volume de matière grise (Lenroot & Giedd 2006)
10

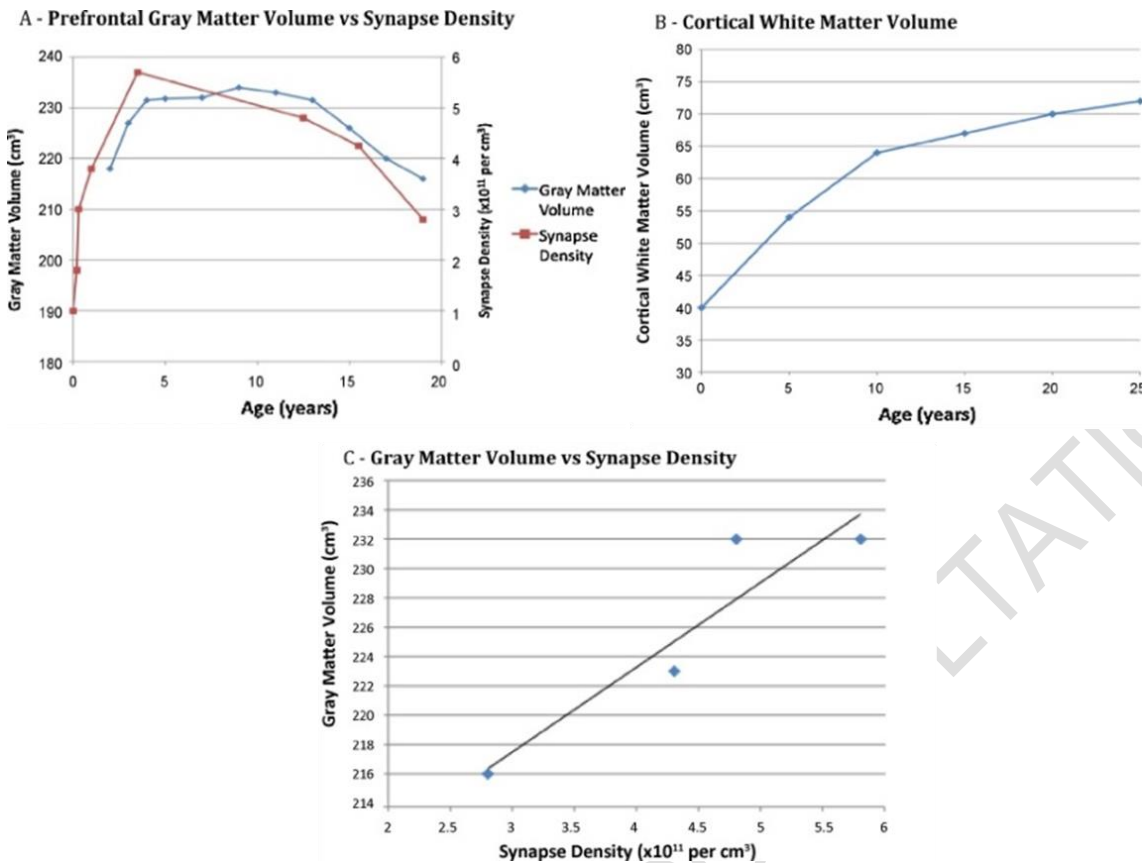


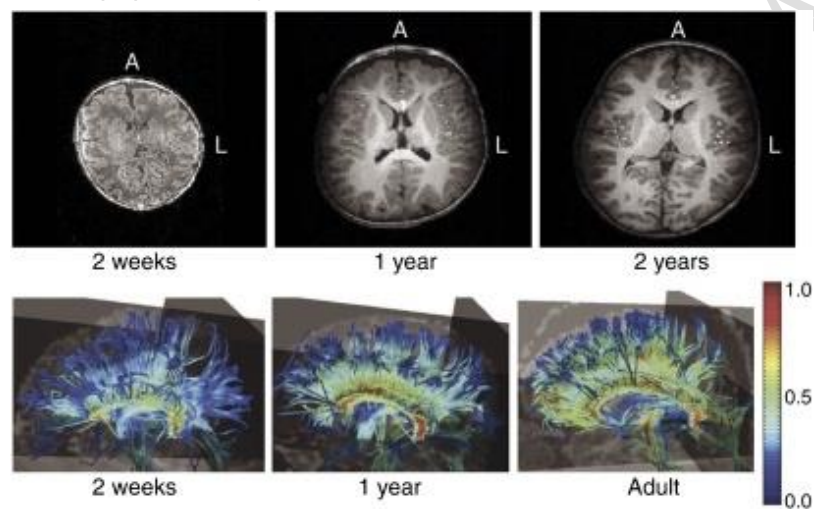
Figure 21 : (A) *Volume* de matière grise dans le cortex préfrontal et densité synaptique en fonction de l'âge. Matière grise : losanges. Densité synaptique : carrés. (B) Volume de matière blanche corticale en fonction de l'âge. Illustration des changements de volume moyen absolu en matière blanche corticale sur des périodes de ±2.5 ans en abscisse. (C) Volume de matière grise vs densité synaptique. Données de A. Valeur de régression $r = 0.95$ (Bennet 2011).

Au cours de la maturation, une perte de densité corticale de la matière grise est observée (e.g., Sowell *et al.* 2003). La cause primaire de cette perte de densité de matière grise reste inconnue : elle pourrait être la conséquence de la surproduction de synapses/épinés dendritiques suivie par un élagage (axones, dendrites et synapses), de la mort des neurones par apoptose (Huttenlocher 1979; Petanjek *et al.* 2011), des changements de la glie et des vaisseaux sanguins et d'un rétrécissement cellulaire (Morrison & Hof 1997). Ce phénomène d'élimination (« *pruning* ») commence à la fin de la gestation et devient plus actif après la naissance, là encore le décours temporel dépend des régions cérébrales (Tau et Peterson, 2010). Il est clairement limité dans le temps et permettrait l'optimisation de l'efficacité des synapses stabilisées restantes quand la régression est terminée. Le 2^e processus, la myélinisation sur les 20-30 premières années de vie (voir § suivant) pourrait expliquer la perte de densité de matière grise (Paus 2005). Récemment Zhou *et al.* (2015) ont montré que cette diminution (Δ épaisseur corticale / Δ âge en mm/an) s'accélère au cours de l'adolescence, est moindre dans l'enfance et chez le jeune adulte, en accord avec des données antérieures établissant que la perte la plus importante du nombre de synapses se produit entre 11 et 15 ans et se stabilise ensuite (Bennett 2011).

La matière blanche et la myélinisation

Les cellules gliales et la myéline supportent le développement des circuits neuronaux. En effet, la microglie, les oligodendrocytes et les astrocytes, les composants gliaux de la matière blanche participent de manière importante aux fonctions neuronales incluant le guidage de la migration neuronale, la régulation de la composition de l'environnement extracellulaire, la modulation des connexions synaptiques et l'élimination des neurotransmetteurs. La myéline mature est

1 visualisable entre la 20^e et 28^e semaine de gestation, d'abord dans les régions sous-corticales,
 2 puis plus tard dans les régions corticales. La myélinogenèse est très active dans la 1^{ère} année de
 3 vie postnatale : les cellules gliales augmentent fortement en taille et en nombre en fonction des
 4 régions cérébrales avec les voies sensorielles qui se « myélinisent » en 1^{er}, puis les voies motrices
 5 et ensuite les aires associatives. Enfin, au sein d'un circuit fonctionnel, ce sont les structures sous-
 6 corticales qui se « myélinisent » en 1^{er} puis les aires corticales (Tau & Peterson 2010). Des études
 7 en IRM morphologique ont montré que l'apparence générale des structures est similaire à celle de
 8 l'adulte vers l'âge de 2 ans et que tous les tractus majeurs de fibres peuvent être observés à 3 ans
 9 (Matsuzawa *et al.* 2001). Contrairement à la matière grise, le volume de la matière blanche
 10 augmente tout au long de l'enfance et de l'adolescence jusqu'à l'âge adulte, en particulier dans les
 11 régions frontales (Giedd *et al.* 1999, Lenroot *et al.* 2007) ; (Figure 21B, Figure 22). Une
 12 caractéristique importante plus récemment découverte est que la myéline, non seulement
 13 maximise la vitesse de transmission de l'influx nerveux, mais aussi module le *timing* et la
 14 synchronisation des profils de décharges des neurones qui permet la création de réseaux
 15 fonctionnels (Giedd & Rapoport 2010).



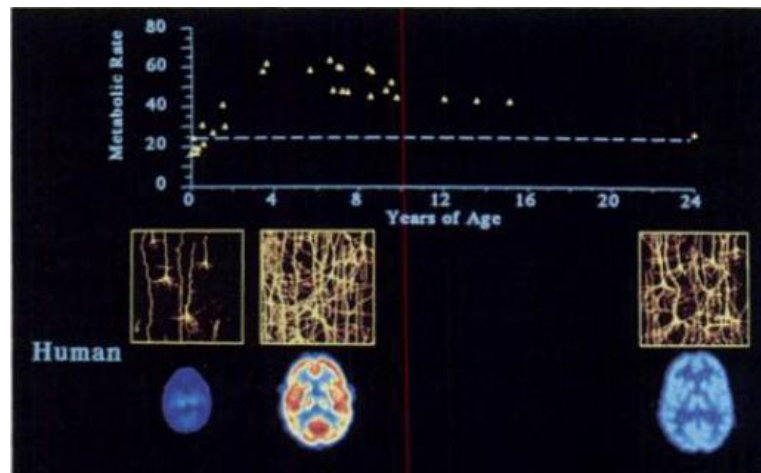
16
 17 Figure 22 : Myélinisation au cours du développement.

18 Haut : Images IRM (T1) chez un enfant montrant l'augmentation liée à l'âge de la taille du cerveau et de
 19 l'intensité de matière blanche. Bas : Image ITD de tractographie de matière blanche montrant l'organisation
 20 de la matière blanche au niveau du corps calleux. Les valeurs les plus élevées correspondent à une
 21 organisation plus élaborée des tractus de fibres (Tau and Peterson 2010).

22 5.2.1.4 Développement de l'activité fonctionnelle cérébrale (consommation cérébrale de glucose 23 et d'O₂ et débit sanguin cérébral)

24 Les modifications neuroanatomiques au cours du développement sont aussi observables au
 25 niveau de l'activité fonctionnelle cérébrale *in vivo* mesurée par la consommation cérébrale de
 26 glucose (CMRglc) en tomographie d'émission de positrons (TEP). Cependant, cette méthode
 27 implique l'injection d'un radionucléide (F¹⁸-fluorodésoxyglucose). Elle a pu être utilisée dans une
 28 population clinique pédiatrique ne présentant pas d'altération neurologique majeure (Chugani &
 29 Phelps 1986, Chugani *et al.* 1987). Pendant la 1^{ère} semaine de vie postnatale, la consommation
 30 cérébrale de glucose est plus élevée dans le cortex sensorimoteur, le thalamus, le tronc cérébral
 31 et le cervelet. À 3 mois, une augmentation de la consommation cérébrale de glucose très
 32 importante est observée dans les cortex pariétal, temporal et occipital, les ganglions de la base et
 33 le cervelet, alors qu'une telle augmentation n'est pas retrouvée dans les cortex frontal et occipital
 34 dorsolatéral avant l'âge de 8-9 mois. Le métabolisme basal du glucose continue à augmenter
 35 après la 1^{ère} année avec un pic atteignant 150-200 % des taux de l'adulte aux alentours de 4-5 ans
 36 (Figure 23, Figure 25) (Chugani & Phelps 1986, Chugani *et al.* 1987). Ce métabolisme élevé
 37 reflète probablement la croissance colossale des neurones et de la glie et donc l'accroissement
 38 des besoins métaboliques nécessaires à la myélinogenèse, au remodelage synaptique et aux

1 processus d'élimination. Ensuite le phénomène de régression est également observable et les taux
 2 de métabolisme cérébral diminuent progressivement à partir de l'âge de 9-10 ans pour atteindre
 3 les taux de l'adulte vers 16-18 ans (Chugani *et al.* 1987).

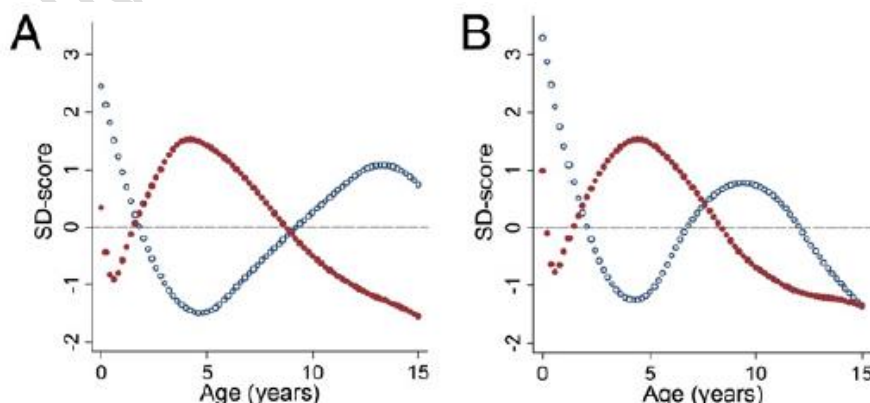


4 Figure 23 : Déroulement temporel des variations de LCMRglc au cours du développement humain.

5 Haut : CMRglc en $\mu\text{mol}/\text{min}/100\text{g}$. La ligne hachurée représente la valeur moyenne de l'adulte. Milieu :

6 Densité des processus neuronaux dans le cortex à la naissance (faible), à 6 ans (exubérante) et chez le
 7 jeune adulte. Bas : Images TEP d'utilisation de glucose (CMRglc) sur des coupes à l'âge de 5 jours (noter la
 8 faible consommation de glucose corticale et sous-corticale sauf pour le thalamus, structure
 9 phylogénétiquement la plus ancienne), à 6 ans (hyperactivité généralisée) et chez le jeune adulte. En rouge,
 10 les taux les plus élevés de métabolisme, avec les couleurs orange, jaune, vert et bleu représentant des
 11 valeurs progressivement plus faibles (Chugani & Phelps 1991).
 12

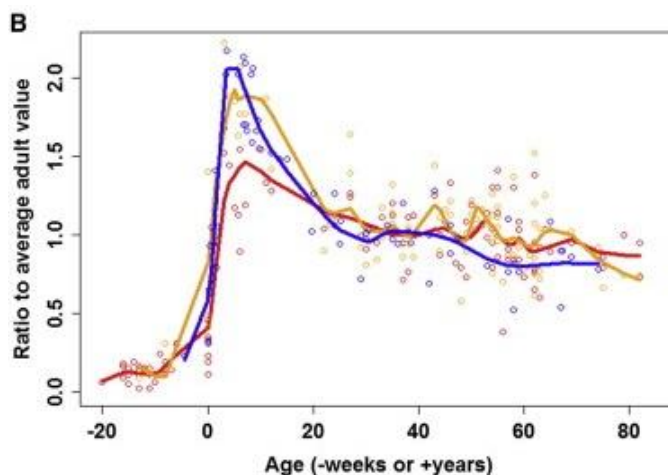
13 Plus récemment, l'équipe de Chugani a repris des données antérieures de la consommation
 14 cérébrale de glucose qu'elle a comparé à l'évolution du poids corporel de la naissance à
 15 l'adolescence (0 – 15 ans) (Kuzawa *et al.* 2014). De manière intéressante, le rapport de l'utilisation
 16 cérébrale de glucose sur le métabolisme corporel au repos ($\text{glucose}_{\text{RMR}}$), exprimé en pourcentage,
 17 est inversement corrélé à la croissance corporelle (dw/dt) (Figure 24). Ainsi, dès la naissance,
 18 l'augmentation importante des besoins en glucose cérébral s'accompagne d'une baisse
 19 proportionnelle de la croissance corporelle, avec une demande en glucose cérébral qui présente
 20 un pic pendant l'enfance alors que la croissance corporelle est la plus active à l'adolescence. Ceci
 21 conforte l'hypothèse que les besoins très élevés du cerveau en développement nécessitent une
 22 baisse de la croissance corporelle compensatoire qui reprend lorsque les besoins en glucose
 23 cérébral ont diminué.
 24



25 Figure 24 : $\text{Glucose}_{\text{rmr}\%}$ et croissance corporelle exprimés en score SD afin de permettre la comparaison.

26 A, $\text{Glucose}_{\text{rmr}\%}$ (rouge) et dw/dt (bleu) chez l'homme. B, $\text{Glucose}_{\text{rmr}\%}$ (rouge) et dw/dt (bleu) chez la femme
 27 (Kuzawa *et al.* 2014).
 28

1 Enfin, Goyal *et al.* (2014), par le biais de méta-analyses à partir d'études du métabolisme cérébral
2 du glucose, de la consommation cérébrale en O₂ et du débit sanguin cérébral, illustrent clairement
3 l'évolution similaire de ces 3 paramètres de l'activité fonctionnelle cérébrale tout au long de la vie
4 avec un pic d'activité fonctionnelle cérébrale chez l'enfant avant 10 ans (Figure 25).



5
6 Figure 25 : Métabolisme cérébral au cours de la vie normalisé par rapport aux valeurs moyennes de l'adulte
7 et montrant, au début de l'enfance, l'augmentation d'un facteur 2 environ de la consommation cérébrale de
8 glucose (bleu), d'un facteur 1,5 pour la consommation cérébrale en O₂ (rouge) et d'un facteur 2,0 pour le
9 débit sanguin cérébral (orange) (Goyal *et al.* 2014).

10 5.2.1.5 Corrélatifs cognitifs

11 Les changements, au cours du développement, de l'épaisseur corticale et du volume cérébral
12 notamment, sont en accord avec un certain nombre de données sur la maturation des fonctions
13 motrices et cognitives comme l'attention, la mémoire de travail, le contrôle cognitif et les réponses
14 inhibitrices (Walhovd *et al.* 2014). Par exemple, dans les régions motrices, la diminution de
15 l'épaisseur corticale est corrélée aux aptitudes motrices fines, dans les aires du langage, elle est
16 corrélée avec les aptitudes phonologiques et dans les régions pariétales et frontales, avec une
17 amélioration des performances dans un test d'intelligence verbale (Toga *et al.* 2006). De même, le
18 rétrécissement de l'épaisseur de la matière grise corticale dans l'hémisphère gauche est corrélé à
19 de meilleures performances dans un test de vocabulaire de mesure du QI (Sowell *et al.* 2004a et
20 2004b). D'autres données montrent que la baisse de l'impulsivité et l'augmentation du contrôle
21 cognitif ou la prise de décision au cours de l'enfance et de l'adolescence seraient en lien avec le
22 développement morphologique et fonctionnel tardif du cortex préfrontal (Casey *et al.* 2008).
23 Tamnes *et al.* (2014) montrent, chez des sujets âgés de 8 à 21 ans, que les variations de volume
24 des différentes sous-régions de l'hippocampe - une structure clé de la mémoire - au cours du
25 développement prédisent, au moins en partie, les capacités d'apprentissage et de mémorisation.
26 Enfin, Klingberg *et al.* ont montré en IRM le rôle de la maturation d'un circuit fronto-pariétal et
27 fronto-striatal dans le développement des capacités de mémoire de travail chez des enfants entre
28 6 et 25 ans (Nagy *et al.* 2004, Darki & Klingberg 2014).

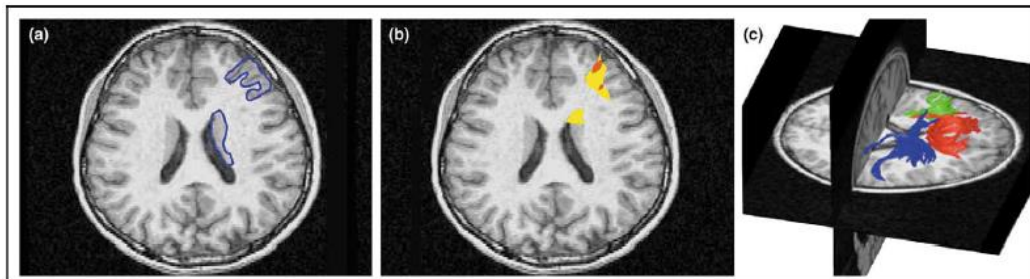
29 Ces données montrant une corrélation entre d'une part une épaisseur corticale (négative) ou le
30 développement de la matière blanche et de la connectivité (positive) et d'autre part des
31 améliorations de certaines fonctions cognitives demandent à être confirmées. En effet, il existe une
32 variabilité élevée entre les paramètres de développement structural ou fonctionnel du cerveau et le
33 comportement/la cognition à un âge donné : ce qui probablement est le reflet d'une relation
34 complexe et dynamique entre ces paramètres et qui de plus, pose la question de la définition de la
35 normalité et donc celle de la pathologie (Walhovd *et al.* 2014). Ainsi, bien que le rétrécissement de
36 l'épaisseur corticale ou la myélinisation des axones soient considérés comme des marqueurs
37 fiables de la maturation, les corrélats spécifiques cognitifs de ces changements anatomiques
38 restent à élucider.

1 5.2.1.6 Les techniques d'imagerie non invasive pour l'étude du développement du cerveau 2 humain

3 L'avènement des techniques d'imagerie non invasive a rendu possible l'étude approfondie des
4 changements structuraux et fonctionnels au cours de la vie et a conforté et complété les études
5 histologiques *post-mortem*. De plus, l'imagerie cérébrale non invasive permet des études
6 longitudinales, c'est-à-dire le suivi à différentes périodes de la vie du sujet.

7 Ainsi, l'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) permet de mesurer le volume et la
8 surface de la substance blanche (SB) et de la matière grise (MG) ainsi que l'épaisseur ou la
9 densité corticale, reflétant en partie le nombre de cellules au sein des colonnes corticales (IRM
10 structurale ou morphologique). Elle permet également d'évaluer le degré de maturation des fibres
11 de SB (microstructure, longueur) et donc la connectivité (imagerie en tenseur de diffusion, ITD
12 [*tensor diffusion imaging*], ou tractographie). Enfin l'IRM fonctionnelle (IRMf) permet d'investiguer
13 l'activité cérébrale en mesurant le degré d'oxygénation de l'hémoglobine (vs désoxyhémoglobine)
14 (Figure 26).

15 La densité de matière grise est une mesure indirecte de l'architecture complexe de la glie, des
16 vaisseaux et des neurones avec leurs prolongements dendritiques et leurs synapses, alors que la
17 substance blanche doit sa couleur à la myéline. La myéline est constituée par les prolongements
18 des oligodendrocytes qui entourent les axones, formant ainsi des gaines blanches qui augmentent
19 de manière drastique la vitesse de propagation du signal nerveux par leur propriété isolante.



20

21 Figure 26 : Méthodes d'IRM couramment utilisées pour l'étude du développement cérébral chez l'Homme.

22

23 (a) L'IRM morphologique mesure la taille et la forme des structures cérébrales (ex : le noyau caudé et le
24 gyrus frontal inférieur en bleu). (b) L'IRMf mesure les profils d'activité au sein des structures (jaune et rouge).

25

26 (c) Le TDI (Tissue doppler imaging) mesure la connectivité des tractus de fibres nerveuses (rouge, bleu et
vert) entre les structures (Casey et al 2005).

26

27 5.2.2 Développement de la fonction de reproduction

28

29 *Le paragraphe ci-après a été repris du rapport « Reproduction et environnement » de l'expertise
collective de l'Inserm (Inserm 2011).*

30

31 Au début du développement foeto-embryonnaire, les gonades et les ébauches des organes
32 génitaux sont indifférenciées, tandis que les voies génitales sont bisexuées. Le gène SRY (*sex
33 determining region of Y gene*), localisé sur le chromosome Y, contrôle le signal qui détermine la
34 formation du testicule et le blocage du développement embryonnaire en ovaire. Le double système
de voies génitales internes se différencie :

35

36 - chez le mâle, à partir des canaux de Wolff, en épидидyme, canal déférent et vésicules
séminalles ;

37

- chez la femelle, à partir des canaux de Müller, en utérus.

38 **Chez les garçons**

39

40 La différenciation chez le garçon (présence du gène SRY) dépend de l'activité hormonale du
testicule foetal qui sécrète deux hormones :

41

- l'hormone anti-müllérienne (AMH) par les cellules de Sertoli, responsable de la régression des

1 canaux de Müller ;

2 - la testostérone par les cellules de Leydig, responsable du maintien des canaux de Wolff. La

3 testostérone et ses dérivés favorisent également le développement des organes génitaux externes

4 (urètre, prostate, pénis, bourses).

5 Peu de temps avant la naissance, les testicules, situés dans l'abdomen, descendent dans le

6 scrotum. Cette migration est également sous le contrôle de la testostérone et d'une autre hormone

7 sécrétée par les cellules de Leydig, l'*insuline-like factor 3* (INSL3). L'appareil génital est achevé à

8 la fin du premier trimestre de grossesse. La poursuite de la maturation ne s'effectue que lentement

9 pour s'achever au moment de la puberté. Les cellules germinales souches du testicule immature

10 (gonocytes) restent inactives jusqu'à la puberté puis se transforment en spermatogonies souches.

11 Par des divisions et des différenciations successives, ce réservoir de cellules souches donne

12 naissance aux spermatozoïdes. La spermatogenèse se poursuit tout au long de la vie. Comme

13 toutes les glandes endocrines, le testicule est sous le contrôle du complexe hypothalamo-

14 hypophysaire. La gonadotrophine (GnRH), libérée par l'hypothalamus, stimule la sécrétion de deux

15 hormones hypophysaires :

16 - la folliculostimuline (FSH) : la FSH agissant sur les cellules de Sertoli participe à l'initiation de la

17 spermatogenèse ;

18 - l'hormone luthéinisante (LH) : à la puberté, la LH augmente la production de testostérone qui

19 agit directement sur les cellules de Sertoli pour assurer le bon déroulement de la spermatogenèse.

20 **Chez les filles**

21 Dans l'embryon féminin (en l'absence de SRY et grâce à l'expression d'autres gènes), la gonade

22 indifférenciée se transforme en ovaire. En l'absence de testostérone et d'AMH, les canaux de

23 Wolff régressent tandis que les canaux de Müller se différencient en trompes de Fallope, utérus, et

24 partie supérieure du vagin. Les organes génitaux externes se développent également.

25 Chez la fille, toutes les cellules germinales souches, les ovogonies, cessent de se diviser avant la

26 naissance, après leur transformation en ovocytes à la première division méiotique. La plupart des

27 ovocytes bloqués en phase de méiose disparaissent après la naissance et après la puberté. Le

28 stock de cellules germinales disponibles est donc limité.

29 Chez la femme, les ovaires produisent des ovules et sécrètent deux hormones, l'œstradiol et la

30 progestérone. À la puberté, les ovocytes localisés dans les follicules primordiaux entrent

31 régulièrement en croissance selon un processus dénommé folliculogenèse qui conduit l'ovocyte

32 vers l'ovulation. Les cellules de la granulosa deviennent alors sensibles à la FSH et vont continuer

33 à se multiplier et à se différencier (comme les cellules de Leydig chez le mâle). Les androgènes

34 sécrétés diffusent dans les cellules de la granulosa et, sous l'influence de la FSH, sont transformés

35 en œstradiol. La différenciation des cellules de la granulosa produit également le liquide folliculaire

36 et le follicule devient le follicule à antrum. La sécrétion brutale de LH déclenche la maturation finale

37 de l'ovocyte et l'ovulation.

38

1

2 5.2.3 Transposition des résultats obtenus sur des animaux à l'Homme

3 Lorsque des données obtenues directement chez l'Homme (dans le cadre d'études cliniques ou
4 épidémiologiques) ou indirectement sur des tissus humains ne sont pas disponibles, mais que des
5 effets sont observés chez l'animal, il est important de s'interroger sur la plausibilité de l'existence
6 d'effets similaires chez l'Homme : les mécanismes d'action sont-ils spécifiques à l'animal ? Y a-t-il
7 des différences entre les espèces de laboratoire si plusieurs espèces ont été testées ? *etc.* Les
8 rongeurs sont souvent utilisés comme modèle d'étude des effets potentiels des radiofréquences.
9 Leur petite taille permet en effet d'exposer plusieurs individus en même temps, dans des
10 conditions plus ou moins identiques, et leur durée de vie limitée autorise une exploration des effets
11 pendant les différents stades de leur vie, voire sur plusieurs générations.

12 Sengupta (2013) a publié une revue recensant de nombreux travaux visant à rapprocher les âges
13 du rat et de l'Homme. De nombreuses méthodes ont été utilisées par les chercheurs pour corrélérer
14 l'âge de rongeurs avec celui de l'Homme, tels que l'utilisation du poids du cristallin, la taille des
15 dents, le nombre de lamelles de l'endoste du tibia, la calcification du cartilage de l'épiphyse des os,
16 ou la proportionnalité entre les périodes de vie. Les auteurs ont corréler l'âge du rat et de l'Homme
17 en fonction des différentes périodes de la vie. Ainsi, sur la base de l'espérance de vie d'environ 2 à
18 2,5 ans chez le rat au laboratoire et 80 ans chez l'Homme, 1 année chez l'Homme équivaldrait à
19 environ 14 jours chez le rat, et 1 jour de vie chez le rat est estimé à environ 30 jours chez
20 l'Homme. En revanche, sur les différentes périodes de développement, ces estimations changent.
21 Les résultats sont présentés dans le Tableau 12.

22

23 Tableau 12 : Corrélration entre l'âge des rats et de l'Homme en fonction des différentes phases de la vie
24 d'après (Quinn 2005, Sengupta 2013)

	Sur la durée de vie totale	Sur la période de sevrage	Pendant la puberté	À l'âge adulte	Au cours de la ménopause	Lors de la sénescence
1 jour de rat équivalent à	26,7 jours humains	8,6 jours humains	110 jours humains	34,8 jours humains	31,0 jours humains	21,4 jours humains
1 année humaine équivalent à	13,8 jours de rat	42,4 jours de rat	3,3 jours de rat	10,5 jours de rat	11,8 jours de rat	17,1 jours de rat

25 Les auteurs concluent ainsi que l'âge relatif de l'animal est différent en fonction de la période de
26 vie, c'est pourquoi il est indispensable de déterminer au préalable quel est l'âge pertinent pour
27 l'investigation à mener et les facteurs à analyser.
28

29 5.2.3.1 Éléments de comparaison entre le développement cérébral chez les animaux de 30 laboratoire et chez l'Homme

31 Il est généralement admis que le cerveau en développement est qualitativement différent du
32 cerveau adulte et ceci chez l'Homme comme chez les mammifères. Des études comparatives
33 entre mammifères ont très largement montré une conservation importante des
34 événements/séquences neuro-développementaux(ales) au travers des espèces. Il est ainsi admis
35 que le développement régional global est similaire entre les rongeurs (rat, souris) et l' Homme, de
36 même que l'ordre dans lequel les différentes structures cérébrales se développent, soit la moelle
37 épinière et les structures postérieures (phylogénétiquement les plus anciennes) en 1^{er},
38 l'hippocampe et les cortex limbiques en dernier, quant-au cervelet, son développement couvre une
39 période très étendue, depuis la gestation et qui se prolonge au-delà de la naissance chez l'Homme

1 comme chez le rongeur (jusqu'au 20^e jour postnatal). De plus, la majorité des structures cérébrales
2 organisées en réseaux/circuits neuroanatomiques qui sous-tendent l'une ou l'autre fonction (ex :
3 sensorielle, motrice...) chez l'Homme, sont aussi présentes chez le rongeur et sous-tendent
4 globalement les mêmes fonctions (Rice & Barone 2000). Cependant, il existe des différences pour
5 certaines structures comme celle du système olfactif beaucoup plus développé chez le rongeur,
6 alors que le néocortex, en particulier le cortex préfrontal, l'est beaucoup plus chez l'Homme. Enfin,
7 l'Homme a un cerveau gyrencéphalique, alors que le rat a un cerveau lissencéphalique (absence
8 de sillons).

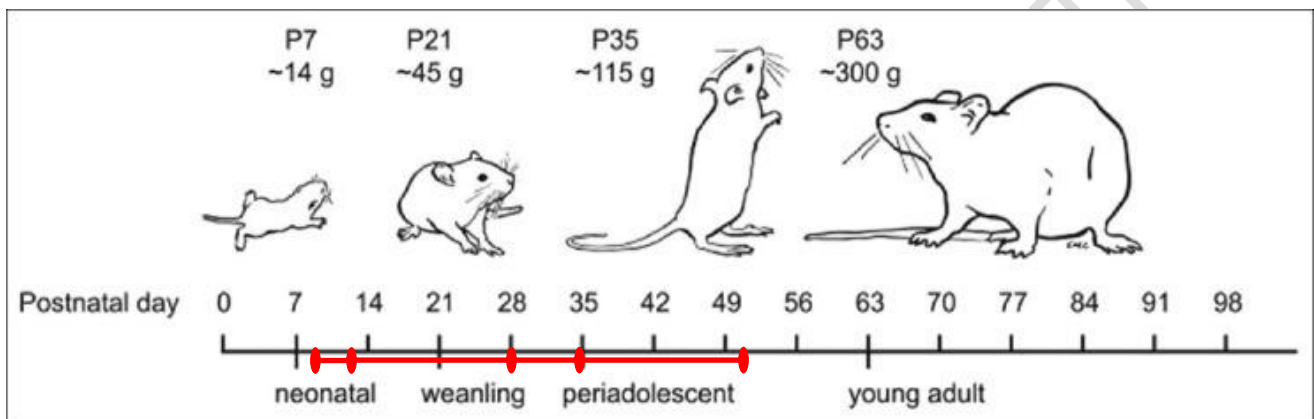
9 S'il existe de réelles similitudes entre le développement des diverses espèces animales, le
10 décours temporel peut être très différent (e.g., Finlay & Darlington, 1995). Ainsi, une des
11 caractéristiques du développement cérébral du rongeur (rat, souris) est qu'il est surtout postnatal
12 et rapide (environ 3 mois depuis la conception dont 21 jours *in utero*), alors que c'est l'inverse chez
13 l'Homme dont le développement prénatal cérébral est considérable et se poursuit après la
14 naissance pendant environ 20 ans. Quelle que soit l'espèce, la naissance ne représente pas une
15 période particulière de changement absolu dans le développement du cerveau, ni la fin d'un
16 processus de développemental particulier. Ainsi, le développement du rat se décline en jours,
17 contre des mois ou années chez l'Homme. Cependant, malgré les connaissances accumulées sur
18 le développement du cerveau humain et celui du rongeur, il existe une réelle difficulté à établir une
19 correspondance précise en jours/mois ou années entre les différentes périodes du développement
20 chez l'Homme et le rat ou la souris. En effet, celle-ci dépend des paramètres envisagés :
21 neurogenèse, croissance cérébrale, activité électrique, etc. Ainsi, Dobbing, en mesurant le pic de
22 croissance cérébrale (% du poids adulte) montre que le raton âgé de 10 jours est équivalent à un
23 nouveau-né humain à la naissance et que la fin du pic de croissance vers 25 jours chez le rat
24 correspond à celui d'un enfant de 3-4 ans (Dobbing 1971). Alling (1985) et Winick (1975) étudiant
25 la biochimie cérébrale (ADN, protéines et cholestérol) situent la naissance chez l'Homme entre le
26 8^{ème} et le 10^{ème} jour postnatal chez le rat, et la naissance du rat à la 25^{ème} semaine de gestation (fin
27 du 2^{ème} trimestre) chez l'Homme. Romijn *et al.* (1991) ont proposé une correspondance entre le
28 cerveau de rat de 12-13 jours et le cerveau humain à la naissance sur la base de l'activité
29 électrique (EEG), alors que pour le nombre de synapses, cette correspondance avec le cerveau
30 humain à la naissance serait plutôt vers 14-15 jours et pour l'activité de 2 enzymes du
31 métabolisme du GABA et de l'acétylcholine (deux neurotransmetteurs majeurs), vers 8-9 jours et
32 20 jours respectivement. Rice et Barone (2000), considérant la neurogenèse, proposent que le rat
33 à la naissance soit équivalent à un fœtus humain de 19-20 semaines et le rat âgé de 16-19 jours
34 postnatals au nouveau-né humain. Enfin, la période couvrant la puberté et l'adolescence chez
35 l'Homme qui débute vers l'âge de 10-12 ans, se situerait chez le rat entre le 28^e jour et le 60^e jour
36 postnatal (maturité sexuelle entre P42 et P60) : à 60 jours, le rat est considéré comme un jeune
37 adulte (Spear 2000).

38 Certains modèles sont validés et un certain nombre de comportements ou de fonctions, ainsi que
39 leurs mécanismes sous-jacents, sont considérés comme homologues entre les modèles et
40 l'Homme, car issus d'un caractère ancestral commun. Par exemple, certains comportements
41 moteurs (préhension, tremblement, akinésie) et les mécanismes qui les sous-tendent impliquant
42 des structures cérébrales spécifiques (les noyaux gris centraux ou noyaux de la base³⁰), sont
43 considérés comme comparables entre le rat et l'Homme. En revanche, pour d'autres fonctions ou
44 comportements, il n'existe qu'un rapport d'analogie qui nécessite plus de prudence quant à une
45 extrapolation de l'animal à l'Homme.

³⁰ Noyaux de la base : ensemble de structures bilatérales sous corticales interconnectées, situées à la base du cerveau et impliquées en particulier dans la fonction motrice et donc le mouvement, sa programmation et son contrôle. Les principales structures sont : le noyau caudé et le putamen, le globus pallidus, le noyau sous thalamique et la substance noire

1 En conclusion, des données de la littérature permettent de proposer une échelle de
 2 correspondance entre l'âge de l'animal et celui de l'Homme, mais qui est sujette à modifications en
 3 fonction des paramètres de développement considérés et qui toutes pointent la difficulté à établir
 4 des correspondances précises. Il existe cependant un consensus sur le fait que le rat ou la souris
 5 naît beaucoup plus immature que l'Homme au plan du développement cérébral notamment
 6 (environ le début du 3^e trimestre de la gestation chez le fœtus humain) et qu'à 10-12 jours, le jeune
 7 rat présente un développement cérébral qui peut être comparé à celui du nouveau-né humain.
 8 Ensuite, le début de la puberté et de l'adolescence est estimé vers 28 jours chez le rongeur et il
 9 est considéré comme adulte vers 60 jours (la maturité sexuelle s'atteignant entre le 42^{ème} et le
 10 60^{ème} jour) (voir figure ci-dessous).

**Développement cérébral chez le rat et l'Homme:
 Éléments de comparaison**



11
 12

Âge du rat	10 – 12 jours	12 – 28 jours	28 – 35 jours	35 – 50 jours
Âge humain	Naissance	Enfant de 8 – 10 ans	Adolescent de 11 - 13 ans	Adolescent de 14 – 18 ans

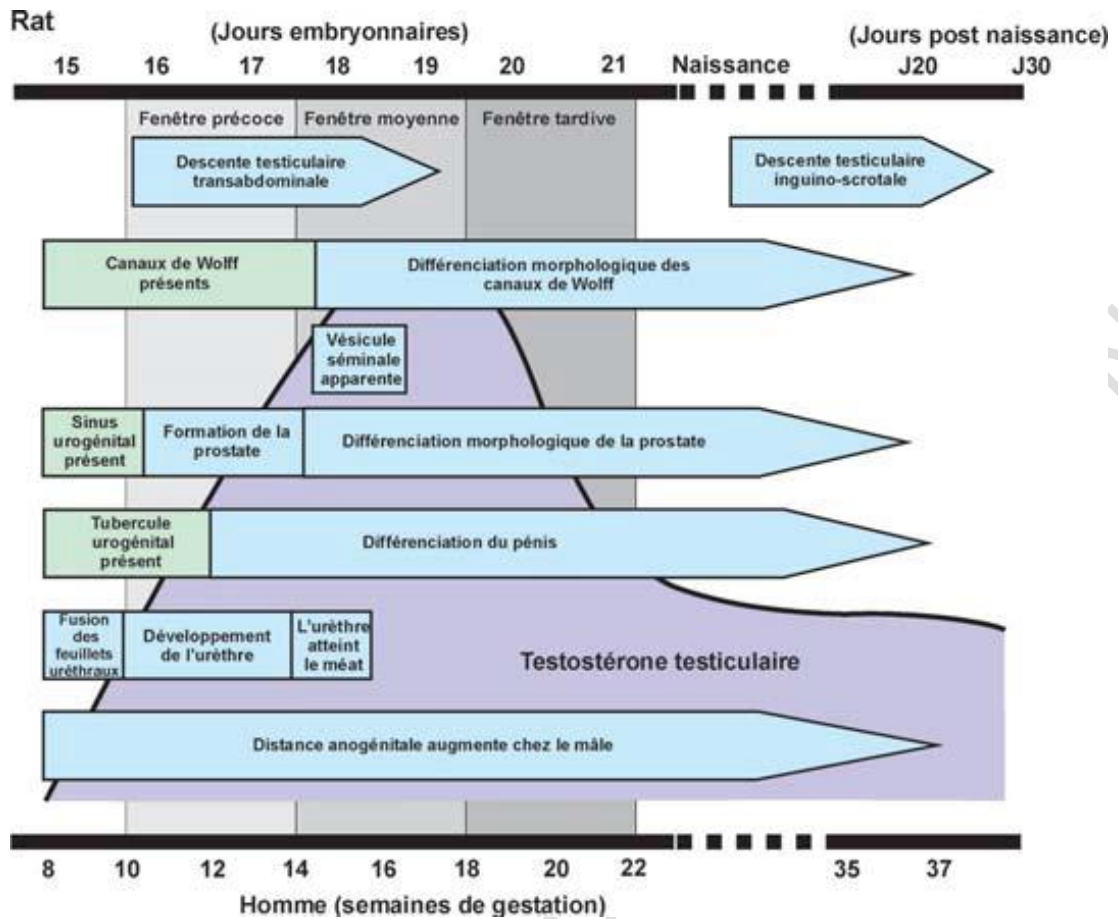
13 Figure 27 : Développement cérébral chez le rat et l'Homme (graphe modifié à partir d'Alling (1985))

14

15 **5.2.3.2 Éléments de comparaison entre le développement de la fonction de reproduction chez les**
 16 **animaux de laboratoire et chez l'Homme**

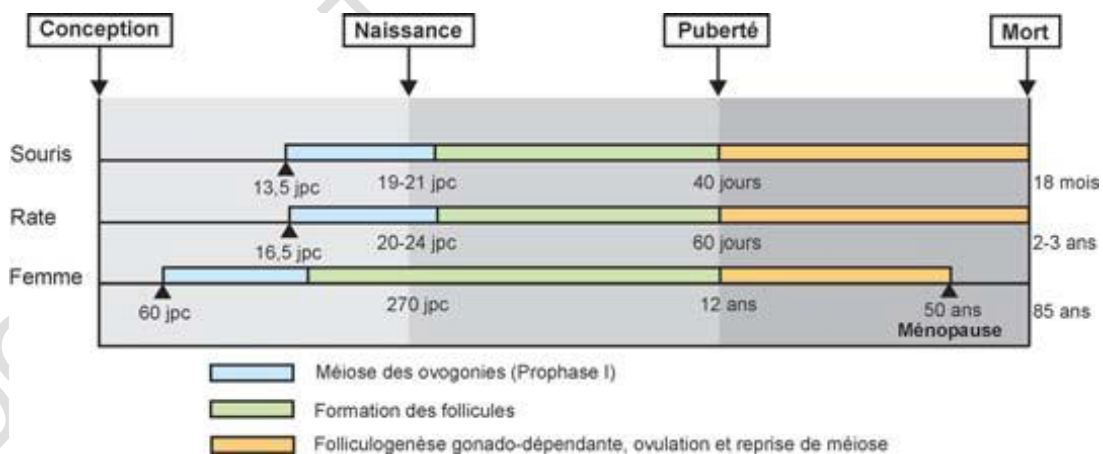
17 *Le paragraphe ci-après a été repris du rapport « Reproduction et environnement » de l'expertise*
 18 *collective de l'Inserm (2011).*

19 Il existe des différences importantes entre espèces dans le déroulement de la différenciation
 20 sexuelle et dans les mécanismes qui les régulent. Les rongeurs ne représentent pas l'ensemble
 21 des mammifères et ont des particularités qui en font souvent une exception plus qu'un modèle
 22 universel. Les différentes étapes du développement ovarien et testiculaire, bien que globalement
 23 similaire chez tous les mammifères, présentent des variations importantes entre espèces et ne se
 24 déroulent pas pendant des périodes similaires (voir Figure 28 et Figure 29).
 25



Source : INSERM 2011 (d'après Welsh et al. 2008)

Figure 28 : Diagramme représentant les principales périodes du développement du tractus génital mâle chez l'humain et le rat en relation avec la production de testostérone.



Source : INSERM 2011 (d'après Monniaux et al. 2009)

Figure 29 : Comparaison des périodes de différenciation ovarienne chez différents mammifères (jpc : jours post conception)

Il existe également des différences physiologiques au niveau de la fonction reproductive entre mammifères à prendre en compte lors de l'extrapolation entre les rongeurs et l'espèce humaine. Par exemple, l'ouverture vaginale qui signe le début de la puberté chez la souris mais qui n'existe pas chez la femme.

1 De plus, comme vu dans le chapitre précédent, les rongeurs naissent très immatures par rapport à
2 d'autres mammifères comme le singe, le cheval, le cochon ou l'Homme. La période néonatale
3 chez les rongeurs correspond du point de vue du développement au 3^e trimestre de la gestation
4 chez l'Homme, et c'est vers l'âge de 10 - 12 jours que le rongeur peut être comparé au nouveau-
5 né humain (voir 5.2.3.1). Ces différences de « timing » et de vitesse de croissance entre les
6 différentes espèces sont donc à prendre en compte lorsqu'il s'agit d'extrapoler les données
7 animales à l'Homme. En conséquence, la correspondance entre l'ontogénèse du développement
8 ovarien par exemple et le développement du système nerveux central diffère entre l'Homme et le
9 rat, de telle sorte que des perturbations durant la gestation pourraient ne pas avoir le même impact
10 sur le développement. Par ailleurs, les rongeurs naissent en nombre largement plus élevé, ce qui
11 augmente la variabilité quant à l'exposition individuelle. Il est donc clair qu'il faut être prudent pour
12 extrapoler les résultats obtenus chez la souris à l'Homme et prendre en compte les différences
13 chronologiques et physiologiques qui existent entre les 2 espèces. D'autres modèles animaux
14 peuvent se révéler plus pertinents que le rongeur, notamment ceux qui ont des durées de
15 gestation et de vie longue, et qui n'ont qu'un seul petit par portée, comme par exemple les
16 ruminants ou les porcs.

17 Les effets d'exposition *in utero* peuvent se révéler à très long terme et parfois s'atténuer avec le
18 temps. Il est donc indispensable de réaliser des études longitudinales avec plusieurs moments
19 d'investigation (à la naissance, au sevrage, à la puberté, à l'âge adulte). L'intervalle de temps entre
20 l'arrêt de l'exposition et le moment de l'étude doit être pris en compte car il peut expliquer une
21 partie des résultats contradictoires de la littérature scientifique (Inserm, 2011).

23 5.3 Études sur le système nerveux

24 5.3.1 Effets biologiques et mécanistiques

25 5.3.1.1 Effets sur la barrière hémato encéphalique

26 Kuribayashi *et al.* (2005) ont exposé la tête de rats âgés de 4 ou 10 semaines, 90 min / jour 6 jours
27 par semaine pendant une ou deux semaines à un signal de 1 439 MHz (TDMA) à deux niveaux de
28 DAS : 2 ou 6 W/kg. Les données dosimétriques fournies sont satisfaisantes. Un groupe de rats
29 contrôle positif recevant du 1,3 dinitrobenzène a été inclus dans l'étude. Les effets sur la barrière
30 hémato-encéphalique (BHE) ont été évalués par la quantification d'ARNm de gènes spécifiques de
31 la BHE tels que ceux codants pour la p-glycoprotéine, l'aquaporine-4 et la claudine-5. L'expression
32 de ces 3 gènes n'est pas modifiée après exposition au signal radiofréquence, quels que soient les
33 niveaux d'exposition et l'âge des animaux. La perméabilité vasculaire, évaluée par l'observation
34 des coupes de cerveau au microscope à fluorescence (FITC-dextran) et par immunohistochimie de
35 l'albumine, n'est également pas affectée par l'exposition aux radiofréquences. Les auteurs
36 concluent que l'exposition aux ondes électromagnétiques à 1 439 MHz n'a pas d'effet délétère sur
37 la BHE chez des rats jeunes ou adultes.

38 Finnie *et al.* (2006a) ont exposé des souriceaux nouveau-nés à un signal GSM à 900 MHz
39 (DAS = 4 W/kg) 60 min / jour pendant les 7 premiers jours après la naissance. Les animaux sont
40 répartis en 4 groupes, à raison de 10 souris par groupe : exposés, témoins, contrôle cage et
41 contrôle positif (injection de chlorure de cadmium). Les conditions expérimentales sont présentées
42 succinctement car il s'agit d'une lettre, le système d'exposition et la dosimétrie ne sont pas décrits.
43 Ils n'ont pas observé d'extravasation de l'albumine chez les souriceaux nouveau-nés.

44 Ces mêmes auteurs n'avaient pas trouvé d'effet dans les mêmes conditions d'exposition sur des
45 cerveaux de fœtus de souris exposés durant toute la gestation. De même, une telle exposition,
46 administrée *in utero*, du premier au 19^e jour de gestation (GD 1 - GD 19), n'a pas entraîné
47 d'extravasation de l'albumine dans le cerveau des fœtus, prélevés à GD 19 (Finnie *et al.* 2006b).
48 Enfin, cette même équipe n'avait pas mis non plus en évidence de modification de la perméabilité
49 de la BHE (extravasation de l'albumine) après une exposition chronique pendant toute la vie (2 ans)

1 à un DAS de 4 W/kg (60 min / jour, 5 jours par semaine) ayant débuté à l'âge de 8 semaines.
2 (Finnie et al. 2002).

3 Kumlin *et al.* (2007) ont exposé des rats Wistar âgés de 21 jours pendant 5 semaines consécutives
4 (2 h / jour et 5 jours / semaine) à un signal GSM à 900 MHz (DAS de 0,3 et 3 W/kg). Une étude
5 immunohistochimique cérébrale a ensuite été réalisée, parallèlement à des tests de comportement
6 connus pour être révélateurs de changements de comportement neurologique après exposition
7 postnatale à des toxiques (voir § 1.2.4). L'étude de la perméabilité de la BHE par la technique
8 utilisant le bleu Evans ne montre pas d'effet de l'exposition aux radiofréquences (voir § 1.2.1 pour
9 les effets sur la morphologie et l'histologie cérébrale).

10 Le groupe de travail « Radiofréquences et santé », à l'occasion de son travail sur la mise à jour
11 des connaissances concernant les effets sanitaires des radiofréquences publié le 15 octobre 2013,
12 n'avait pas identifié d'études sur l'animal juvénile portant sur la barrière hématoencéphalique.
13

1
2
3
4
5

Tableau 13 : Études investiguant l'altération de la barrière hémato encéphalique. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux / groupe	Résultats <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Finnie <i>et al.</i> , 2002	Signal GSM 900 MHz DAS = 0,25 ; 1 ; 2 ; et 4 W/kg 2h/j, 5 j / semaine pendant 104 semaines	Souris 8 semaines	Extravasation de l'albumine	10 animaux par groupe	Pas d'effet sur l'intégrité de la BHE
Kuribayashi <i>et al.</i> , 2005	Signal TDMA 1439 MHz DAS = 0,2 et 6 W/kg 90 min/jour, 6 j /semaine pendant 1 ou 2 semaines	Rat 4 ou 10 semaines	Extravasation de l'albumine	5 animaux par groupe	Pas d'effet sur l'intégrité de la BHE Pas d'effet sur les gènes liés à la BHE
Finnie <i>et al.</i> , 2006a	Signal GSM 900 MHz DAS = 4 W/kg 2h/j, 5 j / semaine pendant 5 semaines	Souris Dès naissance	Extravasation de l'albumine	10 animaux par groupe	Pas d'effet sur la perméabilité des vaisseaux sanguins à l'albumine
Finnie <i>et al.</i> , 2006b	Signal GSM 900 MHz DAS = 4 W/kg 2h/j, 5 j / semaine, GD 1 - GD 19	Souris <i>In utero</i>	Extravasation de l'albumine	10 animaux par groupe	Pas d'effet sur la perméabilité des vaisseaux sanguins à l'albumine chez les fœtus de souris
Kumlin <i>et al.</i> , 2007	Signal GSM 900 MHz DAS = 0,3 et 3 W/kg 2 h/j, 5 j / semaine pendant 5 semaines	Rat 21 jours	Perméabilité de la BHE par visualisation de la pénétration intracérébrale du Bleu Evans	6 animaux par groupe (2 sections / animal)	Pas d'effet sur l'intégrité de la BHE

Chez l'animal, les études convergent vers une *absence d'effet* d'une exposition à un signal radiofréquences sur la BHE chez le rat ou la souris immature. Comme dans les études chez le rongeur adulte (voir rapport Anses 2013), une exposition aiguë ou chronique aux radiofréquences ne semble pas affecter la perméabilité de la BHE quel que soit le signal (TDMA 1439 MHz ou GSM 900 MHz).

5.3.1.2 Effets sur la réponse cellulaire – le stress oxydant et la neuroinflammation

5.3.1.2.1 Études *in utero*

Finnie *et al.* (2009) ont exploré l'expression de protéines de stress (HSP 25, 32, 70) dans le cerveau de fœtus de souris exposées *in utero* (GD 1 – GD 19) à un signal GSM 900 MHz, 60 min par jour. Le DAS était de 4 W/kg et la température régulée. Trois groupes (exposé, témoin, témoin-cage) de 10 souris ont été inclus dans l'étude. Des mesures ont été effectuées par immunohistochimie sur les cerveaux de fœtus (un par portée) à la fin de la gestation, juste avant parturition.

Aucune différence d'expression des protéines de stress inductibles (HSP 32 et 70) n'a été observée entre les différents groupes au niveau du cerveau des fœtus.

Les auteurs suggèrent que l'expression de ces protéines peut être relativement éphémère (de quelques heures à quelques jours, suivant les modèles utilisés) et, donc, peut être difficile à mettre en évidence.

Güler *et al.* (2010) ont étudié les effets d'une exposition aux radiofréquences sur l'oxydation de l'ADN chez des lapines. Celles-ci ont été exposées à un signal de type GSM 1 800 MHz (DAS non précisé), 15 min par jour, pendant 7 jours (de GD 15 - GD22). L'expérimentation a été conduite sur 4 groupes de 9 animaux chacun : femelles en gestation ou non, exposées ou non. Les cerveaux des mères et d'un nouveau-né par portée ont été prélevés afin d'en extraire l'ADN. La présence de 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine (8-OHdG) (marqueur de l'oxydation de l'ADN) et de malondialdéhyde (MDA, marqueur de la peroxydation lipidique) a été recherchée et quantifiée par HPLC. Les auteurs ont mis en évidence une augmentation statistiquement significative de la 8-OHdG et de MDA chez les femelles exposées, qu'elles soient en gestation ou non, mais aucune différence n'a été observée entre les groupes d'animaux exposés et non exposés chez les nouveau-nés (Guler *et al.*, 2010).

Aït-Aïssa *et al.* (2010) ont évalué les effets sur la gliose et l'apoptose de rats exposés 2 h / j, 5 j / semaine de façon prénatale seulement (GD 6 – GD 21) et pré- et post- natale (GD 6 – PND³¹ 35) à un signal Wi-Fi de 2,45 GHz (3 niveaux d'exposition : DAS = 0,08 ; 0,4 et 4 W/kg). Un groupe témoin d'animaux subissant une exposition factice et un groupe contrôle-cage ont également été intégrés. Chaque condition comprenait 12 animaux. La détection de gliose (dosage de la protéine GFAP) et de cellules apoptotiques (Méthode TUNEL de détection des cassures d'ADN) a été réalisée au niveau de différentes régions du cerveau des jeunes rats (hippocampe, cortex, striatum, amygdale et zone pré-optique). Aucune altération n'a été observée suite à l'exposition prénatale seule et pré- et post- natale.

5.3.1.2.2 Études combinées pré- et post- natales ou postnatales seules

Paulraj & Behari (2006a) ont exposé des rats de 35 jours à un signal radiofréquences de 2,45 ou 16,5 GHz (DAS estimé à 1,0 et 2,0 W/kg). Les animaux ont été exposés 2 heures / jour, 5 jours par semaine, pendant 35 jours. Les animaux ont ensuite été euthanasiés et le test des comètes a été réalisé sur le tissu cérébral.

³¹ PND : *Postnatal Day*, c'est-à-dire le nombre de jours après la naissance.

- 1 Aucune différence significative n'a été notée entre les résultats des animaux issus d'un même
2 groupe. En revanche, une augmentation des cassures simple-brin de l'ADN a été constatée chez
3 les rats exposés par rapport au groupe témoin, quelle que soit la fréquence du signal.
- 4 Les limites de cette étude résident en l'absence de dosimétrie numérique et expérimentale, et le
5 DAS est estimé théoriquement selon une méthode publiée en 1978 [Durney *et al.*, 1978]. De plus,
6 compte tenu de la disposition des rats décrite par les auteurs, il est possible que l'exposition de
7 tous les animaux n'ait pas été identique, la cage étant située en face de l'antenne cornet, les 6
8 animaux par cage étant alignés sur 2 rangées.
- 9 Paulraj & Behari (2006b) ont mesuré l'activité de la protéine kinase C (PKC) grâce à l'ATP marqué
10 au phosphore 32 sur des cerveaux de 6 rats âgés de 35 jours exposés 2 h / jour, 5 jours par
11 semaine pendant 35 jours (DAS = 0,11 W/kg) à des ondes de fréquence 2,45 GHz (de type non
12 précisé). Les rats ont été divisés en deux groupes : un groupe exposé et un groupe témoin négatif.
13 L'activité de la PKC a été mesurée soit dans tout le tissu cérébral, soit uniquement dans
14 l'hippocampe soit encore dans le restant du cerveau après prélèvement de l'hippocampe.
- 15 Les auteurs ont mis en évidence une diminution significative de l'activité de la PKC dans
16 l'hippocampe si cette activité est comparée à celle du reste du cerveau et à celle du groupe
17 contrôle, ainsi qu'une diminution dans le cerveau total. En revanche, aucune diminution
18 significative de l'activité de la PKC n'a été observée dans le cerveau sans l'hippocampe. À
19 l'analyse histologique, une augmentation de la population gliale au niveau du cortex cérébral dans
20 le groupe exposé a été constatée.
- 21 Les résultats sont peu explicables concernant l'activité de la PKC, étant donné que l'hippocampe
22 occupe une faible portion du volume cérébral et qu'à lui seul il ne peut expliquer une baisse
23 significative de l'activité cérébrale, alors que le reste du cerveau aurait une activité non diminuée.
24 De plus, l'article manque de données importantes (comme le type d'ondes émises) et ne fournit
25 pas de dosimétrie.
- 26 Ammari *et al.* (2010) ont étudié chez des rats de 6 semaines (n = 6) les effets d'une exposition à
27 un générateur de radiofréquences (GSM-like, 900 MHz), 45 min / jour à un DAS de 1,5 W/kg ou
28 15 min / jour à un DAS de 6 W/kg, 5 jours par semaine pendant 8 semaines. L'expression de la
29 GFAP, une protéine spécifique des astrocytes, a été quantifiée dans 5 structures cérébrales
30 (cortex préfrontal, cortex cérébelleux, le gyrus dentelé de l'hippocampe, le globus pallidus latéral
31 du pallidum et le striatum) 3 ou 10 jours après la fin de l'exposition.
- 32 Trois jours après la fin de l'exposition, une augmentation significative de la GFAP est observée
33 pour les deux niveaux d'exposition dans toutes les structures. Dix jours après la fin de l'exposition,
34 l'augmentation reste significative seulement dans une seule structure cérébrale (le globus pallidus)
35 pour l'exposition au DAS faible, et dans 3 structures (hippocampe, cortex préfrontal et globus
36 pallidus) pour l'exposition au DAS élevé. Des effets thermiques sont exclus car l'exposition semble
37 rigoureusement contrôlée (référence à un de leur précédent article de Brillaud *et al.*, 2007). Les
38 auteurs concluent qu'une exposition sub-chronique à un signal de 900 MHz peut affecter de
39 manière transitoire et réversible le cerveau du rat, ici l'augmentation d'un marqueur d'activation
40 gliale pouvant être le reflet d'une réaction de type inflammatoire.
- 41 Kesari *et al.* (2010) ont étudié l'effet des radiofréquences à 2,45 GHz modulées à 50 Hz, sur le
42 cerveau en développement de jeunes rats âgés de 35 jours. Les animaux (n = 6) ont été exposés
43 2 h / j pendant 35 jours, à la densité de puissance de 0,34 mW/cm². Le DAS a été estimé à
44 0,11 W/kg. Les animaux ont ensuite été euthanasiés et le tissu cérébral dans son ensemble a été
45 prélevé afin d'effectuer un test des comètes et un dosage de l'activité de certaines enzymes jouant
46 un rôle dans de stress oxydant (superoxyde dismutase, catalase, glutathion peroxydase, histone
47 H1 kinase).
- 48 Chez les animaux exposés, le test des comètes révèle une augmentation significative des
49 cassures doubles brin de l'ADN, se traduisant par une augmentation de la longueur de la tête et de

1 la queue des comètes et du moment de la queue³². De plus, les animaux exposés présentent une
2 diminution de l'activité des enzymes anti-oxydantes (superoxyde dismutase et glutathion
3 peroxydase) ainsi que de l'histone H1 kinase, mais une augmentation de l'activité de la catalase.
4 Pour les auteurs, ces éléments sont en faveur d'une production d'espèces réactives de l'oxygène
5 suggérant la probabilité d'une promotion cancéreuse.

6 Aït-Aïssa *et al.* (2010) ont évalué les effets sur la gliose et l'apoptose de rats exposés 2 h / j,
7 5 j / semaine de façon prénatale seulement (GD 6 – GD 21) et pré- et post- natale (GD 6 – PND
8 35) à un signal Wi-Fi de 2,45 GHz (3 niveaux d'exposition : DAS = 0,08 ; 0,4 et 4 W/kg). Un groupe
9 témoin d'animaux subissant une exposition factice et un groupe contrôle-cage ont également été
10 intégrés. Chaque condition comprenait 12 animaux. La détection de gliose (dosage de la protéine
11 GFAP) et de cellules apoptotiques (Méthode TUNEL de détection des cassures d'ADN) a été
12 réalisée au niveau de différentes régions du cerveau des jeunes rats (hippocampe, cortex,
13 striatum, amygdale et zone pré-optique). Aucune altération n'a été observée suite à l'exposition
14 prénatale seule et pré- et post- natale.

15 Maskey *et al.*, (2010a) se sont intéressés aux effets d'une exposition chronique (3 mois, GSM
16 835 MHz, DAS de 1,6 W/kg) sur la calbindine D28-K et sur l'expression de la GFAP chez des
17 souris ICR mâles de 6 semaines (Maskey, *et al.* 2010a). Les résultats montrent une augmentation
18 du marquage de la GFAP au niveau de l'hippocampe, avec une présence de cellules apoptotiques
19 dans certaines aires de l'hippocampe. Les auteurs concluent à un effet des radiofréquences sur la
20 viabilité cellulaire, menant à une astrocytose réactionnelle due à la compensation de la perte
21 neuronale.

22 Watilliaux *et al.* (2011) ont étudié chez le jeune rat âgé de 5, 15 ou 35 jours (n = 5 ou 6 par
23 groupe), les effets d'une exposition aiguë (2 h) à un signal de type GSM 1 800 MHz (DAS = 1,7 -
24 2,5 W/kg) sur le stress cellulaire et la réponse gliale. Le stress cellulaire a été évalué par la
25 détection des *heat shock proteins* (HSP60, HSP 90 et HSC70) par *Western Blot* tandis que la
26 réponse gliale (astrocytes et microglie) a été mesurée par un marquage immunohistochimique de
27 diverses protéines comme la GFAP, la sérine-racémase, GLT1, GLAST et CD 68 dans 4 sous-
28 régions cérébrales.

29 Vingt-quatre heures après la fin de l'exposition, aucune modification de l'expression de ces
30 protéines n'a été observée.

31 Cette étude est particulièrement informative, car elle a investigué les expositions chez des
32 animaux immatures de différents âges et concerne plusieurs paramètres de l'inflammation au
33 niveau des cellules gliales et de la microglie ainsi que du métabolisme du glutamate, le
34 neurotransmetteur excitateur majeur du système nerveux central. Ces données semblent montrer
35 que le cerveau très immature (5 et 15 jours chez le rat) ne présente pas une sensibilité particulière
36 à une exposition aiguë aux radiofréquences, par rapport à un cerveau plus développé comme celui
37 du rat de 35 jours. Par ailleurs, les auteurs remarquent qu'il n'est pas exclu que l'anesthésie
38 pendant l'exposition ait interféré avec une réponse cellulaire aux radiofréquences, mais elle a
39 permis d'éviter le stress lié à une contention prolongée et de standardiser la position de la tête
40 dans le dispositif pour une exposition reproductible.

41 Bouji *et al.* (2012a) ont étudié chez des rats jeunes (6 semaines) et adultes d'âge moyen (12 mois)
42 (n = 8 - 9 par groupe), la neuro-inflammation en mesurant l'expression de la GFAP dans le cortex,
43 l'hippocampe et le striatum, ainsi que les interleukines IL-1 β et IL-6 dans le cortex, le cervelet, les
44 régions sous-corticales et les bulbes olfactifs 48 h après la fin d'une exposition de 15 min à un

³² Le moment de la queue des comètes est le produit de la longueur de la queue par la proportion d'ADN dans celle-ci.

1 générateur de signal type GSM (900 MHz, DAS de 6 W/kg). La concentration plasmatique de
2 corticostérone et la mémoire émotionnelle ont également été évaluées (voir § 5.3.2.2).

3 Chez les rats exposés à l'âge de 6 semaines, aucun effet des radiofréquences sur l'expression de
4 la protéine GFAP ou les interleukines n'a été observé dans les différentes structures cérébrales
5 étudiées. Chez les rats exposés à l'âge de 12 mois, les résultats sont similaires à ceux observés
6 chez les jeunes rats, soit une absence d'effet, sauf une augmentation modérée de l'IL-6 dans les
7 bulbes olfactifs.

8 Maaroufi *et al.*, (2014) ont exposé des rats âgés de 4 semaines à un signal de 900 MHz, 1 h / j
9 pendant 21 jours consécutifs. Le DAS a été évalué entre 0,05 et 0,18 W/kg. Trois groupes ont été
10 réalisés : un groupe exposé aux radiofréquences seules, un groupe d'exposition factice et un
11 groupe exposé aux radiofréquences recevant en parallèle une injection quotidienne de sulfate de
12 fer. Des travaux antérieurs ont montré que l'administration de sulfate de fer produit une
13 accumulation de fer dans le cerveau, qui est une hypothèse physiopathologique de maladies
14 neurodégénératives. Le stress oxydant a été évalué en dosant la concentration de l'acide
15 thiobarbiturique (TBARS), de superoxyde dismutase (SOD) et de catalase (CAT) dans le cervelet,
16 le striatum, l'hippocampe et le cortex préfrontal.

17 Aucun des 2 traitements n'induit de stress oxydant, bien que quelques variations complexes des
18 paramètres du stress oxydant aient été relevées. Des lacunes dans la description du protocole
19 d'exposition (méthode d'estimation du champ électrique, pesée du rat pour connaître la variation
20 du DAS, *etc.*) rendent délicate l'interprétation des résultats. De plus, il est regrettable qu'aucun
21 groupe ayant reçu du sulfate de fer sans exposition aux radiofréquences n'ait été inclus dans
22 l'étude.

23 Dans une étude sur la reproduction (voir paragraphe 5.6.2.2), Sangun *et al.* (2014) ont exposé des
24 rats à un signal Wi-Fi (2450 MHz, 0,1 W/kg, 1 h / j). Ils ont réalisé 2 types d'exposition :

- 25 - Exposition prénatale : de GD 0 à la naissance, puis de PND 21 à la puberté (évaluée sur
26 l'ouverture vaginale entre 35 et 73 jours chez la rate).
- 27 - Exposition postnatale : de PND 21 à la puberté.

28 À la puberté, les animaux sont sacrifiés. Des examens histologiques et des indicateurs du stress
29 oxydant (statut oxydant total, statut antioxydant total et index de stress oxydant) sont mesurés
30 dans les organes reproducteurs et le cerveau.

31 Les tissus cérébraux et ovariens des animaux exposés de façon prénatale présentent un statut
32 oxydant augmenté. Aucune différence dans les observations histologiques n'est constatée entre
33 les 3 groupes d'exposition.

34 L'absence de groupe contrôle cage est regrettable, car les paramètres évalués (prise alimentaire,
35 prise de poids) et les conditions d'exposition (contention dans un carrousel d'exposition) sont très
36 impactés par le stress. De plus, les animaux ne semblent pas avoir été habitués préalablement au
37 carrousel. L'interprétation des résultats n'est pas rigoureuse (comparaison avec articles exposant
38 à des champs basses fréquences).

39

40 Le groupe de travail « Radiofréquences et santé », à l'occasion de son travail sur la mise à jour
41 des connaissances concernant les effets sanitaires des radiofréquences publié le 15 octobre 2013,
42 avait identifié des études qui ne peuvent pas être utilisées pour évaluer les effets des
43 radiofréquences sur le stress oxydant en raison des nombreux biais méthodologiques. Les études
44 portant sur les animaux juvéniles sont Imge *et al.* 2010, Kesari *et al.* 2011, 2012.

45

1
2
Tableau 14 : Études investiguant les effets sur la réponse cellulaire et le stress oxydant chez l'animal. *Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses*

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
Finnie <i>et al.</i> , 2009b	GSM 900 MHz DAS = 4 W/kg 60 min/jour GD1 – GD19	Souris <i>in utero</i>	Évaluation du stress cellulaire : dosage de HSP 25, 32, 70	10 souris / groupe	Aucune différence d'expression des protéines de stress inductibles entre les groupes exposés et témoins
Güler <i>et al.</i> , 2010	GSM 1 800 MHz DAS non précisé 15 min/jour pendant 7 jours GD 15 – GD 22	Lapin <i>in utero</i>	Oxydation de l'ADN et lipidique (8-OHdG et MDA)	9 animaux / groupe	Augmentation significative de la 8-OHdG et du MDA chez les mères, mais pas chez les nouveau-nés.
Aït-Aïssa <i>et al.</i> , 2010	Wi-Fi 2 450 MHz DAS = 0,08 ; 0,4 et 4 W/kg 2 h/j, 5 j/semaine GD 6 – GD 21 ou GD 6 – PND 35	Rat <i>in utero</i>	Expression de GFAP Détection de cellules apoptotiques	12 animaux /groupe	Absence de gliose et d'altération de différentes régions du cerveau
Paulraj et Behari, 2006a	2 450 ou 16 500 MHz DAS = 1,0 ou 2,0 W/kg 2 h/jour 5 j/semaine pendant 35 jours	Rat 35 jours	Cassures de l'ADN	6 animaux / groupe	Augmentation des cassures simple brin d'ADN
Paulraj et Behari, 2006b	2 450 Mhz DAS = 0,11 W/kg 2 h/jour 5 j/semaine pendant 35 jours	Rat 35 jours	Activité de la phosphokinase C (PKC)	6 animaux / groupe	Diminution de l'activité de la PKC dans l'hippocampe, par rapport au reste du cerveau des rats exposés et à l'hippocampe du groupe témoin Augmentation de la population cellulaire gliale dans le groupe exposé

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
Ammari <i>et al.</i> , 2010	GSM 900 MHz DAS = 1,5 W/kg 45 min/jour DAS = 6W/kg 15 min/jour, 5j/semaine pendant 8 semaines	Rats 6 semaines	Expression de GFAP dans 5 structures cérébrales, 3 ou 10 jours après la fin de l'exposition	6 rats / groupe de dose, 3 rats pour témoins négatif	Trois jours après la fin de l'exposition, augmentation significative de la GFAP pour les deux niveaux d'exposition dans toutes les structures Dix jours après la fin de l'exposition, augmentation significative dans le <i>globus pallidus</i> latéral pour l'exposition au DAS faible, et dans l'hippocampe, cortex préfrontal et <i>globus pallidus</i> pour l'exposition au DAS élevé
Kesari <i>et al.</i> , 2010	Wi-Fi 2 450 MHz DAS = 0,11 W/kg 2 h/jour pendant 35 jours	Rat 35 jours	Stress oxydant (SOD, CAT, GSH-Px, histone H1 kinase) Cassures de l'ADN	6 animaux par groupe	Augmentation significative des cassures doubles chromosomiques Diminution de l'activité des enzymes antioxydantes Les auteurs suggèrent les mécanismes d'une promotion cancéreuse
Maskey <i>et al.</i> 2010a	GSM 835 MHz DAS = 1,6 W/kg 8 h/jour pendant 3 mois,	Souris 6 semaines	Expression de GFAP Expression de la calrétinine et de la calbindine D28-k (voir paragraphe 5.3.1.3)	10 animaux par groupe	Augmentation de l'expression de GFAP dans les aires CA1, CA3 et dans le gyrus denté de l'hippocampe
Watilliaux <i>et al.</i> , 2011	GSM 1 800 MHz DAS = 1,7-2,5 W/kg Exposition unique de 2 heures	Rat 5, 15 et 35 jours	Évaluation du stress cellulaire : dosage de HSP60, HSP 90 et HSC70 Réponse gliale ; GFAP, la sérine racémase, GLT1, GLAST et CD 68 4 régions cérébrales	5 ou 6 animaux par groupe	Vingt-quatre heures après la fin de l'exposition, aucune modification de la quantité de ces protéines n'a été observée
Bouji <i>et al.</i> , 2012	GSM 900 MHz DAS = 6 W/kg Exposition unique de 15 min	Rat 6 semaines et 12 mois	Expression de GFAP, IL-1 β et IL-6 dans différentes régions du cerveau	8 ou 9 rats / groupe	Aucun effet sur la GFAP et l'IL-1 β n'a été observée quel que soit l'âge des rats Une augmentation modérée de l'IL-6 dans les bulbes olfactifs et une amélioration de la mémoire émotionnelle contextuelle a été constatée chez les rats de 12 mois exposés

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
Maaroufi <i>et al.</i> , 2014	GSM 900 MHz DAS = 0,05 - 0,18 W/kg 1h/j, 21 jours consécutifs Administration concomitante de sulfate de fer	Rat 4 semaines	Stress oxydant (TBARS, SOD, CAT) dans le cortex, striatum, hippocampe et cervelet	8 animaux par groupe	Absence de production de stress oxydant
Sangun <i>et al.</i> , 2014	Wi-Fi 2450 MHz DAS = 0,1 W/kg 1h / j	Rat GD 1 – naissance puis PND 21-puberté Ou PND 21 – puberté	Stress oxydant Analyse histologique du cerveau	8 rats / groupe	Augmentation du statut oxydant dans les tissus cérébraux chez les exposés <i>in utero</i> . Aucune différence dans les examens histologiques entre les 3 groupes d'exposition

1

2 - Concernant l'apparition de gliose

3 Chez le rat, cinq études ont investigué les effets des radiofréquences, soit en exposition postnatale

4 (4 études) soit prénatale (1 étude) sur la protéine GFAP, marqueur d'activation des astrocytes et

5 de réponse gliale, dans différentes structures cérébrales. Les études de Bouji *et al.*, et de

6 Watilliaux *et al.*, montrent qu'une exposition aiguë à un signal GSM 900 ou 1 800 MHz (15 min –

7 2 h, DAS entre 1,7 et 6 W/kg) aux radiofréquences entre l'âge de 5 et 42 jours chez le jeune rat

8 n'affecte pas l'activité de cette protéine 24 h ou 48 h après la fin de l'exposition.

9 En revanche, une exposition chronique de 2 ou 3 mois ayant débuté à l'âge de 6 semaines

10 entraînerait une augmentation transitoire de l'expression de la GFAP dans certaines régions

11 cérébrales (Ammari *et al.*, 2010 ; Maskey *et al.*, 2010a), alors qu'une exposition chronique *in utero*

12 ou pendant la gestation et la lactation n'entraînerait pas ces mêmes effets (Aït-Aïssa *et al.*, 2010).

13 - Concernant les cassures de l'ADN

14 Chez l'animal, deux études vont dans le sens d'une augmentation des cassures d'ADN, après

15 exposition de 35 jours aux radiofréquences chez des rats âgés de de 35 jours (Paulraj et Behari,

16 2006a ; Kesari *et al.*, 2010). Ces études provenant de la même équipe méritent d'être reproduites.

17 - Concernant la production de stress oxydant

18 Chez l'animal, quatre études se sont penchées sur la production de stress oxydant dans

19 différentes structures cérébrales après exposition aux radiofréquences. Les résultats sont

20 hétérogènes, puisque chez le rat, Maaroufi *et al.*, (2014) ne rapportent pas de stress oxydant dans

21 les différentes structures cérébrales étudiées, alors que les études de Kesari *et al.*, (2010) et

22 Sangun *et al.*, (2014) sont en faveur d'une production de stress oxydant par diminution de l'activité

23 des enzymes anti-oxydantes. Guler *et al.*, ne rapportent pas d'induction de stress oxydant après

24 exposition *in utero* chez le lapin. Il est à noter que les marqueurs de stress oxydant étudiés

25 diffèrent en fonction des études (oxydation de l'ADN, oxydation des lipides ou enzymes de

26 détoxification des radicaux libres...) pouvant très largement contribuer à l'inhomogénéité des

27 résultats, obtenus de plus sur un faible nombre d'études.

28 - Concernant la production de stress cellulaire

29 Chez l'animal, deux études ont investigué les effets d'une exposition aux radiofréquences sur le

30 stress cellulaire visualisé par les protéines de choc thermique (HSP). Bien que le protocole

31 d'exposition (pré- vs postnatal), la durée d'exposition (aiguë vs chronique) ainsi que l'espèce

32 animale (souris vs rat) soient différents, ces 2 études concordent sur l'absence de stress cellulaire

33 après exposition aux radiofréquences (Finnie *et al.*, 2009b ; Watilliaux *et al.*, 2011). Ces études

34 mériteraient d'être reproduites.

35

36 5.3.1.3 Effets sur la morphologie cérébrale

37 Cobb *et al.* (2000) ont exposé des rats *in utero* (GD3 jusqu'à la naissance) ou de façon pré- et

38 post- natale (GD 3 à PND 10) à un champ électromagnétique large bande (UWB) 24 h / 24, 7 j / 7.

39 Le but de l'étude est d'observer les éventuels effets tératogènes d'une exposition pré- et

40 postnatale aux radiofréquences. Le DAS a été évalué à 45 mW/kg. Trois groupes ont été réalisés :

41 un groupe exposé, un groupe contrôle négatif et un groupe contrôle positif auquel une solution de

42 plomb a été administrée dans l'eau de boisson. Les nouveau-nés F1 qui ont été exposés de façon

43 pré- et post- natale ont été utilisés pour examiner la morphologie de l'hippocampe sur coupe de

44 cerveau colorées à l'hématoxyline-éosine en mesurant l'épaisseur de la couche des cellules

45 pyramidales de l'hippocampe et des cellules granulaires du gyrus denté ainsi que la présence de

46 cellules en dégénérescence (morphologie et intensité de coloration) dans le gyrus denté.

1 Les résultats mettent en évidence une augmentation de la longueur médio-latérale de
2 l'hippocampe chez les animaux exposés par rapport aux animaux non exposés mais pas de
3 changement de la densité cellulaire, ni du nombre de cellules en dégénérescence ou encore de la
4 morphologie cellulaire dans le gyrus denté. Cependant, les auteurs ne concluent pas à une réelle
5 différence morphologique cérébrale entre les groupes exposés et non exposés et attribuent les
6 associations significatives obtenues au grand nombre de paramètres mesurés et à la multiplicité
7 des analyses statistiques réalisées (voir § 1.2.4 et 1.3 pour les autres effets).

8 Kumlin *et al.* (2007) ont exposé des rats *Wistar* âgés de 21 jours (n = 6) pendant 5 semaines
9 consécutives (2 h / jour et 5 jours / semaine) à des ondes GSM à 900 MHz (DAS de 0,3 et
10 3 W/kg). Les modifications morphologiques du SNC ont été étudiées par des analyses
11 histochimiques de l'hippocampe car cette structure est particulièrement sensible aux agressions
12 telles que l'ischémie, les traumatismes, le stress et les rayonnements ionisants.

13 L'étude histologique ne met pas en évidence d'effet sur la morphologie cérébrale générale, sur le
14 nombre de neurones morts ou nouvellement formés dans le gyrus denté de l'hippocampe.

15 Maskey *et al.* (2010b) ont étudié les effets des radiofréquences (GSM 835 MHz) sur 2 protéines
16 liant le calcium (la calrétinine (CR) et la calbindine D28-k (Calb)) dans l'hippocampe de souris ICR
17 mâles de 6 semaines. Six protocoles d'exposition ont été mis en œuvre : groupe contrôle, 1 h / jour
18 avec un DAS de 1,6 ou 4 W/kg pendant 5 jours, 5 h / jour avec un DAS de 1,6 ou 4 W/kg pendant
19 1 jour ou en continu pendant 1 mois avec un DAS de 1,6 W/kg. Le calcul du DAS repose sur une
20 estimation du champ dans la cage et non sur une mesure directe. L'exposition semble
21 correctement maîtrisée. L'expression des protéines a été mise en évidence par
22 immunohistochimie.

23 L'évaluation densitométrique du marquage dans 5 sous-régions de l'hippocampe montre soit une
24 augmentation, soit une diminution, soit une absence de modification de l'expression de protéines.
25 Ces résultats dépendent de la sous-région de l'hippocampe considérée, de la protéine étudiée, de
26 la durée d'exposition (1 j, 5 j, 30 j) et de l'intensité (DAS = 0,6 ou 4 W/kg), sans qu'il soit possible
27 de mettre en évidence un effet net d'un des facteurs. Enfin, les modifications, bien que
28 significatives, sont pour l'essentiel de faible amplitude (< 10%, rarement 20 %), ce qui explique en
29 partie l'impossibilité de faire émerger l'influence de l'un ou l'autre des facteurs cités plus haut
30 (structure, type de protéines, durée et intensité de l'exposition) (Maskey, *et al.* 2010b).

31 La perte neuronale des cellules pyramidales de la région CA1 de l'hippocampe après 1 mois
32 d'exposition annoncée par les auteurs n'est soutenue par aucune donnée, considérant que la
33 technique visualise les neurones contenant soit la CR soit la Calb et non le nombre total de
34 neurones ou la perte cellulaire. Il est donc fait état dans cet article de mort cellulaire sans
35 technique validée pour la mettre en évidence (pas de comptage des neurones). L'interprétation
36 des résultats faite par les auteurs est donc discutable.

37 La 2nde étude proposée (voir chapitre 5.3.1.2) par les mêmes auteurs s'est intéressée aux effets
38 d'une exposition chronique (3 mois, GSM 835 MHz, DAS de 1,6 W/kg) sur la calbindine D28-K
39 chez des souris ICR mâles de 6 semaines (Maskey, *et al.* 2010a). Les résultats montrent une
40 diminution significative de l'immunoréactivité dans les différentes sous-régions de l'hippocampe.
41 Les baisses observées atteignent au maximum 8-10 %. Une augmentation du marquage de la
42 GFAP au niveau des astrocytes est constatée, ainsi qu'une altération de la viabilité cellulaire
43 (correspondant à une augmentation du marquage TUNEL). Selon les auteurs, celle-ci est à mettre
44 en lien avec une augmentation de l'inflammation et de l'expression de protéines liant le calcium
45 (telles que la calbindine D28-k et la calrétinine).

46 Les auteurs concluent à des effets potentiellement plus délétères sur les neurones de
47 l'hippocampe liés à une exposition longue par rapport à une exposition plus courte (en comparant
48 leurs résultats à ceux de leur précédente étude).

49

1 Le groupe de travail « Radiofréquences et santé », à l'occasion de son travail sur la mise à jour
2 des connaissances concernant les effets sanitaires des radiofréquences publié le 15 octobre 2013,
3 avait identifié des études sur la morphologie cérébrale qui ne peuvent pas être utilisées pour
4 évaluer les effets des radiofréquences sur la morphologie cérébrale en raison des nombreux biais
5 méthodologiques. Les études exposant des animaux juvéniles ou *in utero* sont Rağbetli *et al.*
6 2010, Bas *et al.* 2009, Kesari *et al.* 2011, 2012, Orendáčová *et al.* 2011.

7

DOCUMENT EN CONSULTATION

1
2
3
4
5

Tableau 15 : Études investiguant les effets sur la morphologie cérébrale. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux	Résultats <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Cobb <i>et al.</i> , 2000	Signal pulsé UWB DAS = 45 mW/kg 24h/24, 7j/7 GD 3 – GD 18 ou GD 3 - PND 10 ou PND 1 – PND 10	Rat <i>in utero</i>	Morphologie de l'hippocampe	6 animaux par groupe	Augmentation de la longueur médio-latérale de l'hippocampe chez les animaux exposés par rapport aux animaux non exposés Absence de modification dans la densité cellulaire, le nombre de cellules en dégénérescence ou encore la morphologie cellulaire dans le gyrus denté
Kumlin <i>et al.</i> 2007	GSM 900 MHz DAS = 0,3 et 3 W/kg 2 h/jour et 5 jours/semaine	Rat 21 j	Analyse histochimique de l'hippocampe	6 animaux par groupe	Absence de modification de la morphologie cérébrale générale, sur le nombre de neurones morts ou nouvellement formés dans le gyrus denté de l'hippocampe
Maskey <i>et al.</i> 2010a	GSM 835 MHz DAS = 1,6 W/kg 8 h/jour pendant 3 mois.		Expression de la calbindine D28-k Expression de GFAP	10 animaux par groupe	Diminution significative de l'immunoréactivité dans les différentes sous-régions de l'hippocampe
Maskey <i>et al.</i> 2010b	GSM 835 MHz DAS = 1,6 ou 4 W/kg, 1 ou 5 h/jour pendant 1 ou 5 jours, ou DAS = 1,6 W/kg, pendant 1 mois.	Souris 6 semaines	Expression de la calrétinine et de la calbindine D28-k	10 animaux par groupe	Variation de l'expression de la calrétinine et de la calbindine D28-k en fonction de la sous-région de l'hippocampe considérée Perte neuronale des cellules pyramidales dans l'aire CA1 de l'hippocampe, chez les souris exposées 1h/jour pendant 1 mois.

6
7

1 Chez l'animal, les résultats sont hétérogènes. En effet, l'étude de Kumlin *et al.* (2007) ne rapporte
2 pas d'effet, alors que celles de Maskey *et al.*, (2010a et 2010b) rapportent des modifications de la
3 structure de l'hippocampe. L'étude de Cobb *et al.*, (2000) montre quelques effets que les auteurs
4 eux-mêmes ne retiennent pas.

5 Compte tenu du faible nombre d'études ayant investigué cet effet et uniquement sur l'hippocampe,
6 il est impossible, à ce jour, de conclure à un effet des radiofréquences sur sa morphologie.

8 5.3.1.4 Effet sur l'activité électrique cérébrale

9 Krause *et al.* (2006) ont réalisé des enregistrements électro-encéphalographiques (EEG) sur 15
10 enfants (6 garçons et 9 filles) âgés de 10 à 14 ans soumis à des tests de mémoire auditive
11 pendant 30 minutes. Un téléphone mobile était placé en regard de la région temporale postérieure
12 gauche de ces enfants. Le DAS maximal a été estimé à 1,98 W/kg et les DAS moyen sur 1 g de
13 tissu à 1,40 W/kg. Une échelle de Likert était également remplie afin que l'enfant testé puisse
14 évaluer sa probabilité d'exposition. Deux séries de tests ont été réalisées en double aveugle :
15 position « on » ou « off » du téléphone. Des variations dans le tracé EEG sont notées dans les
16 bandes de fréquence 4-8 Hz (thêta) et 15 Hz (béta) chez les sujets exposés. L'exposition a produit
17 une augmentation de 5 à 10 % de la puissance de l'EEG dans la bande thêta (4 - 8 Hz), pendant la
18 période de codage des stimuli auditifs et lors de la reconnaissance d'un mot présenté ou non
19 antérieurement dans un jeu de 4 mots. L'augmentation de la puissance de l'EEG était
20 statistiquement significative en utilisant des tests prévus pour compenser l'interdépendance des
21 différentes fréquences des EEG. Ces effets sont répartis aléatoirement sur tout le scalp, bien qu'ils
22 soient majoritairement enregistrés par l'électrode temporale gauche (Krause *et al.* 2006).

23 Loughran *et al.* (2013) se sont intéressés à la sensibilité potentielle aux champs
24 électromagnétiques émis par les téléphones mobiles chez 22 adolescents de 11 à 13 ans. Le
25 protocole en double aveugle, échantillonné de façon aléatoire, comprenait trois sessions à une
26 semaine d'intervalle. À chaque session, les adolescents ont été soumis à un signal de type GSM à
27 900 MHz, à 2 niveaux différents d'intensité d'exposition ($DAS_{\text{élevé}} = 1,4 \text{ W/kg}$; $DAS_{\text{faible}} =$
28 $0,35 \text{ W/kg}$), et à une exposition factice. L'exposition a duré 30 min pendant lesquelles des tests
29 cognitifs ont été réalisés (voir paragraphe 5.3.2.1.1). Un EEG de base (3 min yeux clos, 3 min yeux
30 ouverts) a été réalisé avant l'exposition. Puis d'autres EEG ont été enregistrés immédiatement, 30
31 et 60 min après l'exposition. Quelques différences dans l'intensité de certaines fréquences de
32 l'EEG (6 Hz et autour de 12 Hz pour le DAS le plus faible) sont observées sans qu'il soit possible
33 de les interpréter comme un effet de l'exposition. En effet, les auteurs mentionnent la forte
34 variabilité interindividuelle dans les résultats de l'EEG, d'autant plus importante lors de l'enfance et
35 l'adolescence.

36 Les deux études sont cohérentes et mettent en évidence des différences dans le tracé électro-
37 encéphalographique dans les bandes de fréquence thêta (4-8 Hz) et béta (12 - 15 Hz) (Krause *et*
38 *al.*, 2006 ; Loughran *et al.*, 2013) chez les enfants exposés, mais les mécanismes et les
39 conséquences médicales de ces modifications, s'ils existent, restent à étudier. Rappelons que
40 chez l'adulte, sur la base de 4 autres études qui avaient exploré des critères différents (Carrubba
41 *et al.* 2010, Croft *et al.* 2010, Vecchio *et al.* 2010, Leung *et al.* 2011), le groupe de travail
42 « Radiofréquences et santé », à l'occasion de son travail sur la mise à jour des connaissances
43 concernant les effets sanitaires des radiofréquences publié le 15 octobre 2013, avait conclu que
44 l'exposition aiguë aux radiofréquences pourrait avoir un effet sur l'activité électrique du cerveau.
45 De plus, sur la base de cette analyse, il avait été suggéré que cet effet dépendrait de l'âge des
46 sujets.

1
2
3
4
5

Tableau 16 : Études de provocation sur des enfants investiguant les effets d'une exposition aiguë aux RF sur le tracé électroencéphalographique. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses

Étude	Population	Effets étudiés	Caractérisation de l'exposition	Nombre de sujets	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
Krause <i>et al.</i> , 2006	Enfants (10 - 14 ans)	Mémoire auditive (évaluée à partir de ses traductions électroencéphalographiques)	Téléphone mobile DAS moy (1g) = 1,40 W/kg DAS max = 1,98 W/kg Exposition contrôlée 2 périodes (1 période ON et une période OFF) de 30 min, l'ordre des séries et des périodes étant randomisée	n = 15	Augmentation de 5 à 10 % de la puissance de l'EEG dans la bande thêta (4-8 Hz) et bêta (12-15 Hz), pendant la période de codage des stimuli auditifs, et de reconnaissance d'un mot présenté antérieurement ou non
Loughran <i>et al.</i> , 2013	Enfants (11 - 13 ans)	Tests cognitifs Électroencéphalogramme	Téléphone mobile DAS élevé = 1,4 W/kg DAS faible = 0,35 W/kg 3 sessions de 30 min à une semaine d'intervalle	n = 22	Pas d'altération ou d'amélioration des tâches cognitives en fonction du niveau d'exposition ou du temps. Quelques différences dans l'intensité de certaines fréquences de l'EEG (6 Hz et autour de 12 Hz) pour le DAS le plus faible sont observées sans qu'il ne soit possible de les interpréter comme un effet de l'exposition

1 5.3.2 Effets sur les fonctions cognitives et le comportement

2 5.3.2.1 Études chez l'homme

3 5.3.2.1.1 Études de type expérimental

4 Haarala *et al.* (2005) ont pratiqué des tests de cognition chez 32 enfants âgés de 10 à 14 ans alors
5 qu'ils étaient exposés ou non à des radiofréquences provenant d'un téléphone mobile (signal GSM
6 à 902 MHz). Les DAS moyens estimés sur 1 g et 10 g de tissu sont respectivement de 1,44 W/kg
7 et 0,990 W/kg, avec un pic à 2,07 W/kg. Les enfants ont été exposés aux radiofréquences ou aux
8 signaux factices à 24 heures d'intervalle dans un ordre aléatoire. L'étude a été réalisée en double
9 aveugle. Un contrôle de la température de la peau a été effectué chez 4 sujets. Huit tests
10 expérimentaux ont été utilisés dans un ordre aléatoire : 4 tests provenant du *CogniSpeed* (temps
11 de réaction) et 4 tests de mémoire à court terme. Les résultats n'ont pas mis en évidence de
12 différence dans le temps de réaction et l'exactitude des réponses. Les auteurs concluent qu'un
13 téléphone mobile actif n'affecte pas les performances cognitives à court terme chez les enfants
14 âgés de 10 à 14 ans (Haarala *et al.*, 2005).

15 Preece *et al.* (2005) ont effectué une série de tests de cognition issus de ceux habituellement
16 utilisés pour évaluer les effets des drogues (*Cognitive Drug Research*) sur 18 enfants âgés de 10 à
17 12 ans. Les sujets ont été exposés à un téléphone mobile selon 3 conditions différentes dans un
18 ordre aléatoire le même jour (*off*, puissance maximale à 0,2 W ou à 2 W). Le DAS maximal a été
19 estimé à 0,28 W/kg. Pour chaque test, trois types de performance ont été évalués : le temps de
20 réaction, l'exactitude des réponses et l'index de sensibilité (qui mesure l'effet d'un évènement
21 distrayant sur l'exactitude des réponses). L'accomplissement des séries de tests nécessite 30 à 35
22 minutes. Les résultats ont montré une diminution du temps de réaction en présence du signal GSM
23 avec l'augmentation de la puissance, mais qui n'atteint plus le seuil de la significativité après
24 correction de Bonferroni³³. De même, une tendance à une plus grande exactitude et un plus grand
25 index de sensibilité des résultats a été retrouvée chez les sujets exposés. Selon le HPA (2012), la
26 correction de Bonferroni qui a été appliquée sur les résultats n'est pas appropriée dans ce cas, et
27 peut donc être une hypothèse trop conservatrice, d'autant que des effets sur le temps de réaction
28 ont déjà été observés dans le passé chez des adultes (Preece *et al.*, 1999, Koivisto *et al.* 2000).

29 Kwon *et al.* (2010) ont exposé 17 enfants âgés de 11 à 12 ans à des radiofréquences (signal
30 GSM). Le téléphone induit un pic de DAS de 1,28 W/kg (DAS moyen sur 10 g de tissu de
31 0,86 W/kg). Chaque participant a subi une exposition réelle et une exposition simulée de façon
32 aléatoire, sur une oreille puis l'autre. Des *stimuli* auditifs ont été réalisés (un groupe de *stimuli* avec
33 le téléphone fermé, et deux groupes de *stimuli* avec le téléphone émetteur). Un grand nombre de
34 potentiels évoqués ont été mesurés, dont la négativité de discordance³⁴ (*mismatch negativity*)

³³ Une situation de multiplicité des comparaisons enlève presque toute valeur à un résultat statistiquement significatif puisqu'il est possible, en répétant les tests, d'obtenir un $p < 0,05$ avec n'importe quel traitement, même sans effet. Ce problème survient lorsque l'on s'autorise à conclure à partir du moment où au moins un test est significatif. La correction de Bonferroni consiste à réaliser les tests avec un seuil de signification plus petit que 5 % et de choisir cette valeur de telle sorte qu'après inflation due aux comparaisons multiples, le niveau global atteint soit de 5 %.

³⁴ La négativité de discordance est un potentiel évoqué induit par l'apparition d'un son différent (déviant) dans une série de sons standards répétés. Le son déviant fait apparaître une onde négative additionnelle entre 150 et 250 ms après son début. La négativité de discordance est intéressante car elle pourrait refléter la manifestation d'un mécanisme de détection automatique des changements. Elle reflète la capacité des régions auditives du cerveau à traiter différentes caractéristiques des sons comme l'intensité, la fréquence et la durée. C'est un signe pré-attentionnel, indépendant du contrôle que le sujet fait de sa participation à l'épreuve. C'est un test très fiable d'attention non volontaire.

1 auditive. Comme six analyses séparées ont été réalisées, une correction de Bonferroni a été
2 appliquée. Aucun effet d'une exposition courte à un signal GSM à 900 MHz n'a été mis en
3 évidence au niveau des potentiels évoqués auditifs associés à la mémoire auditive après la
4 correction statistique de Bonferroni (Kwon, *et al.* 2010). Cependant, d'après le rapport du HPA
5 (2012), la correction de Bonferroni n'étant pas prévue pour ce genre de modèle, cette étape
6 pourrait être trop prudente.

7 Loughran *et al.* (2013) se sont intéressés à la sensibilité potentielle aux champs
8 électromagnétiques émis par les téléphones mobiles chez 22 adolescents de 11 à 13 ans. Le
9 protocole en double aveugle, échantillonné de façon aléatoire, comprenait trois sessions à une
10 semaine d'intervalle. À chaque session, les adolescents ont été soumis à un signal de type GSM à
11 900 MHz, à 2 niveaux différents d'intensité d'exposition ($DAS_{\text{élevé}} = 1,4 \text{ W/kg}$; $DAS_{\text{faible}} =$
12 $0,35 \text{ W/kg}$), et à une exposition factice. L'exposition a duré 30 min pendant lesquelles des tests
13 cognitifs ont été réalisés. Après chaque session, il a été demandé aux participants s'ils étaient en
14 mesure de percevoir les ondes. De plus, une échelle visuelle de 100 mm a été proposée à chaque
15 session avant l'EEG. Les adolescents ont été chargés d'évaluer les paramètres suivants : fatigue
16 (0 mm = fatigué, 100 mm = en forme), humeur (0 mm = bonne humeur, 100 mm = mauvaise
17 humeur), énergie (0 mm = léthargique, 100 mm = stressé) et concentration (0 mm = concentré,
18 100 mm = distrait). L'étude n'a pas mis en évidence d'altération ou d'amélioration des tâches
19 cognitives en fonction du niveau d'exposition ni du temps.

1
2
3

Tableau 17 : Études de provocation sur des enfants investiguant les effets d'une exposition aiguë aux RF. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses

Étude	Population	Effets étudiés	Caractérisation de l'exposition	Nombre de sujets	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
Haarala et al., 2005	Enfants (10 - 14 ans)	Fonctions cognitives Tests cognitifs : 4 tests provenant du CogniSpeed et 4 tests de mémoire à court terme	Téléphone mobile DAS moy (1g) = 1,44 W/kg DAS moy (10g) = 0,990 W/kg DAS max = 2,07 W/kg	n = 32	Absence de différence dans le temps de réaction et dans l'exactitude des réponses entre les exposés et les non exposés.
Preece et al., 2005	Enfants (10 - 12 ans)	Fonctions cognitives Test cognitif issu du CDR (<i>Cognitive Drug Research</i>) mesurant le temps de réaction, l'exactitude des réponses, et l'index de sensibilité.	Téléphone mobile DAS max = 0,28 W/kg 3 conditions : exposition factice, exposition à faible (0,2 W) et forte (2 W) puissance	n = 18	Tendance à une diminution du temps de réaction en présence de GSM, une plus grande exactitude et une plus grande sensibilité des résultats, mais la différence n'est pas statistiquement significative
Kwon et al., 2010	Enfants (11 - 12 ans)	Mémoire auditive (évaluée à partir de ses traductions électroencéphalographiques)	Téléphone mobile DAS moy (1g) = 1,14 W/kg DAS moy (10g) = 0,82 W/kg DAS max = 1,21 W/kg Exposition contrôlée 3 périodes de 6 min (1 période OFF et 2 périodes ON), l'ordre des séries et des périodes étant randomisé.	n = 17	1°) Aucun effet des expositions courtes aux RF GSM 900 MHz sur les potentiels évoqués auditifs associés à la mémoire auditive (y compris mismatch négativité) n'a été observé. 2°) Utilisé pour la 1 ^{ère} fois chez l'enfant, le paradigme de recherche de la négativité de discordance avec 4 caractéristiques déviantes (<i>multifeature paradigm</i>) s'est montré bien adapté aux études de la perception et de la mémoire auditive chez ces sujets.
Loughran et al., 2013	Enfants (11 - 13 ans)	Tests cognitifs Électroencéphalogramme	Téléphone mobile DAS élevé = 1,4 W/kg DAS faible = 0,35 W/kg 3 sessions de 30 min à une semaine d'intervalle	n = 22	Pas d'altération ou d'amélioration des tâches cognitives en fonction du niveau d'exposition ou du temps.

1 5.3.2.1.2 Études épidémiologiques

2 Études portant sur des enfants ayant été exposés *in utero* ou au cours de la petite enfance 3 (< 6 ans)

4 L'équipe de L. Kheifets a étudié le lien entre la survenue de troubles du comportement chez des
5 enfants et leurs expositions pré- et post- natale (jusqu'à l'âge de 7 ans) aux radiofréquences des
6 téléphones mobiles ; plusieurs publications ont été réalisées par cette équipe. Une première étude
7 (Divan *et al.* 2008) a été conduite sur un sous-échantillon de plus de 13 000 mères ayant été
8 incluses entre 1997 et 1999 dans la *Danish National Birth Cohort*. Les mères ont été contactées
9 7 ans après leur grossesse. Elles ont complété elles-mêmes, *via* internet, ou à défaut par courrier,
10 un questionnaire concernant leur enfant âgé de 7 ans, et comportant, entre autres informations, le
11 questionnaire *Strengths and Difficulties*. Il leur était aussi demandé de mentionner l'utilisation d'un
12 téléphone mobile pendant leur grossesse. Elles devaient également préciser l'utilisation éventuelle
13 d'un téléphone mobile ou d'un téléphone sans fil par leur enfant. L'échantillon (n = 13 159, taux de
14 réponse : 65 %) a été réparti en 4 groupes de mères selon l'exposition des enfants :

- 15 - celles dont les enfants ont pu être exposés à la fois en période pré- et post- natale
16 (n = 1 421) ;
- 17 - celles dont les enfants ont pu être exposés uniquement en période prénatale (n = 1 895) ;
- 18 - celles dont les enfants ont pu être exposés uniquement en période post- natale
19 (n = 2 281) ;
- 20 - celles dont les enfants n'ont pas été exposés (n = 6 471) ;

21 Les données d'exposition étaient manquantes ou incomplètes pour 1 091 enfants.

22 Une association est retrouvée entre la survenue de troubles du comportement général des enfants
23 et l'exposition des enfants en période prénatale seulement (OR = 1,54 [1,32 - 1,81], postnatale
24 seulement (OR = 1,18 [1,01 - 1,38]) et à la fois en périodes pré- et post- natale (OR = 1,80 [1,45 -
25 2,23]), après ajustement sur les facteurs de confusion (sexe de l'enfant, âge de la mère, tabagisme
26 pendant la grossesse, éventuels problèmes psychiatriques de la mère et niveau socio-
27 professionnel). La comparaison des caractéristiques des groupes a montré que les mères des
28 enfants exposés à la fois en période pré- et post- natale étaient d'un niveau socio-professionnel
29 plus bas, plus souvent consommatrices de tabac pendant la grossesse et avaient rapporté plus
30 d'antécédents de problèmes psychiatriques. Ces associations ne sont pas modifiées selon le
31 mode de recueil du questionnaire (par internet ou par courrier). Par ailleurs, lorsque les
32 associations sont mesurées avec des troubles du comportement spécifiques (émotivité,
33 hyperactivité, problèmes de comportement et problèmes relationnels), les OR restent significatifs
34 pour l'exposition prénatale seule et combinée pré- et post- natale, avec des OR plus élevés dans
35 l'exposition combinée.

36 L'exposition aux radiofréquences est supposée supérieure lorsque l'enfant utilise le téléphone
37 (exposition postnatale) que lorsqu'il est *in utero* (exposition prénatale), or, les OR tendent à
38 montrer une association plus forte entre la survenue de troubles du comportement et une
39 exposition prénatale et pré- et post- natale combinée qu'avec une exposition postnatale seule. En
40 effet, l'exposition du fœtus, lorsque le téléphone est à proximité du ventre de la mère, est
41 relativement peu importante. Celle-ci devient *a priori* très faible lorsque le téléphone est utilisé à
42 l'oreille. Ces résultats laissent supposer que la source de l'effet sanitaire ne serait pas les
43 radiofréquences, mais plutôt l'usage du téléphone mobile par la mère.

44 Les principales critiques de cette étude résident dans le fait que l'exposition prénatale ait été
45 estimée 7 ans après la grossesse, que les troubles du comportement aient été appréciés par les
46 mères, et que les questions évaluant les problèmes comportementaux et celles portant sur
47 l'utilisation de téléphones mobiles aient été placées au sein d'un même questionnaire, ce qui
48 pourrait avoir entraîné des biais. L'évaluation de l'exposition 7 ans après la grossesse est
49 forcément moins précise qu'une évaluation en temps réel, mais n'implique pas forcément que
50 l'association entre l'exposition et les effets observés est faussée. De plus, les auteurs écartent la
51 possibilité de biais potentiellement provoqués par l'évaluation de l'exposition et des problèmes

1 comportementaux au sein du même questionnaire, car l'interprétation du questionnaire *strength*
2 *and difficulties* se fait à partir des scores obtenus à 25 items différents ; il est de ce fait difficile
3 d'envisager qu'une réponse systématiquement biaisée ait été rapportée par les mères d'enfants
4 ayant des problèmes par comparaison avec les autres mères ; de même, les mères n'avaient
5 vraisemblablement pas connaissance du mode de détermination du diagnostic à partir de leurs
6 réponses.

7 Cette première population d'enfants de 7 ans (n = 12 796, jumeaux et triplés exclus), nés entre
8 1997 et 1999 a été réanalysée en comparaison d'une autre population d'enfants nés entre 1998 et
9 2001, issus de la même cohorte de mères (n = 28 745) afin de réaliser de nouvelles analyses,
10 tenant compte notamment d'un nombre plus important de facteurs de confusion (Divan *et al.*
11 2010). Après ajustement sur de très nombreux facteurs, notamment le niveau socioéducatif, les
12 antécédents psychiatriques des parents, des résultats similaires à l'étude précédentes sont
13 observés, essentiellement en rapport avec une exposition prénatale (exposition prénatale
14 seulement : OR = 1,4 [1,2 – 1,5]). Ces associations restent significatives lorsque les analyses sont
15 stratifiées sur les covariables. Le test de tendance sur l'intensité de l'exposition de la mère pendant
16 la grossesse est significatif (p = 0,004) (OR_{téléphone « on » < 50%} = 1,4 [1,0 – 2,1] ; OR_{téléphone « on » de 50 à 99}
17 % du temps = 1,7 [1,2 – 2,3] ; OR_{téléphone « on » 100 % du temps} = 2,0 [1,4 – 2,7]).

18 Une nouvelle analyse de cette même cohorte de mères a concerné leurs enfants qui avaient un
19 retard de développement (Divan *et al.* 2011). Cette nouvelle analyse ne met pas en évidence de
20 relation entre l'usage du téléphone mobile pendant la grossesse et la présence de retard cognitif
21 ou de langage à 18 mois (OR = 1,1 [0,9 - 1,3]) ou la présence d'un retard de développement
22 moteur (OR = 0,9 [0,8 - 1,0]).

23 Vrijheid *et al.* (2010) ont analysé la relation entre exposition prénatale et troubles du
24 développement sur une cohorte d'enfants (n = 530) dont le développement psychomoteur et
25 mental a été évalué à 14 mois alors que l'exposition des mères au téléphone mobile avait été
26 évaluée lors de la 32^{ème} semaine de grossesse. Le développement mental et psychomoteur est
27 mesuré à l'aide du « *Bailey Scales of infant development* » par des psychologues ne disposant pas
28 d'information sur l'exposition (évaluation en « aveugle »). Le questionnaire de développement
29 mental comporte 163 items évaluant les capacités cognitives telles que la compréhension, la
30 mémoire, et les premières notions de parole. L'échelle d'évaluation psychomotrice est divisée en
31 81 items évaluant les capacités motrices globales et fines. Les enfants de mères utilisatrices ont
32 un développement mental légèrement plus précoce que ceux des mères non utilisatrices ; une
33 relation inverse est observée pour le développement psychomoteur. Aucune tendance avec
34 l'intensité de l'usage du téléphone mobile par la mère n'est mise en évidence. Les auteurs
35 interprètent ces résultats peu nets comme pouvant être dus à des facteurs confondants non
36 mesurés. Cette étude donne des résultats sur le développement psychomoteur non significatifs,
37 mais qui vont dans le même sens de ceux observés dans l'étude précédente de Divan *et al.*, 2011.

38 Guxens, *et al.* (2013a) ont réalisé une étude de cohorte de 8 266 mères enceintes (cohorte ABCD,
39 *Amsterdam Children and their development*) aux Pays-Bas pour étudier la relation entre
40 l'exposition au téléphone mobile et les troubles du comportement chez 2 618 enfants de 5 ans. Les
41 mères ont été recrutées entre janvier 2003 et mars 2004. L'évaluation de l'usage de téléphone
42 mobile et de téléphone sans-fil DECT par la mère pendant la grossesse a été évalué
43 rétrospectivement par un questionnaire lorsque l'enfant avait 7 ans, et les troubles du
44 comportement ont été rapportés à l'aide du questionnaire *strengths and difficulties* par l'enseignant
45 et les parents lorsque l'enfant avait 5 ans. De nombreux facteurs de confusion ont été pris en
46 compte lors de l'inclusion des mères, notamment l'anxiété et la dépression ressenties par la mère.
47 Une association non significative est observée lorsque les troubles de comportement sont
48 rapportés par le professeur. Aucune association avec l'augmentation de l'usage du téléphone
49 mobile de la mère n'est observée. Les limites de cette étude concernent à la fois le faible taux de
50 participation (37 %) et l'évaluation rétrospective de l'exposition, réalisée 7 ans après la naissance,

1 alors que les troubles du comportement étaient évalués à 5 ans. Cependant, la déconnexion entre
2 le temps de recueil de l'exposition et celui des troubles du comportement évite un biais différentiel
3 de mémorisation.

4 Sudan *et al.*, (2013b) (équipe de Kheifets) ont réanalysé les données de la cohorte DNBC (*Danish*
5 *National Birth Cohort*), en utilisant les mêmes paramètres d'exposition et de groupe de référence
6 que dans l'étude de Guxens *et al.*, 2013. Ils ont obtenu une association stable entre l'utilisation du
7 téléphone mobile de la mère pendant la grossesse et des troubles comportementaux chez les
8 enfants. Ils retrouvent également une relation dose-réponse de la fréquence d'utilisation, qui reste
9 inchangée après exclusion des non-utilisateurs. Par ailleurs, ils reprochent à Guxens *et al.*, le fait
10 que les résultats du questionnaire SDQ obtenus par les mères et les enseignants aient été réalisés
11 de façon séparée, ce qui induit une perte de sensibilité par rapport à une analyse combinée. Ils
12 critiquent aussi le fait que les enseignants, qui ont fait part aux parents des problèmes de
13 comportement de leurs enfants, auraient pu affecter les réponses des mères au questionnaire sur
14 leur consommation téléphonique, si les mères pensent que l'usage du téléphone a un impact sur le
15 comportement des enfants. Guxens *et al.* (2013b) ont répondu que le but de l'analyse du
16 questionnaire SDQ était de voir si les résultats du questionnaire étaient cohérents en fonction du
17 répondeur (parent ou enseignant) et de répliquer les résultats de l'étude de Divan. Par ailleurs, le
18 fait que le questionnaire sur la consommation téléphonique ait été renseigné 2 ans après que
19 l'enseignant ait fait part des problèmes de comportement de l'enfant aux parents évite le biais de
20 mémorisation.

21

22 Études portant sur des enfants ayant un usage du téléphone mobile au-delà de la petite enfance 23 (> 6 ans)

24 La *MobilEe-Study* est une étude portant sur 1 484 enfants allemands âgés de 8 à 12 ans et
25 1 508 adolescents de 13 à 17 ans (respectivement 53 et 51 % de participation) entre 2006 et 2008
26 (Kühnlein, 2009). Les enfants ont été recrutés de manière aléatoire dans les registres de 4 villes
27 allemandes de taille différente. Leur exposition aux radiofréquences entre 900 et 1 800 MHz
28 (GSM, UMTS, DECT) et 2 400 MHz (WLAN) a été enregistrée pendant 24 heures au moyen d'un
29 exposimètre individuel qui ne fonctionnait pas pendant leur sommeil, l'exposimètre devant être en
30 mouvement ; plusieurs analyses issues de cette étude sur l'adéquation entre l'exposition mesurée
31 par le dosimètre et celle estimée à partir du questionnaire complété par les jeunes ont été publiées
32 (Thomas *et al.* 2008, Heinrich *et al.* 2010).

33 Ces données ont été exploitées afin d'évaluer l'association entre l'exposition aux radiofréquences
34 et la survenue de troubles comportementaux et mentaux (Thomas *et al.* 2008, 2010a). La santé
35 mentale a été évaluée par le *Strengths and Difficulties Questionnaire* (SDQ). Les 25 questions du
36 questionnaire étaient réparties selon 5 domaines : troubles émotionnels, troubles
37 comportementaux, hyperactivité / inattention, problèmes relationnels, comportement prosocial. Le
38 questionnaire a été rempli par les parents et les enfants pour les enfants âgés entre 8 et 12 ans, et
39 uniquement par les adolescents pour les sujets âgés entre 13 et 17 ans (5 grilles). Pour les
40 enfants, l'exposition au plus haut quartile est statistiquement associée à de plus nombreux
41 problèmes comportementaux que les autres (OR = 2,9 [1,4 - 5,9]), de même pour les adolescents
42 (OR = 3,7 [1,6 - 8,4]). En revanche, aucune association entre l'exposition et les problèmes
43 émotionnels ou relationnels n'a été retrouvée, que ce soit pour les enfants ou les adolescents.
44 Chez les adolescents, une augmentation (non significative) de l'*Odds-ratio* pour l'hyperactivité est
45 observée (OR = 2,1 [0,9 - 4,8]), ce qui n'est pas observé chez les plus jeunes. Ces associations
46 ont été ajustées sur les facteurs de confusion suivants : âge, sexe, niveau d'éducation,
47 préoccupation sur les sujets environnementaux, utilisation auto-rapportée de téléphone mobile ou
48 sans fil, distance auto-rapportée entre la maison et l'antenne relais la plus proche.

49 Dans la discussion, les auteurs précisent que le questionnaire SDQ est fiable quand il est possible
50 de collecter les données par 2 sources différentes (autoévaluation et parents, ou parents et

1 professeur). Or, le questionnaire a été utilisé en autoévaluation seul pour les adolescents. Une
2 analyse de sensibilité a été réalisée avec les données obtenues pour les enfants de 8 à 12 ans.
3 Les résultats ne montraient pas d'association entre l'exposition aux radiofréquences et des
4 troubles du comportement chez les enfants et étaient comparables avec l'analyse principale. De ce
5 fait, les auteurs supposent que les résultats pour les adolescents étaient fiables aussi, bien que le
6 questionnaire ait été utilisé en autoévaluation seulement.

7 Il s'agit d'une étude transversale sans ajustement sur d'autres facteurs de confusion potentiels
8 (problèmes psychiatriques des parents, informations sur la grossesse de la mère, etc.) or, la
9 présence d'éventuels troubles psychiatriques dans la famille pourrait modifier ces résultats. Par
10 ailleurs, comme toute étude transversale elle ne permet pas d'explorer le lien de temporalité entre
11 l'exposition et l'effet recherché.

12 Abramson *et al.* (2009) ont interrogé 317 enfants (145 garçons et 172 filles âgés de 11 à 14 ans)
13 issus de 20 écoles australiennes différentes. L'exposition a été auto évaluée avec l'aide d'un
14 questionnaire dérivé du questionnaire *Interphone*. Les réponses à une batterie de tests cognitifs
15 ont été analysées : tests psychométriques (*CodHealthTM*) et test de Stroop (capacité à traiter de
16 façon simultanée 2 éléments, un mot et une couleur). Les résultats ont été ajustés sur l'âge, le
17 sexe, l'origine ethnique (autre langue parlée à la maison), le niveau socio-économique, la
18 préférence manuelle (droitier ou gaucher). Quatre-vingt-quatorze pourcents des enfants ont déjà
19 utilisé un téléphone et 77 % possèdent leur propre téléphone. Le nombre médian d'appels était de
20 8 par semaine (Q1-Q3 : 4-15), et de 8 SMS (Q1-Q3 : 2-20). La durée médiane d'utilisation du
21 téléphone mobile était de 1,74 ans (0,89 - 2,63). Le temps de réaction est plus court mais la
22 précision moindre (réponses plus impulsives) tant pour des tâches simples que pour des tâches
23 d'association chez les enfants qui rapportent une plus grande durée de conversation (appels ou
24 SMS).

25 Afin de voir des effets à plus long terme, les mêmes enfants (11-14 ans) ont été réinterrogés un an
26 plus tard, soit 236 adolescents suivis (taux de suivi : 73 %). Quatre-vingt-dix-huit pourcents des
27 enfants ont déjà utilisé un téléphone et 86 % possèdent alors leur propre téléphone (Thomas, *et al.*
28 2010b). Les mêmes tests cognitifs ont été réalisés, et les résultats ont été comparés par rapport à
29 ceux effectués un an auparavant. Aucune association n'a été observée entre le nombre d'appel et
30 les modifications de la précision de la réponse pour les tests. Cependant, le temps de réponse
31 pour 2 tâches de mémorisation augmente pour les enfants qui présentaient le plus grand nombre
32 d'appels téléphoniques et la plus grande utilisation de message texte au début de l'étude, sans
33 qu'il n'y ait modification de l'exactitude des réponses. De plus, les chercheurs ont évalué dans
34 quelle mesure les modifications dans les variables d'exposition entre l'étude initiale et le suivi sont
35 associées avec les modifications des résultats aux tests cognitifs. D'après les chercheurs,
36 l'augmentation des appels déclarés et des messages textes concernent les enfants qui initialement
37 en avaient déclarés peu et la diminution des appels déclarés et des messages textes concernent
38 ceux qui en avaient déclaré un grand nombre, suggérant que les changements d'exposition
39 observés sont plutôt liés à une « régression statistique à la moyenne » des observations qu'à un
40 réel effet du téléphone mobile.

41 La relation entre l'usage du téléphone mobile conjoint à une exposition au plomb et la présence de
42 troubles du déficit d'attention dû à l'hyperactivité a été étudiée dans une cohorte de 2 422 enfants
43 de 10 villes coréennes âgés entre 6 et 17 ans, entre 2005 et 2010 (taux de participation : 85 %)
44 (Byun *et al.* 2013). Les troubles du déficit d'attention dû à l'hyperactivité ont été évalués à l'aide du
45 questionnaire *ADHD rating scale (K-ARS)* (version coréenne validée). D'une part, un dosage de la
46 plombémie chez les enfants et d'autre part un recueil d'information sur les symptômes présentés
47 par les enfants et sur leur usage du téléphone mobile ont été réalisés à l'inclusion et deux ans
48 après à l'aide d'un questionnaire administré aux parents. De nombreux facteurs de confusion ont
49 été pris en compte (revenu du ménage, lieu d'habitation, taille de la fratrie, maladie psychiatrique,

1 tabagisme de la mère pendant la grossesse). Les symptômes d'hyperactivité sont associés à un
2 usage du téléphone mobile en mode appel (indicateur : temps moyen passé en appels vocaux),
3 seulement chez des enfants dont la plombémie est supérieure à 2,35 µg / dl ³⁵. Il existe une
4 tendance entre l'hyperactivité et l'intensité de l'usage du téléphone mobile utilisé en
5 communication ou pour des jeux, uniquement chez les enfants dont la plombémie est supérieure à
6 2,35 µg / dl. Cette étude évalue l'interaction entre l'usage du téléphone mobile et la plombémie,
7 sur des populations spécifiques (fragilisées par le plomb).

8 Certaines limites de l'étude sont dues d'une part à l'information rétrospective sur l'usage du
9 téléphone mobile, d'autre part au fait que ce sont les parents qui ont répondu au questionnaire. De
10 plus, certains facteurs confondants n'ont pas été pris en compte, tels que l'exposition aux
11 perturbateurs thyroïdiens.

³⁵ 2,35 µg / dl correspond à 235 µg / L. À partir de l'étude de Lanphear *et al.* (2005), l'EFSA a établi une plombémie critique chez l'enfant de 12 µg / L, valeur associée à une baisse d'un point de QI dans la population.

1
2Tableau 18 : Études épidémiologiques sur le développement psychomoteur, les troubles du comportement et les troubles mentaux. *Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses*

Type d'étude	Population	Publication	Nombre de sujets	Caractérisation de l'exposition	Effets étudiés	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
Etude de cohorte rétrospective <i>Danish National Birth Cohort</i>	Enfants danois nés entre 1996 et 2002	Divan <i>et al.</i> , 2008	13 159 mères répondant pour les enfants nés entre 1997 et 1999 (12796 + 363 jumeaux et triplés)	Exposition au téléphone mobile Exposition <i>in utero</i> et durant la petite enfance et utilisation d'un téléphone mobile ou DECT par l'enfant Exposition déclarée par la mère par un questionnaire lors du bilan de l'enfant à l'âge de 7 ans	Troubles comportementaux évalués à 7 ans Questionnaire SDQ (<i>Strengths and Difficulties questionnaire</i>)	Association avec les troubles du comportement général de l'enfant : <ul style="list-style-type: none">Exposition pendant les périodes pré- et post- natale après ajustement (OR = 1,80 [1,45-2,23])
		Divan <i>et al.</i> , 2010 (suite de Divan <i>et al.</i> , 2008)	12796 enfants de la 1 ^{ère} analyse + 28 745 enfants d'une nouvelle vague d'inclusion nés entre 1998 et 2002			Association avec les troubles du comportement à l'âge de 7 ans après ajustement <ul style="list-style-type: none">Exposition en période pré-et post- natale : (OR = 1,5 [1,4-1,7])Exposition prénatale seule : (OR = 1,4 [1,2-1,5])Exposition post natale seule : (OR = 1,2 [1,0-1,3]) Prise en compte de facteurs de confusion supplémentaire par rapport à l'étude de 2008.
		Divan <i>et al.</i> , 2011	(exclus les jumeaux et triplés)			Retard cognitif et du développement à 6 et à 18 mois (questionnaires non standardisés)
Étude transversale	Enfants de 11 à 14 ans recrutés entre 2005 et 2006	Abramson <i>et al.</i> , 2009	317 enfants (145 garçons, 172 filles)	Exposition au téléphone mobile Questionnaire dérivé du questionnaire Interphone	Fonctions cognitives. Batterie de tests psychométriques et test mot-couleur de Stroop	Temps de réaction plus court et précision moindre pour des tâches simples ou d'association chez les enfants qui rapportent une plus grande durée de conversation
Étude de cohorte	Enfants de 14 mois.	Vrijheid <i>et al.</i> , 2010	530 enfants	Exposition au téléphone mobile Exposition auto-déclarée : Évaluation de l'exposition maternelle à 32 semaines de grossesse <i>in utero</i> et	Développement mental et psychomoteur (évalués par le « <i>Bailey Scales of infant development</i> »)	Les enfants de mères utilisatrices ont un développement mental légèrement plus précoce que ceux des mères non utilisatrices ; une association inverse est observée pour le développement psychomoteur ; dans ce dernier cas, il n'existe pas de relation dose-effet significative.

Type d'étude	Population	Publication	Nombre de sujets	Caractérisation de l'exposition	Effets étudiés	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
				durant la petite enfance		
Étude transversale German MobilEe- study	Enfants de 8 à 12 ans Adolescents de 13 à 17 ans	Thomas <i>et al.</i> , 2010a	1 498 enfants 1 508 adolescents	Exposition au téléphone mobile <u>Mesures</u> pendant 24h avec dosimètre individuel <u>Exposition auto-déclarée</u> : utilisation quotidienne du téléphone mobile ou sans fil et estimation de la distance de l'habitation à une station de base	Troubles comportementaux Questionnaire SDQ (<i>Strengths and Difficulties questionnaire</i>)	Troubles du comportement et Quartile d'exposition le plus élevé <ul style="list-style-type: none"> Enfants : OR = 2,9 [1,4-5,9]. Adolescents (OR = 3,7 [1,6-8,4]) Problèmes émotionnels, hyperactivité et problèmes relationnels : absence d'association
	Enfants de 12-13 ans au début de l'étude, recrutés entre 2005 et 2006	Thomas <i>et al.</i> , 2010b	238 enfants avec suivi longitudinal	Exposition au téléphone mobile Questionnaire	Fonctions cognitives Tests psychométriques (<i>Stroop test</i> et du <i>CodHealth test</i>)	Au début : <ul style="list-style-type: none"> Pas d'association entre les nombres d'appels et sms et les différences de scores du <i>Stroop test</i> et du <i>CodHealth test</i>, augmentation du score pour le "<i>two back task</i>" et le "<i>one card learning task</i>" (environ 7 tâches à accomplir). Au suivi : <ul style="list-style-type: none"> Pas d'association entre les différences de nombre d'appels et sms (au départ/ au suivi) et les différences de scores du <i>Stroop test</i> et du <i>CodHealth test</i>, diminution de scores pour le "<i>two back task</i>" augmentation des scores pour le "<i>simple reaction time</i>"
Etude de cohorte rétrospective	Exposition <i>in utero</i> Enfants de 5 ans	Guxens <i>et al.</i> , 2013	2618 enfants	Exposition au téléphone mobile pendant la grossesse <u>Exposition auto-déclarée et rétrospective</u> par questionnaire	Troubles comportementaux Questionnaire SDQ (<i>Strengths and Difficulties questionnaire</i>) rempli par instituteur et	Absence d'association entre l'exposition au téléphone mobile pendant la grossesse et les troubles du comportement des enfants lorsque les troubles sont rapportés par les mères et association non significative lorsque les troubles sont rapportés par le professeur.

Type d'étude	Population	Publication	Nombre de sujets	Caractérisation de l'exposition	Effets étudiés	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
					parents	
Étude transversale	Enfants de 6 à 17 ans	Byun <i>et al.</i> , 2013	2 422 enfants	<u>Exposition auto-déclarée</u> par questionnaire aux parents à l'inclusion et après 2 ans	Hyperactivité (version coréenne de l' <i>ADHD rating scale</i>) Mesure de la plombémie Mesures à l'inclusion et après 2 ans	Association significative entre usage du téléphone mobile en mode appel et hyperactivité chez les enfants dont la plombémie est supérieure à 2,35 µg/dL.

1 5.3.2.2 Études chez l'animal

2 Cobb *et al.* (2000) ont exposé des rats *in utero* (GD 3 jusqu'à la naissance) ou de façon pré- et
3 post- natale (GD 3 à PND 10) à un champ électromagnétique large bande (UW-B). Le but de
4 l'étude était d'observer les éventuels effets sur le développement (ouverture des yeux, éruption
5 dentaire...), le comportement (vocalisation de stress, régularisation du comportement), la capacité
6 reproductrice chez les mâles, et la morphologie hippocampique d'une exposition pré- ou pré- et
7 post- natale aux radiofréquences (voir § 1.2.1 pour les effets sur la morphologie de l'hippocampe,
8 § 1.3 sur la fertilité et § 1.4.2 pour la santé globale). Le DAS a été évalué à 45 mW/kg. Trois
9 groupes ont été réalisés : un groupe exposé, un groupe contrôle négatif et un groupe contrôle
10 positif auquel une solution de plomb a été administrée dans l'eau de boisson.

11 L'exposition pré- et post- natale n'affecte pas les performances cognitives des jeunes rats testés à
12 l'âge de 50 jours dans un test opérant utilisant un renforcement alimentaire : dans ce test, l'animal
13 doit, au fur et à mesure des essais, faire plus d'efforts pour obtenir une récompense. De même,
14 une exposition prénatale n'affecte ni les performances d'apprentissage spatial en piscine de
15 Morris, ni l'activité locomotrice des rats testés à l'âge de 40 et 50 jours, respectivement.
16 Cependant, les rats exposés *in utero* présentent, à 8, 10 et 13 jours, plus de vocalisations de
17 stress que les rats contrôles négatifs quand ils sont séparés de leur mère.

18 Les auteurs ne concluent pas à une réelle différence physiologique ou morphologique entre les
19 groupes exposés et non exposés. Ils attribuent les associations significatives obtenues au grand
20 nombre de paramètres mesurés et à la multiplicité des analyses statistiques réalisées. De plus,
21 l'utilisation du témoin positif a prouvé que les analyses sont sensibles à la détection des
22 paramètres investigués dans cette étude. En effet, les protocoles de tests utilisés permettent de
23 mettre en évidence des différences (ex : pas d'effet plancher).

24 Dans l'étude de Kumlin *et al.* (2007), des rats *Wistar* âgés de 21 jours (n = 6 par groupe) ont été
25 exposés pendant 5 semaines consécutives (2 h/jour et 5 jours/semaine) à des ondes GSM à
26 900 MHz (DAS de 0,3 et 3 W/kg et un groupe d'exposition factice). Le développement du SNC a
27 été évalué par des tests de mesure de l'activité générale (test du champ ouvert), de l'anxiété
28 (labyrinthe en croix surélevé), de la mémoire spatiale (piscine de Morris), de la réactivité générale
29 (test de réaction de sursaut) et d'inhibition du réflexe de sursaut (les deux derniers paramètres
30 étant particulièrement sensibles au stress).

31 L'exposition semi-chronique aux radiofréquences n'affecte ni l'activité locomotrice, ni l'anxiété, ni
32 les réponses de sursaut. En revanche, les auteurs observent une amélioration de l'apprentissage
33 et de la mémoire testée à 24 h dans le test de la piscine de Morris chez les rats exposés aux
34 radiofréquences à la dose la plus élevée (DAS = 3 W/kg) par rapport aux rats contrôles et aux rats
35 exposés à la faible dose (DAS 0,3 W/kg). Les auteurs ne concluent pas à des effets bénéfiques
36 d'une exposition sub-chronique aux radiofréquences sur la mémoire, mais préconisent de plus
37 amples recherches.

38 Takahashi *et al.* (2010) ont exposé des rats à un signal de fréquence 2,14 GHz (W-CDMA)
39 20h /jour de GD 7 à PND 21. Le DAS a été évalué entre 0,068 et 0,146 W/kg pour l'exposition la
40 plus forte, et entre 0,026 et 0,067 W/kg pour l'exposition la plus faible. Le nombre d'animaux
41 utilisés est faible (n = 12, 4 rats/groupe, 2 groupes exposés et un groupe témoin), mais
42 l'expérience a été répétée trois fois. En plus des nombreux paramètres de développement
43 physique et fonctionnel, de survie et de reproduction (voir § 1.3 et 1.4.2), la génération F1³⁶ a été
44 examinée pour ses capacités en mémoire spatiale et pour l'activité locomotrice.

45 Quel que soit le DAS, l'exposition aux radiofréquences n'a affecté ni l'activité dans le test du
46 champ ouvert chez les rats âgés de 5 à 8 semaines, ni leur performance en mémoire spatiale à

³⁶ La génération F1 est la première lignée issue d'un croisement de deux individus ou générations.

1 court terme (30 min) dans la piscine de Morris évaluée chez des rats âgés de 9 semaines
2 (Takahashi *et al.*, 2010).

3 Narayanan *et al.* (2013) ont étudié la relation possible entre une exposition 1 h / jour pendant
4 28 jours à un téléphone mobile en mode silence (50 appels manqués/heure, GSM 900 MHz, DAS
5 normatif = 1,15 W/kg pour les exposés³⁷) chez des jeunes rats (6-8 semaines, n = 12 rats/groupe).
6 L'activité locomotrice et l'anxiété ont été mesurées dans un labyrinthe en croix surélevée au 29^e
7 jour ; les rats contrôles étaient exposés au téléphone en mode *OFF*.

8 Vingt-quatre heures après la fin de l'exposition, les rats exposés ne présentent aucune altération
9 de l'activité locomotrice générale. En revanche, une diminution significative du nombre d'entrées et
10 du temps passé dans les bras ouverts est constatée dans le groupe exposé par rapport au groupe
11 contrôles. Par ailleurs, une élévation du nombre de défécations et une baisse des toilettes et
12 des redressements est observée chez les rats exposés. Ces modifications pourraient être le reflet
13 d'une augmentation du niveau d'anxiété des rats exposés, par rapport aux rats contrôles.
14 Cependant, il faut noter que la luminosité dans les bras ouverts par rapport à celle dans les bras
15 fermés du labyrinthe n'est pas indiquée, alors qu'elle est une composante essentielle pour
16 l'interprétation des données : le niveau d'éclairage conditionne l'entrée des rats dans l'un ou l'autre
17 type de branche (ouverte vs fermée). Cela rend difficile l'interprétation de ces résultats. En plus,
18 l'exposition n'est pas effectuée avec un système d'exposition adapté aux rats, mais avec un
19 téléphone mobile, dont l'exposition engendrée pour les rats n'est pas connue.

20 Maaroufi *et al.*, (2014) ont exposé des rats âgés de 4 semaines à un signal à 900 MHz pendant
21 1 h / j pendant 21 jours consécutifs. Le DAS a été évalué entre 0,05 et 0,18 W/kg. Trois groupes
22 ont été réalisés : un groupe exposé aux radiofréquences seules, une exposition factice et un
23 groupe exposé recevant en parallèle une injection quotidienne de sulfate de fer. Des travaux
24 antérieurs ont montré que l'administration de sulfate de fer produit une accumulation de fer dans le
25 cerveau, qui est une hypothèse physiopathologique de maladies neurodégénératives. Les animaux
26 ont subi des tests cognitifs (piscine de Morris, labyrinthe radial à 8 branches et tests de
27 reconnaissance d'objet spatial ou non), un dosage de monoamines (sérotonine et dopamine) et de
28 leurs métabolites, et une évaluation du stress oxydant (voir paragraphe 5.3.1.2). Les rats exposés
29 aux radiofréquences présentent une altération des performances dans les tâches d'exploration,
30 mais pas de la mémoire spatiale en piscine de Morris. Une altération de la concentration en
31 monoamine est constatée dans différentes aires du cerveau et majoritairement dans l'hippocampe.
32 Les rats recevant une co-exposition radiofréquences et sulfate de fer ne présentent pas de
33 différence avec les rats exposés aux radiofréquences seules. Aucun des 2 traitements n'induit de
34 stress oxydant, bien que quelques variations complexes des paramètres du stress oxydant aient
35 été relevées (voir § 5.3.1.2). Des lacunes dans la description du protocole d'exposition (méthode
36 d'estimation du champ électrique, pesée du rat pour connaître la variation du DAS...) rendent
37 délicate l'interprétation des résultats. De plus, il est regrettable qu'un groupe ayant reçu du sulfate
38 de fer sans exposition aux radiofréquences n'ait pas été inclus dans l'étude.

39 Le groupe de travail « Radiofréquences et santé », à l'occasion de son travail sur la mise à jour
40 des connaissances concernant les effets sanitaires des radiofréquences publié le 15 octobre 2013,
41 avaient identifié des études qui n'ont pas été prises en compte pour évaluer les effets des
42 radiofréquences sur les fonctions cognitives, en raison d'importants biais méthodologiques (p184 –
43 186 du rapport de l'Anses publié en 2013). Les études concernant les animaux juvéniles ayant été
44 écartées sont les suivantes : Daniels *et al.* 2009, Aldad *et al.* 2012, Bouji *et al.* 2012b, Hao *et al.*
45 2013.

³⁷ Le DAS normatif correspond au DAS mesuré en laboratoire dans des conditions normatives (exposition pire-cas) et indiqué par exemple dans la notice du téléphone mobile.

1
2
Tableau 19 : Études de l'effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives et le comportement chez l'animal. *Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats des études et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses*

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
Cobb et al., 2000	Signal pulsé UWB DAS = 45 mW/kg 24h/24, 7j/7 GD 3 – GD 18 ou GD 3 - PND 10 ou PND 1 – PND 10	Rat in utero	Tests cognitifs	6 animaux par groupe	Pas d'effet sur les performances cognitives Augmentation des vocalisations de stress à l'âge de 8, 10 et 13 jours. chez les rats exposés de façon pré- et post- natale
Kumlin et al., 2007	GSM 900 MHz DAS = 0,3 et 3 W/kg 2 h/jour et 5 jours/semaine pendant 5 semaines	Rat 21 jours	Activité générale Anxiété, réponse au stress, Réactivité Mémoire spatiale	6 animaux par groupe	Amélioration de l'apprentissage et de la mémoire chez les rats exposés
Takahashi et al., 2010	W-CDMA 2140 MHz DAS = 0,068-0,146 W/kg ou DAS = 0,026 – 0,067 W/kg 20h/j (GD7 – PND 21)	Rat in utero	Mémoire spatiale et activité locomotrice	4 animaux par groupe	Absence d'effet
Narayanan et al. 2012	GSM 900 MHz DAS non précisé 1h/jour pendant 28 jours	Rat 6-8 semaines	Activité locomotrice Anxiété	12 animaux par groupe	- Pas d'altération de l'activité locomotrice générale - diminution significative du nombre d'entrées et du temps passé dans les bras ouverts par rapports aux rats contrôles pouvant indiquer une augmentation de l'anxiété - élévation du nombre de défécations et une baisse des toilettes et des redressements
Maaroufi et al., 2014	GSM 900 MHz DAS = 0,05 - 0,18 W/kg 1h/j, 21 jours consécutifs Administration concomitante de sulfate de fer	Rat 4 semaines	Tests comportementaux	8 animaux par groupe	Altération des performances dans les tâches de reconnaissance d'objet pour les 2 groupes Pas d'effet sur la mémoire spatiale à court et à long terme Altération de la production des monoamines plus prononcée chez les rats exposés que chez les rats exposés avec fer

5.3.2.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le comportement et les fonctions cognitives

- Concernant le comportement

Chez l'enfant, les études de Divan *et al.*, (2008, 2010), les études de Thomas (Thomas *et al.*, 2010a) convergent vers une relation possible entre les symptômes de troubles comportementaux chez des enfants de moins de 7 ans et l'exposition aux radiofréquences évaluée par l'intensité d'usage du téléphone mobile par la mère, en particulier lors de la période prénatale. Afin d'évaluer l'exposition, l'étude de Thomas associe une mesure de l'usage du téléphone mobile et une mesure des champs électromagnétiques pendant une journée, ce qui lui confère une meilleure précision. L'étude de Byun rapporte une association entre l'usage du téléphone mobile et l'hyperactivité chez les enfants de 6 à 17 ans exposés au plomb (Buyn *et al.*, 2013). Cependant, ces associations statistiques ne sont pas fortes. Par ailleurs, il est difficile d'en établir le lien causal.

En effet, l'évaluation rétrospective de l'exposition lors de ces études peut avoir entraîné des biais de mémorisation. De plus, les niveaux d'exposition du fœtus liés à l'usage du téléphone mobile par la mère pendant la grossesse sont vraisemblablement faibles (*cf.* chapitre expositions). L'exposition aux radiofréquences est estimée indirectement par l'intensité de l'usage du téléphone mobile, mais en réalité ces 2 facteurs sont imbriqués et leurs effets sanitaires ne peuvent être évalués séparément. De plus, les différences d'interaction avec le milieu relationnel et affectif, dues à l'usage du téléphone mobile, pourraient intervenir dans l'association mise en évidence : l'usage du téléphone mobile pourrait être un indicateur d'autres troubles, comme par exemple un mode relationnel particulier de la mère avec son enfant, ou dans le cas de l'étude de Thomas, du fait du caractère transversal de l'étude, l'exposition pourrait effectivement entraîner des perturbations comportementales mais celles-ci pourraient entraîner tout aussi bien un usage plus important du téléphone mobile.

Par conséquent, **les éléments de preuves disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur le comportement** des enfants (Figure 30). En revanche, au vu de ces éléments, une association entre l'usage du téléphone mobile et des troubles du comportement chez l'enfant pourrait exister et mérite d'être approfondie.

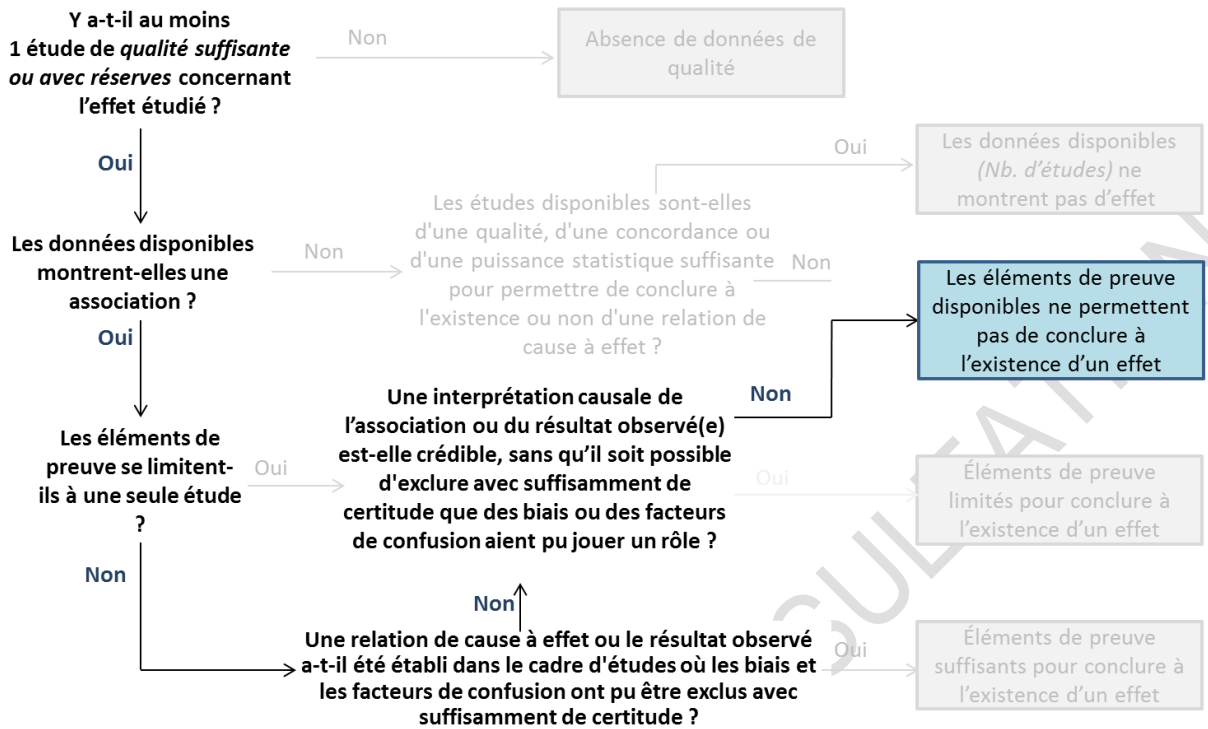
Chez l'animal juvénile, deux études se sont intéressées à l'effet d'une exposition aux radiofréquences sur l'anxiété, évaluée à l'aide du test du labyrinthe en croix surélevé, chez de jeunes rats. La première ne montre aucun effet d'une exposition aux radiofréquences (DAS de 0,3 et 3 W/kg) pendant 4-5 semaines et à partir de 21 jours (Kumlin *et al.*, 2007). La seconde montre une augmentation de l'anxiété chez des rats exposés à un téléphone mobile (DAS normatif de 1,15 W/kg) plus tardivement, à partir de 6-8 semaines (fin de l'adolescence, jeunes adultes), pendant 28 jours (Narayanan *et al.*, 2012).

Ces résultats apparemment contradictoires pourraient révéler des effets âge-dépendants. Ainsi, il est difficile de conclure sur la base de deux études quant à un effet des radiofréquences sur l'anxiété du jeune rat. En ce qui concerne la locomotion, les études de Kumlin *et al.* (2007), Narayanan *et al.* (2012), Cobb *et al.* (2000) et Takahashi *et al.* (2010) ne montrent aucune altération des capacités locomotrices des animaux exposés aux radiofréquences à différentes périodes du développement pendant 3 à 5 semaines.

Par conséquent, les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur le comportement** chez l'animal (Figure 31).

En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences** sur le comportement chez l'enfant (Figure 32).

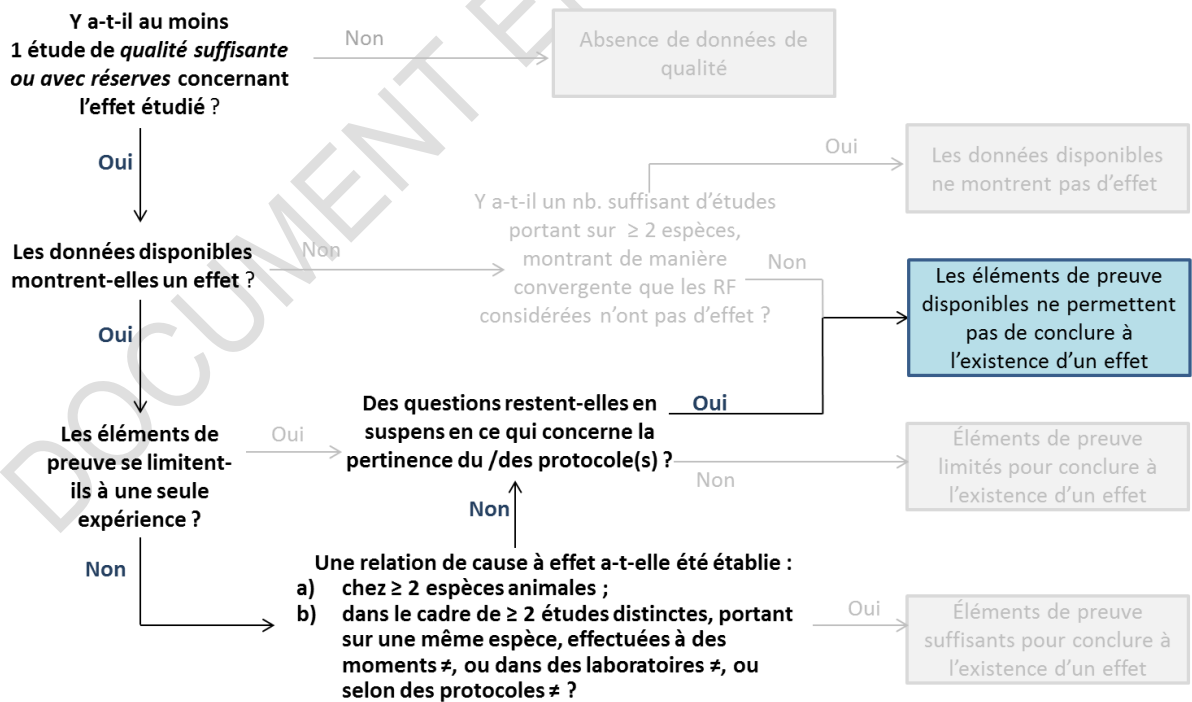
Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve



1
2
3

Figure 30 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au comportement dans les études cliniques et épidémiologiques

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve



4
5
6

Figure 31 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au comportement dans les études sur les modèles animaux

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'enfant				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'enfant	Effet possible pour l'enfant			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'enfant	Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			
	Absence de données de qualité					
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'enfant

Figure 32 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le comportement chez l'enfant.

- Concernant les fonctions cognitives

Chez l'enfant, trois études **épidémiologiques** rapportent une amélioration de certaines fonctions cognitives après exposition au téléphone mobile *in utero* (Vrijheid *et al.*, 2010) ou lors de l'enfance (Thomas *et al.*, 2010b). Les enfants ou adolescents les plus gros utilisateurs de téléphone mobile présentent des temps de réaction plus courts, mais des résultats moins exacts que les non utilisateurs (Abramson *et al.*, 2009).

Ces résultats ne sont pas confirmés par les études de **type expérimental** qui concluent à l'absence de différence entre les exposés et les non exposés aux radiofréquences dans l'exécution de tâches cognitives. Cependant, les études expérimentales investiguent des effets aigus, puisque l'évaluation des effets est réalisée pendant l'exposition, alors que les études épidémiologiques mentionnées ci-dessus rapportent des effets chez l'enfant pour une exposition prénatale ou lors de la petite enfance. De plus, les études épidémiologiques estiment l'exposition aux radiofréquences par la mesure de l'utilisation du téléphone mobile alors que les études expérimentales s'affranchissent du facteur « usage du téléphone mobile ». Il est de ce fait difficile de conclure à un effet des radiofréquences sur les tâches cognitives à ce jour.

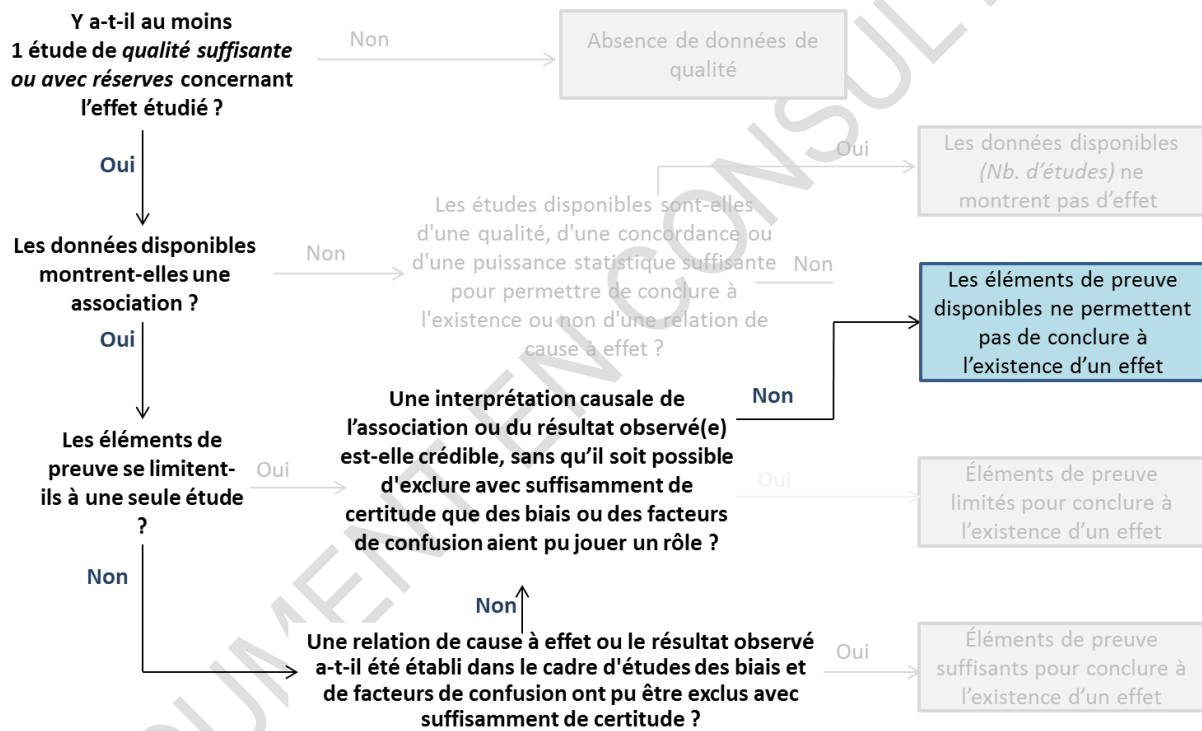
Par ailleurs, deux études concordent sur l'apparition de différences dans les tracés électro-encéphalographiques dans les bandes de fréquence thêta (4-8 Hz) et bêta (12-15 Hz) (Krause *et al.*, 2006 ; Loughran *et al.*, 2013) chez les enfants exposés, mais les mécanismes et les conséquences médicales de ces modifications, s'ils existent, restent à étudier.

Au vu de ces éléments, **les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives chez l'Homme** (Figure 33).

Chez l'animal, aucun effet délétère n'est observé sur l'apprentissage et la mémoire spatiale à court-terme lors d'une exposition prénatale seule ou pré- et post- natale combinée aux radiofréquences (Cobb *et al.*, 2000 ; Takahashi *et al.*, 2010), alors qu'une amélioration des performances en mémoire spatiale à long-terme est observée après 5 semaines d'exposition chez

1 le rat de 21 jours (Kumlin *et al.*, 2007). Cependant, ces résultats ne sont pas retrouvés par
 2 Maaroufi *et al* (2013) dans un protocole d'exposition similaire chez le rat âgé de 1 mois (3
 3 semaines d'exposition). Ces derniers auteurs ne montrent pas d'effet de l'exposition postnatale sur
 4 la mémoire spatiale à long terme, ni sur la mémoire spatiale de travail. Par contre, la mémoire à
 5 court terme (reconnaissance d'objets) est altérée (Maaroufi *et al.*, 2014).
 6 Chez l'animal, les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence**
 7 **d'un effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives** chez l'animal (Figure 34).
 8 Rappelons que les éléments de preuve avaient amené à conclure à un niveau de preuve limité
 9 chez l'animal adulte dans le rapport « Radiofréquences » 2013 sur la base des études du groupe
 10 d'Arendash (Arendash *et al.*, 2010, 2012 ; Mori et Arendash 2011) qui avaient retrouvé une
 11 amélioration des performances cognitives chez les souris adultes et très âgées.
 12 En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas d'évaluer l'existence d'un effet**
 13 **des radiofréquences** sur les fonctions cognitives chez l'enfant (Figure 35).
 14

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve



15
 16 Figure 33 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions cognitives dans les études cliniques et
 17 épidémiologiques

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve

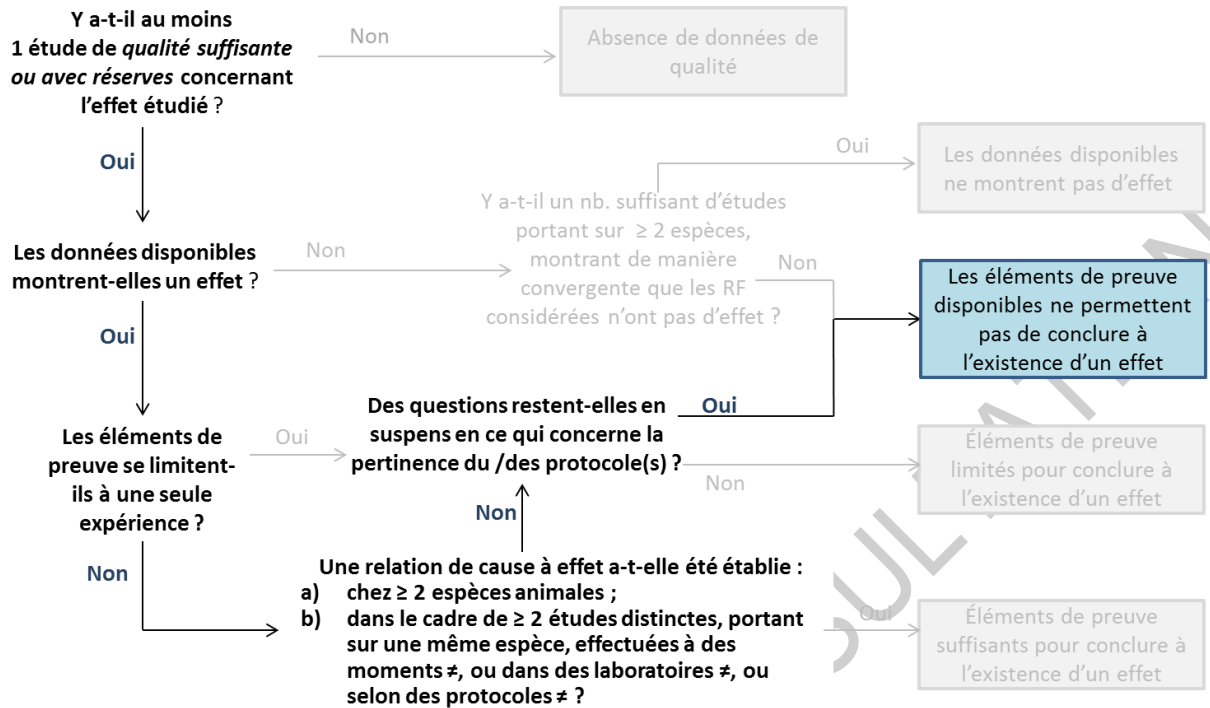


Figure 34 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions cognitives dans les études sur les modèles animaux

1
2
3
4

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'enfant				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'enfant	Effet possible pour l'enfant			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'enfant	Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			
	Absence de données de qualité					
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'enfant

Figure 35 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives chez l'enfant

5
6
7

5.3.3 Effets sur les fonctions auditives

5.3.3.1 Études chez l'Homme

Sudan *et al.* (2013) ont utilisé les données de la *Danish National Birth Cohort* (DNBC) pour étudier la perte d'audition chez les enfants exposés *in utero* au téléphone mobile. Des entretiens ont été réalisés auprès de femmes enceintes, puis à l'âge de 6 mois, 18 mois et 7 ans de l'enfant. Au total, 52 680 enfants ont été inclus. Une association à la limite de la significativité (OR = 1,21 [95% CI] 0,99 – 1,46) est retrouvée entre l'exposition post natale au téléphone mobile et la perte d'audition chez les enfants de 7 ans. Cette étude est de bonne qualité, les principaux biais méthodologiques sont maîtrisés, on notera cependant que les expositions liées aux autres appareils sonores n'ont pas pu être prises en compte. Toutefois, des analyses de sensibilité avec modélisation à partir des données de la littérature ont été réalisées pour tenir compte des possibles biais de confusion non mesurés. D'autres études seraient nécessaires pour explorer cette question.

5.3.3.2 Études chez l'animal

Budak *et al.* ont publié une série d'études chez le lapin visant à étudier les effets d'une exposition aux radiofréquences (signal de type GSM à 1 800 MHz, DAS non précisé) sur la fonction cochléaire en mesurant l'amplitude des DPOAEs (*distortion product otoacoustic emissions*³⁸) sur des fréquences allant de 1 à 8 kHz. La puissance n'est pas précisée mais elle est considérée par les auteurs comme suffisamment faible pour ne pas engendrer d'effet thermique. Seules les études exposant les lapins de façon prénatale et postnatale - ou les deux combinées - sont examinées ici. Ainsi, deux études sont répertoriées, investiguant deux types d'exposition :

- une exposition mixte prénatale et/ou postnatale (Budak *et al.* 2009a);
- l'exposition postnatale chez des lapereaux âgés de 1 mois (Budak, *et al.* 2009b).

Dans la première étude, les animaux ont été répartis en 4 groupes (9 animaux par groupe) (Budak *et al.*, 2009a) :

- un groupe témoin (exposition factice) ;
- un groupe exposé 15 min / jour pendant 7 jours, de GD 15 à GD 22 ;
- un groupe exposé 15 min / jour pendant 14 jours, de PND 30 à PND 44 ;
- un groupe exposé 15 min / jour pendant 7 jours, de GD 15 à GD 22 puis 14 jours de PND 30 à PND 44.

La fenêtre d'exposition *in utero* choisie (GD 15 – GD 22) correspond à la période de transition entre l'embryogénèse et l'organogénèse.

Dans la seconde étude (Budak *et al.*, 2009b), les auteurs ont comparé les effets d'une exposition 15 min par jour pendant 7 jours entre un groupe de lapereaux âgés d'un mois (PND 30 – PND 37) et un groupe de lapins adultes âgés de 13 mois. Deux groupes témoins (exposition factice) ont été inclus avec 9 animaux de chaque âge.

Dans la première étude, seuls les animaux exposés uniquement 1 mois après leur naissance (PND 30 à PND 44) présentent une diminution des DPOAEs pour les fréquences de 4 et 6 kHz. Tous les animaux exposés aux radiofréquences présentent une augmentation de l'amplitude des DPOAEs pour les fréquences de 1,5 ou 2 ou 3 kHz ainsi que les lapins exposés *in utero* seulement pour les fréquences de 4 et 6 kHz. À 1 et 8 kHz, aucune différence significative n'est observée entre les groupes exposés et témoins.

Dans la seconde étude, les effets étaient plus significatifs chez les adultes que chez les jeunes lapins.

³⁸ Émissions oto-acoustiques évoquées par produit de distorsion.

1 Les auteurs attribuent l'effet observé à une hyperthermie localisée dans le conduit auditif qui serait
2 atténuée par la présence de liquide au niveau de l'oreille moyenne (Budak, *et al.* 2009a ; Budak, *et*
3 *al.* 2009b). La puissance du générateur utilisé (0,1 W) et l'absence de toute donnée dosimétrique
4 ne semblent pas pouvoir appuyer cette hypothèse. Les résultats de cette étude sont donc à
5 prendre en compte avec réserves.

DOCUMENT EN CONSULTATION

1 Tableau 20 : Étude investiguant les effets sur la fonction auditive chez l'Homme. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète
2 en aucun cas leur interprétation par l'Anses

Étude	Type d'étude	Population	Effets étudiés	Caractérisation de l'exposition	Nombre de sujets <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Sudan et al., (2013)	Étude transversale	Exposition <i>in utero</i> et durant la petite enfance. Mères issues de la <i>Danish National Birth Cohort</i> 52 680 enfants	Perte d'audition Évaluation des enfants à 6 mois, 18 mois et 7 ans.	Évaluation rétrospective (au cours du questionnaire à 7 ans) de l'exposition au téléphone mobile pendant la grossesse et utilisation d'un téléphone mobile par l'enfant Exposition auto-déclarée par questionnaire	Association faible entre l'utilisation post natale du téléphone mobile et la perte d'audition de l'enfant âgé de 7 ans. Pas d'association entre l'exposition pendant la grossesse et la baisse d'audition à 18 mois ou à 7 ans Analyses de sensibilité pour modéliser le risque sur les facteurs de confusion possible et pour prendre en compte un possible effet lié à un diagnostic précoce du fait de l'étude

3

4

5 Tableau 21 : Études investiguant les effets sur la fonction auditive chez l'animal. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète
6 en aucun cas leur interprétation par l'Anses

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux / groupe	Résultats <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Budak et al., 2009a	GSM like 1 800 MHz DAS non précisé 15 min/j pendant 14 jours PND 30 – PND 44 ou 15 min/j pendant 7 jours (GD15 – GD 22) ou 15 min/j pendant 7 jours GD15 – GD22 puis PND 30 – PND 44	Lapin <i>in utero</i> et/ou 30 jours	Fonction cochléaire : mesure de l'amplitude des DPOAE (1 – 8 Hz)	9 animaux / groupe	Diminution de l'amplitude des DPOAE chez les lapins exposés 1 mois après leur naissance, pour des fréquences de 4 à 6 Hz.
Budak et al., 2009b	GSM like 1 800 MHz DAS non précisé 15 min/j pendant 7 jours (PND 30 – PND 37)	Lapin 30 jours	Fonction cochléaire : mesure de l'amplitude des DPOAE (1 – 8 Hz)	9 animaux / groupe	A 1,0 – 2,0 kHz et 6,0 kHz, amplitude des DPOAE chez les exposés supérieure à celle des non exposés

5.3.3.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur les fonctions auditives

Chez l'enfant, Sudan *et al.*, (2013) ont étudié les effets d'une exposition au téléphone mobile sur la fonction auditive de l'enfant (Sudan *et al.*, 2013). Cette étude de bonne qualité rapporte une association entre l'exposition postnatale au téléphone mobile et la perte d'audition chez les enfants de 7 ans. D'autres études seraient nécessaires pour explorer cette question. **Les éléments de preuve disponibles (1 seule étude) ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur la fonction auditive** (Figure 36).

Chez l'animal, deux études (Budak *et al.*, 2009a et 2009b) provenant de la même équipe ont exploré les effets des radiofréquences sur la fonction auditive du lapin. En fonction de la période d'exposition, les animaux exposés présentent des variations dans l'amplitude des DPOAEs. Cependant, ces deux études provenant de la même équipe et présentant quelques limites méthodologiques méritent d'être reproduites, notamment sur un rongeur (rat ou souris). Par conséquent, **les éléments de preuve disponibles (2 études de la même équipe) ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur la fonction auditive** (Figure 37).

En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences** sur la fonction auditive chez l'enfant (Figure 38).

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve

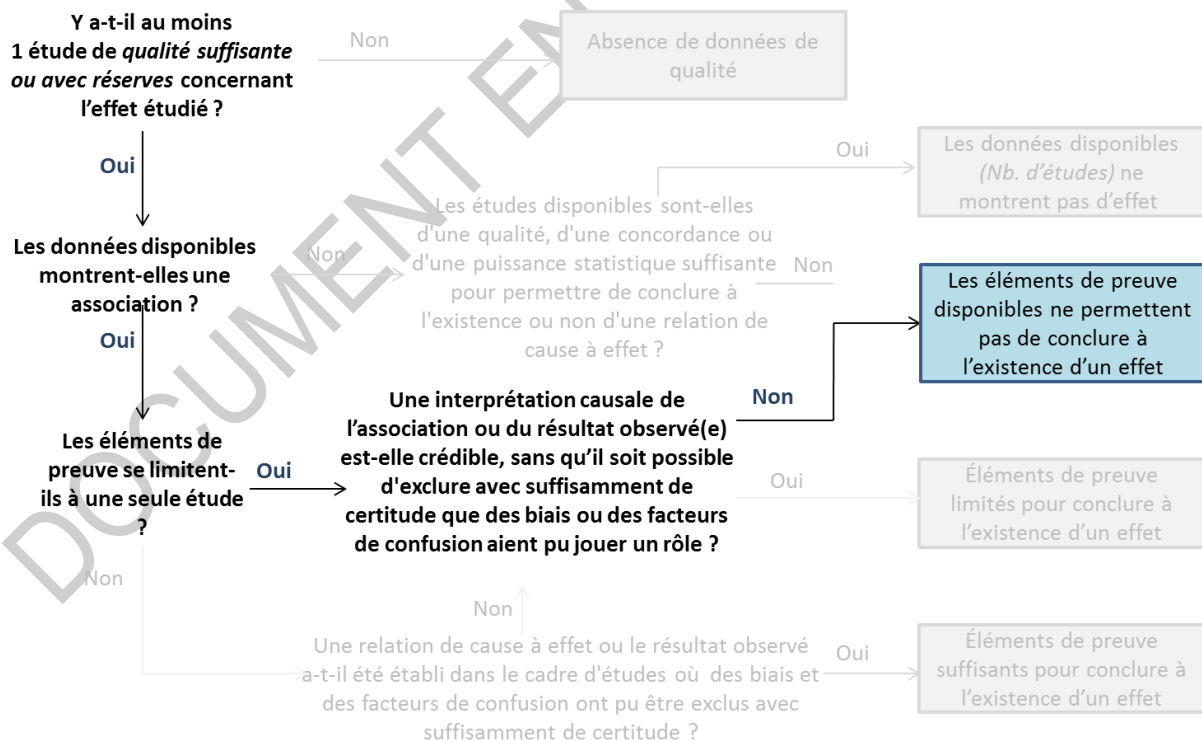


Figure 36 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions auditives dans les études épidémiologiques

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve

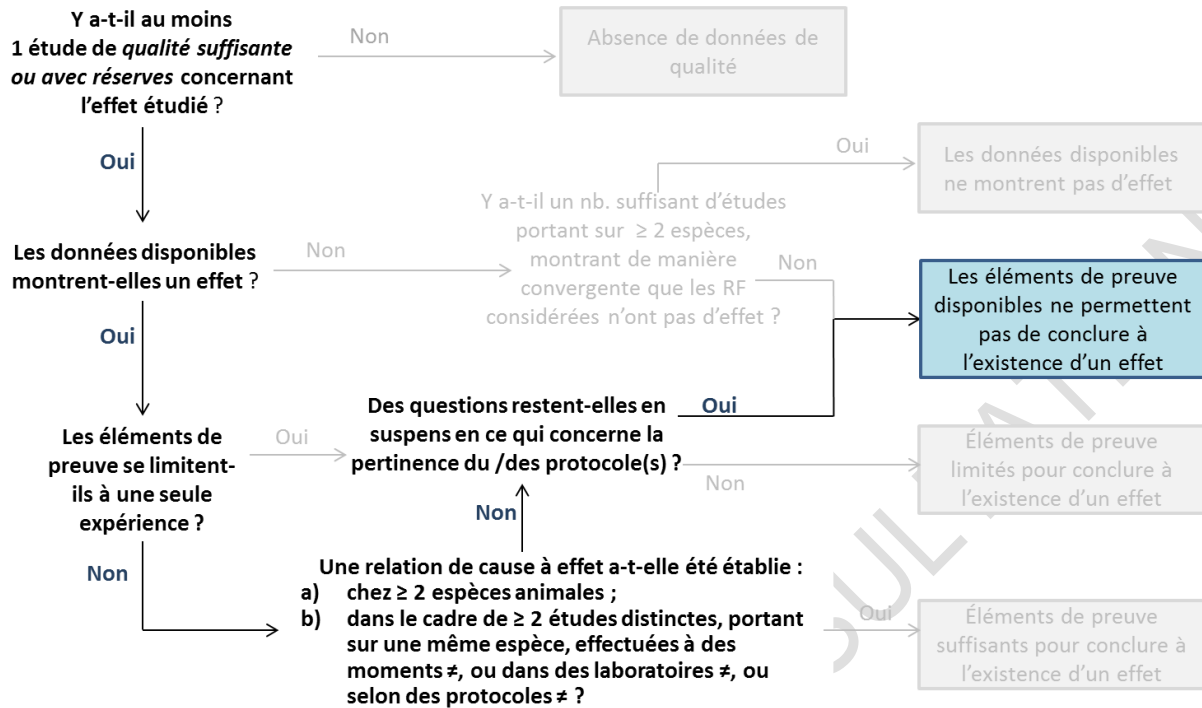


Figure 37 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions auditives dans les études sur les modèles animaux

1
2
3
4

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'enfant				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'enfant	Effet possible pour l'enfant			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'enfant	Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			
	Absence de données de qualité					
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'enfant

Figure 38 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur les fonctions auditives chez l'enfant

5
6

5.3.4 Effets sur le sommeil

5.3.4.1 Chez l'Homme

Aucune étude n'investit spécifiquement les effets des radiofréquences sur le sommeil des enfants.

5.3.4.2 Chez l'animal

L'étude des effets d'une exposition chronique aux radiofréquences sur les enregistrements polysomnographiques de jeunes rats (Pelletier *et al.* 2013) s'inscrit dans le cadre plus général d'une étude de l'équilibre énergétique entre les entrées (prise alimentaire) et les dépenses (régulation thermique, activité locomotrice et alternance veille / sommeil). Des rats âgés de 3 semaines ont été exposés pendant 6 semaines, en chambre climatique, à un signal GSM à 900 MHz (1 V/m). Le DAS initial était de 0,3 mW/kg et le DAS terminal de 0,1 mW/kg (en raison du développement et de la croissance des jeunes rats). Les 3 premières semaines ont servi à l'acclimatation des animaux. Les capteurs ont été mis en place pendant la 4^{ème} semaine et la 5^{ème} a été consacrée au repos. Les enregistrements des différents paramètres ont été effectués pendant la 6^{ème} semaine, à 2 températures ambiantes (24°C et 31°C). En vue de dupliquer l'expérience, 2 séries de 16 animaux (8 exposés et 8 contrôles) ont été incluses dans l'étude. Les résultats de l'étude sont les suivants :

- à 24°C, aucune différence entre les exposés et les non exposés n'a été observée, en ce qui concerne les températures centrales et caudales, les proportions d'éveil, de sommeil lent et de sommeil paradoxal, et la prise alimentaire ;
- à 31°C, la prise alimentaire a diminué et cette diminution est significativement plus faible chez les exposés que chez les non exposés. L'exposition tend donc à augmenter la consommation journalière de nourriture chez ces animaux. La température centrale ne diffère pas entre les exposés et les non exposés, ni avec la température des rats des groupes à 24°C. Cependant, la température caudale a significativement augmenté par rapport à celle observée à 24°C et cette augmentation est significativement plus marquée chez les non exposés par rapport aux exposés. Cette différence pourrait s'expliquer par un effet de vasoconstriction chez les exposés. Enfin, la proportion d'éveil a significativement diminué dans les 2 groupes et celles de sommeil lent et de sommeil paradoxal a augmenté. Tous ces résultats sont cohérents entre eux et traduisent un processus d'économie d'énergie à 31°C.

Le seul résultat imputable à l'exposition aux radiofréquences est une augmentation de la fréquence des épisodes de sommeil paradoxal chez les exposés (n = 5) par rapport aux non-exposés (n = 4), aussi bien à 24°C qu'à 31°C. En revanche, aucune modification de la puissance spectrale n'a été observée, chez les exposés, dans aucune bande de fréquence.

Les auteurs consacrent une grande partie de la discussion à la régulation thermique et concluent que les effets sur le sommeil paradoxal ne sont pas des effets thermiques. Ils émettent l'hypothèse que ces effets correspondent à une augmentation de la vigilance. Par ailleurs, les auteurs ont étudié le sommeil entre midi et 18 h, période qui pourrait ne pas être représentative de l'ensemble du nyctémère, soit une période de 24 h. En effet, le rat étant un animal polysomnique, la période de référence pour les études de sommeil chez le rat est de 24 h. En outre, un hypnogramme permettant de visualiser et de quantifier notamment la fragmentation du sommeil (*i.e.* la présence de micro-éveils durant quelques secondes) aurait été souhaitable. Ainsi, ces données méritent d'être reproduites et complétées pour confirmer les variations observées dans cette étude suite à une exposition aux radiofréquences chez le rat.

1
2
3

Tableau 22 : Études investiguant les effets des radiofréquences sur le sommeil chez l'animal. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux / groupe	Résultats <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Pelletier <i>et al.</i> , 2012	GSM 900 MHz DAS de 0,3 mW/kg à 0,1 mW/kg en fonction de la croissance de l'animal 24°C et 31°C 6 semaines	Rat 3 semaines	Équilibre entre le sommeil, la régulation de température corporelle et la prise alimentaire	8 animaux par groupe	Augmentation de la fréquence des épisodes de sommeil paradoxal chez les exposés (n = 5) par rapport aux non-exposés (n = 4), aussi bien à 24°C qu'à 31°C. Aucune modification de la puissance spectrale chez les exposés, quelle que soit la bande de fréquence.

4
5

1 5.3.4.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le sommeil.

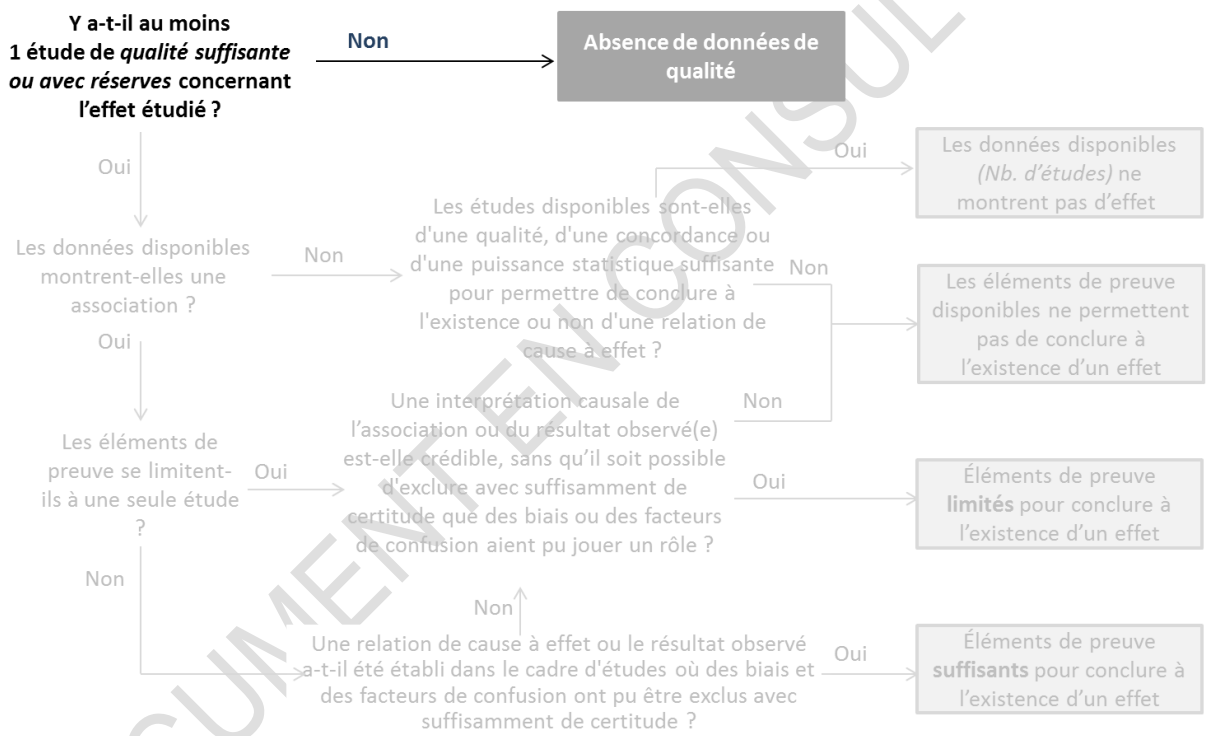
2 Chez l'enfant, aucune étude n'analyse spécifiquement l'association entre les radiofréquences et le
3 sommeil. Par conséquent, **les données sont inexistantes** (Figure 39).

4 Chez l'animal, une étude de bonne qualité rapporte une augmentation de la fréquence des
5 épisodes de sommeil paradoxal chez les exposés (n = 5) par rapport aux non-exposés (n = 4),
6 quelle que soit la température. Ce résultat mérite d'être reproduit. Par conséquent, **les éléments
7 de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur le
8 sommeil** (Figure 40).

9 En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un
10 effet des radiofréquences sur le sommeil** chez l'enfant (Figure 41).

11

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve



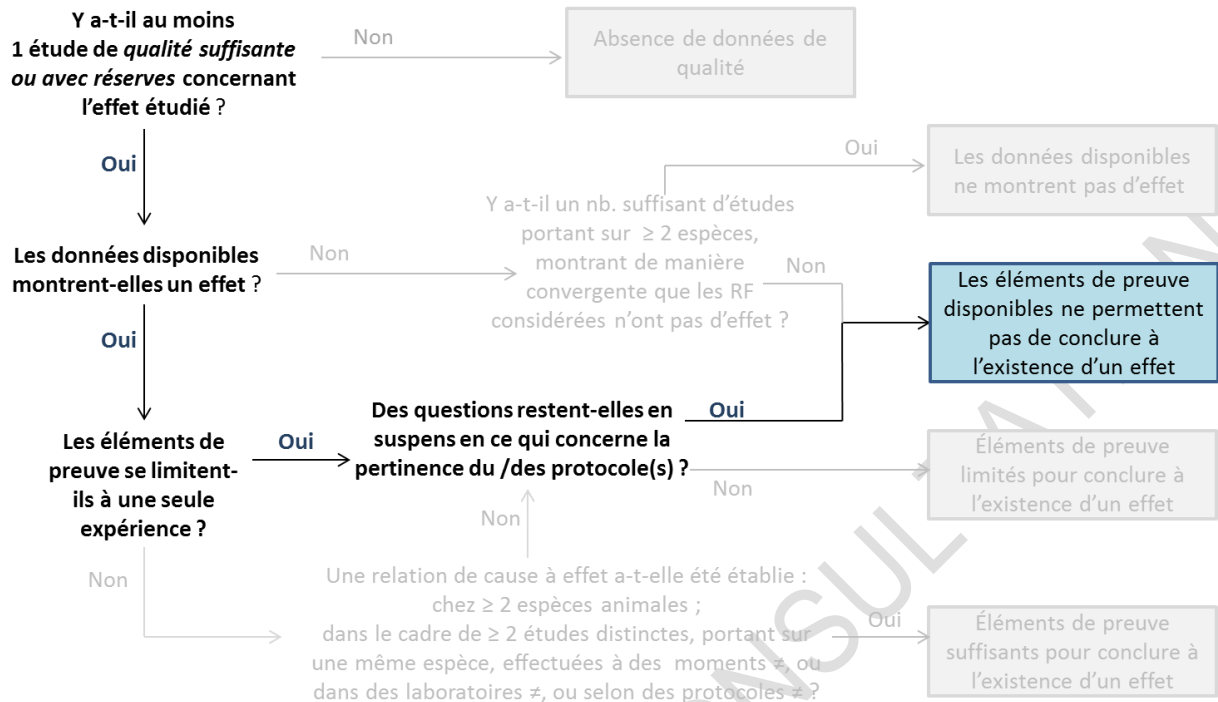
12

13

Figure 39 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au sommeil dans les études épidémiologiques

14

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve



1
2
3

Figure 40 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au sommeil dans les études sur les modèles animaux

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'enfant				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'enfant	Effet possible pour l'enfant			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'enfant				
	Absence de données de qualité		Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'enfant

4
5
6
7

Figure 41 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le sommeil chez l'enfant

1 5.4 Études sur le bien-être

2 Van den Bulck (2007) a mené une étude prospective de cohorte sur des enfants scolarisés en
3 Belgique. Les données initiales proviennent de l'étude sur les médias et la santé des adolescents
4 de Louvain (SOMAH) en février 2003, avec un premier suivi en février 2004 et un second en 2005.
5 L'âge moyen était de 13,7 ans (écart-type = 0,68) dans le groupe le plus jeune et 16,9 ans dans le
6 groupe le plus âgé. 28,8 % des participants ont été perdus de vue. Au total, 1656 participants ont
7 été inclus, comprenant 52,1 % de garçons et 47,9 % de filles. Au premier suivi, les participants ont
8 répondu au questionnaire d'évaluation de l'utilisation du téléphone mobile qui comportait la
9 fréquence d'utilisation du téléphone après le coucher (jamais, moins d'une fois par mois, moins
10 d'une fois par semaine, environ une fois par semaine, plus d'une fois par semaine) et la période de
11 réception ou d'envoi de messages texte (immédiatement après avoir éteint la lumière, entre minuit
12 et 3 h, entre 3 h et 6 h, après 6 h, quelle que soit l'heure dans la nuit). La fatigue a été évaluée 1
13 an plus tard grâce à un questionnaire en 4 questions aboutissant à une échelle de 11 points allant
14 de -5 (pas fatigué du tout) à +5 (très fatigué).

15 L'étude révèle que plus de la moitié des jeunes (tous âges confondus) utilisent le téléphone mobile
16 après l'extinction de la lumière le soir, pour envoyer ou recevoir des messages texte. La majorité
17 des jeunes utilisent leur téléphone mobile juste après avoir éteint la lumière (55,6 % pour les
18 messages texte et 58 % pour les appels). Une proportion non négligeable l'utilise entre minuit et
19 3 h du matin (20,3 % envoie des messages et 17,3 % appelle), mais peu d'enfants utilisent le
20 téléphone à partir de 3 h du matin. Cependant, environ 1/5^{ème} des jeunes utilise le téléphone quelle
21 que soit l'heure de la nuit.

22 Une analyse de régression logistique montre que le fait d'être modérément fatigué ainsi que le fait
23 d'être très fatigué augmentent avec la fréquence d'utilisation du téléphone mobile. Les participants
24 qui utilisent leur téléphone après avoir éteint la lumière une fois par semaine ont 3 fois plus de
25 chance d'être très fatigués que ceux qui ne l'utilisent pas. Les participants qui utilisent plusieurs
26 fois par semaine leur téléphone après avoir éteint la lumière ont 5 fois plus de chance d'être
27 fatigué que ceux qui ne l'utilisent pas.

28 Cette analyse montre également que l'utilisation du téléphone mobile après avoir éteint la lumière
29 double la probabilité d'être très fatigué un an plus tard. Chez ceux qui utilisent le téléphone quelle
30 que soit l'heure de la nuit, la probabilité triple. Et chez les sujets qui envoient ou reçoivent des
31 messages entre minuit et 3h du matin, elle quadruple.

32 Dans le groupe qui est modérément fatigué, 7,5 % des cas est attribuable à l'utilisation du
33 téléphone mobile, alors que dans le groupe très fatigué, 35 % des cas est attribué à l'utilisation du
34 téléphone mobile.

35 Les auteurs concluent que les enfants utilisent de plus en plus le téléphone après avoir éteint la
36 lumière, et que même une utilisation modérée double le risque de fatigue. Cependant, cette étude
37 comporte quelques biais méthodologiques. Tout d'abord le fait que l'exposition et les troubles du
38 sommeil aient été évalués par auto-questionnaire. Chez les adolescents, la source majeure de
39 biais est la nécessité de donner des résultats « socialement souhaitables ». Les auteurs pensent
40 qu'il serait improbable que les étudiants sous estiment leur comportement. Les estimations de la
41 prévalence sont vraisemblablement surestimées, ce qui fait que l'erreur de classement entraînerait
42 une estimation plus basse de la relation.

43
44 Les données de « *the German MobilEe-study* » ont fait l'objet de plusieurs publications.

45 Les participants de cette étude ont répondu à un entretien individuel assisté par ordinateur.
46 Pendant 24 h, les participants ont porté un dosimètre et ont renseigné la fréquence et le temps
47 d'utilisation du téléphone mobile. L'exposimètre nécessitant d'être en mouvement, seule la période
48 où le participant était réveillé a produit des mesures exploitables. En plus de l'évaluation de
49 l'exposition par l'exposimètre individuel, les participants ont déclaré sur un journal-papier leur

1 fréquence et la durée d'utilisation du téléphone mobile dans la journée sur cette même période de
2 24 heures.

3 Kühnlein *et al.* (2009) ont développé une analyse statistique de l'exposition de 1 433 enfants (sur
4 les 1 484) inclus dans l'étude et ayant une mesure complète de l'exposition sur 24 heures. Les
5 **symptômes chroniques** (maux de tête, irritation, nervosité, étourdissements, anxiété, troubles du
6 sommeil, fatigue) ressentis au cours des 6 mois précédents ont été recueillis à l'aide du
7 questionnaire *Health Behaviour in School-Aged Children* et leur intensité a été évaluée selon
8 l'échelle de Likert (quasi quotidiennement, plusieurs fois par semaine, environ chaque semaine,
9 environ une fois par mois, rarement, jamais). Aucune association entre l'exposition divisée en
10 2 catégories (les moins exposés (88 %) et les plus exposés (12 %)) et les symptômes chroniques
11 ressentis au cours des 6 mois précédents n'a été observée.

12 Heinrich *et al.* (2010) ont également utilisé les données de l'étude « *the German MobilEe-study* »
13 afin d'analyser l'association entre l'exposition aux radiofréquences et la survenue de **symptômes**
14 **aigus** aspécifiques (maux de tête, irritabilité, nervosité, étourdissements, fatigue, problèmes de
15 concentration, troubles du sommeil). Les symptômes aigus ressentis pendant cette période ont
16 également été notés sur un journal papier à midi et le soir. Les symptômes pris en compte ont été
17 extraits de la liste des plaintes somatiques de von Zerssen (von Zerssen *et al.*, 1974) et leur
18 intensité évaluée selon l'échelle de Likert (intense, modéré, faible, pas du tout). Les principaux
19 facteurs de confusion éventuels tels que les données socio-démographiques (recueillies en
20 utilisant le questionnaire du *German Health Interview and Examination Survey for Children and*
21 *Adolescents* (KIGGS)) et les préoccupations environnementales (évaluées par la version courte du
22 questionnaire *Environmental Worry Scale*) ont été pris en compte.

23 Cette étude révèle que les niveaux d'exposition sont très faibles (0,13 à 0,92 % des limites
24 préconisées par l'Icnirp pendant les heures d'éveil), et que l'utilisation de téléphone est faible :
25 seuls 2,3 % des enfants et 14,3 % des adolescents déclarent utiliser le téléphone plus de 5 min au
26 cours de l'après-midi.

27 Pour les enfants (8 - 12 ans) utilisant le plus le téléphone, les résultats sont les suivants :

- 28 • il existe une augmentation (non significative) de certains troubles lors des évaluations
29 survenues à midi (maux de tête chez les enfants ayant eu plus de 5 min de conversation
30 téléphonique OR = 2,33 [0,98 - 5,54 ; fatigue chez les enfants du quartile d'exposition
31 supérieur OR = 1,36 [0,96 - 1,92]) ;
- 32 • des problèmes de concentration le soir sont associés à l'exposition des enfants les plus
33 exposés (les 25 % les plus exposés, soit le 4^{ème} quartile d'exposition mesurée) : OR = 1,55
34 [1,02 - 2,33].

35 Pour les adolescents (13 – 17 ans), les résultats sont les suivants :

- 36 • les maux de tête à midi sont plus fréquents chez les adolescents les plus exposés (4^{ème}
37 quartile : OR = 1,50 [1,03 - 2,19]) ;
- 38 • la fatigue est observée en relation avec des communications de plus de 5 mn le matin (OR
39 = 1,76 [1,22 - 2,56]) ;
- 40 • l'irritation est également retrouvée associée à un usage de plus de 5 mn au cours de la
41 matinée (OR = 1,64 [1,10 – 2,44]) ;
- 42 • l'irritation le soir est retrouvée associée au quartile d'exposition le plus élevé (OR = 1,79
43 [1,23 – 2,61]).

44 Quand seuls les 10 % des participants les plus exposés (10^{ème} décile) sont pris en considération,
45 les résultats significatifs de l'analyse principale ne sont pas retrouvés, sans doute par perte de
46 puissance statistique, car les *odds-ratios* restent élevés (du même ordre que ceux observés dans
47 les analyses précédentes). Par ailleurs, les auteurs concluent que les quelques associations

1 significatives observées pourraient être dues à la multiplication des tests effectués. D'autre part, le
2 lien de causalité est difficilement vérifiable, la perturbation du sommeil pouvant être le facteur
3 causal.

4 Poursuivant son analyse sur l'ensemble des 1 484 enfants et 1 508 adolescents, la même équipe
5 a étudié les mêmes symptômes chroniques ressentis au cours des 6 mois précédents l'interview
6 avec le même questionnaire (Heinrich *et al.*, 2011). Quarante-deux pourcents des mesures
7 étaient en dessous du seuil de détection du dosimètre (0,05 V/m). La moitié des enfants et 92 %
8 des adolescents possédaient leur propre téléphone mobile, que la plupart des enfants et des
9 adolescents (92 % et 75 % respectivement) utilisent moins de 5 min par jour. De même, 58 % des
10 enfants et 31 % des adolescents déclarent utiliser le téléphone fixe moins de 5 min par jour. Les
11 symptômes les plus fréquemment rapportés sont : la fatigue (30 % des enfants et 51 % des
12 adolescents), l'irritation (21 % des enfants et 32 % des adolescents), les problèmes de sommeil
13 (19 % des enfants) et la nervosité (24 % des adolescents).

14 Aucune relation n'a pu être établie entre les niveaux d'exposition aux radiofréquences mesurés par
15 les dosimètres personnels et les différents symptômes non spécifiques étudiés. Cependant, les
16 enfants du 3^{ème} quartile d'exposition auraient tendance à avoir moins de problème de sommeil (OR
17 = 0,63 [0,41 – 0,96]) que ceux des autres quartiles.

18 Chez les adolescents uniquement, l'irritation est plus souvent rapportée (auto-questionnaire) parmi
19 ceux qui utilisent quotidiennement un téléphone mobile (OR = 1,48 [1,13 – 1,93]) et ceux qui
20 utilisent un téléphone sans-fil DECT (OR = 1,30 [1,02 – 1,64]). Il n'est cependant pas possible d'en
21 conclure formellement à l'existence d'un excès de symptômes chroniques lié à l'exposition aux
22 champs électromagnétiques, en raison des multiples tests réalisés (Heinrich *et al.*, 2011).

23 Au Danemark, Sudan *et al.* (2012) ont étudié l'association entre l'exposition des mères au
24 téléphone mobile au cours et après la grossesse et la survenue de migraine et de symptômes
25 « reliés aux maux de tête » (céphalées, maux de ventre et autres maladies de l'enfant) chez
26 l'enfant de 7 ans. Les données sont issues de la *Danish National Birth Cohort* qui a inclus 91 661
27 mères au Danemark entre 1997 et 1999. Lorsque les enfants ont atteint l'âge de 7 ans, les mères
28 ont complété elles-mêmes, *via* internet, ou à défaut par courrier, un questionnaire évaluant la
29 santé de leur enfant, leur comportement et les expositions environnementales auxquelles ils sont
30 soumis. L'association entre les migraines et les maux de têtes des enfants et une exposition
31 prénatale seule, postnatale seule et pré- et post- natale a été étudiée. Au total, des données pour
32 52 680 enfants ont été récoltées.

33 L'étude révèle que les enfants qui ont été exposés de façon pré- et post- natale au téléphone
34 mobile ont plus de migraines (OR = 1,30 ; IC 95 % [1,01 - 1,68]) et de symptômes « reliés aux
35 maux de tête » (OR = 1,32 ; IC 95 % [1,23 - 1,40]) que ceux qui n'ont pas été exposés.
36 L'exposition prénatale seule et postnatale seule est également associée à la survenue de
37 symptômes « reliés aux maux de tête » (OR = 1,16 IC 95 % [1,08 – 1,23] et OR = 1,28 IC 95 %
38 [1,19 – 1,37], respectivement).

39 L'interprétation des résultats est difficile en raison d'une évaluation imprécise de l'exposition et
40 d'une estimation de l'effet étudié (maux de tête) par la mère. L'exposition a été évaluée 7 ans
41 après, avec un risque de biais de mémorisation. Cependant, l'évaluation de l'exposition était assez
42 simple pour éviter les erreurs (est-ce que l'enfant utilise le téléphone mobile plus ou moins qu'une
43 heure par semaine ou pas du tout), le but n'étant pas d'avoir des données précises, mais justes.

44 Les auteurs reconnaissent également que l'exposition du fœtus aux radiofréquences pendant la
45 grossesse est certainement faible, d'après des études de modélisation sur des fantômes
46 numériques (Dimbylow *et al.* 2009), et que les enfants n'utilisent vraisemblablement pas de
47 téléphone mobile avant l'âge de 7 ans. L'association mise en évidence est donc peut-être liée à
48 d'autres facteurs sous-jacents plutôt qu'aux radiofréquences.

49 Ils évoquent également la possibilité d'un biais de sélection lors de l'étude. Une étude sur cette
50 cohorte a mis en évidence que les mères « perdues de vue » ont un statut socioéconomique plus

1 bas. Or, l'utilisation du téléphone mobile parmi les enfants et les adolescents est plus élevée dans
2 les catégories socioprofessionnelles inférieures. Par conséquent, il est possible que les enfants les
3 plus gros utilisateurs de téléphone mobile soient sous-représentés dans cette étude.

4 En Nouvelle-Zélande, Redmayne *et al.* (2013b) ont réalisé une étude transversale pour étudier le
5 lien entre l'utilisation de téléphone mobile ou sans fil, l'usage d'internet et le bien-être des enfants
6 et des adolescents. Les participants ont complété des questionnaires à l'école sur l'utilisation de
7 téléphone mobile ou sans fil et leur bien-être. Un questionnaire rempli par les parents a fourni des
8 données sur l'accès au Wi-Fi dans le foyer, la possession de son propre téléphone mobile par
9 l'enfant et le modèle du téléphone.

10 Les auteurs rapportent que le tiers des adolescents qui possèdent un téléphone mobile le gardent
11 près de leur lit la nuit ; un tiers d'entre eux disent être réveillés au moins une fois dans la semaine
12 par un appel. Le nombre et la durée des appels avec un téléphone mobile ou sans fil est associé
13 avec une augmentation du risque de maux de tête ($OR_{>6 \text{ appels de plus de 10 min par jour avec un téléphone}}$
14 $mobile = 2,4$; IC 95 % = [1,2 - 4,2], $OR_{>15 \text{ min avec un téléphone sans fil par jour}} = 1,74$; IC 95 % = [1,1 - 2,9].
15 L'utilisation d'un kit main libre était associé avec des acouphènes ($OR = 1,8$; IC 95 % = [1,0 - 3,3],
16 alors que l'utilisation d'un kit sans fil (type *bluetooth*) était associé avec des maux de têtes
17 $OR = 2,2$; IC 95 % = [1,1 - 4,5], la sensation d'être déprimé ($OR = 2,0$; IC 95 % = [1,1 - 3,8]) et le
18 fait d'être réveillé la nuit ($OR = 2,4$; IC 95 % = [1,2 - 4,8]). Certaines bandes de fréquences de
19 téléphone sans fil sont associés avec la présence d'acouphène, la sensation d'être déprimé, et la
20 somnolence à l'école. Le fait d'être réveillé la nuit par le téléphone a été fortement associé avec la
21 somnolence à l'école ($OR = 3,49$; IC 95 % = [1,97 - 6,2]). Dans la mesure où il s'agit simplement
22 d'une étude descriptive, cette étude ne peut servir dans l'analyse du lien causal (non prise en
23 compte des facteurs confondants).

24

25 Par ailleurs, le groupe de travail « Radiofréquences et santé », à l'occasion de son travail sur la
26 mise à jour des connaissances concernant les effets sanitaires des radiofréquences publié le 15
27 octobre 2013, avaient identifiés 2 études qui n'ont pas été retenues en raison de leurs limites
28 méthodologiques majeures :

29 Mortazavi *et al.* (2011) ont comparé chez 469 enfants de Shiraz (Iran) fréquentant l'école
30 élémentaire ($n = 250$) ou le premier cycle du second degré ($n = 219$), l'exposition à diverses
31 sources de champs électromagnétiques (fréquence et durée des communications téléphoniques)
32 et divers symptômes (céphalées, vertiges et troubles du sommeil). Les expositions et les
33 symptômes étaient auto-déclarés. La prévalence d'utilisation du téléphone dans cet échantillon
34 était faible (31 %). Cependant, les tests statistiques utilisés dans cette étude ne sont pas suffisants
35 et aucun ajustement n'a été réalisé.

36

1
2
Tableau 23 : Études investiguant les effets sur le bien-être chez l'Homme. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	Population	Publications	Effets étudiés	Nombre de sujets	Outils utilisés	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
Étude de cohorte prospective	Exposition auto-déclarée au téléphone mobile + fréquence d'usage après coucher Période de réception des SMS	Enfants d'âge moyen 13,7 ans Adolescents d'âge moyen 16,9 ans	Van der Bulck, 2007	Fatigue	1656 enfants	Questionnaire de 4 questions aboutissant à une échelle de 11 points allant de -5 (pas fatigué du tout) à +5 (très fatigué)	Seulement 38% des enfants n'utilisent pas leur téléphone après le coucher <ul style="list-style-type: none"> • Association entre le fait d'être fatigué et l'usage après le coucher <ul style="list-style-type: none"> ○ moins d'1 fois/mois OR= 1,8 [1,2-2,8] ○ moins d'1 fois/semaine OR= 2,2 [1,4-3,5] ○ Environ une fois par semaine OR= 3,3 [1,9-5,7] ○ Plus d'une fois par semaine OR= 5,1 [2,4-10,4] • Association entre le fait d'être très fatigué et l'usage du téléphone mobile : <ul style="list-style-type: none"> ○ Juste après le coucher : OR = 2,2 [1,4-3,4] ○ Entre minuit et 3 h : OR = 3,9 [2,1-7,1] ○ Quelle que soit l'heure de la nuit : OR = 3,3 [1,8-6,0]
Étude transversale <i>German MobilEe-study</i>	Exposition au téléphone mobile par une double approche : Mesures des RF pendant 24h avec dosimètre individuel Exposition auto-déclarée : utilisation quotidienne du téléphone mobile ou du sans fil et estimation de la distance de l'habitation à une station de base	Enfants de 8 à 12 ans Adolescents de 13 à 17 ans	Kühnlein <i>et al.</i> , 2009	Symptômes chroniques aspécifiques sur les 6 derniers mois : maux de tête, irritabilité, nervosité, étourdissements, fatigue, anxiété et troubles du sommeil.	1 433 enfants	Outils de calcul de l'exposition (trois modes différents d'analyse de l'exposition mesurée)	Aucune association retrouvée entre exposition mesurée par le dosimètre et calculée selon trois méthodes différentes et les différents symptômes chroniques, quel que soit le mode de calcul des expositions
			Heinrich <i>et al.</i> , 2011 (réanalyse de l'étude précédente)		1 484 enfants	Questionnaire HBSC (Health Behaviour in school-aged children) Échelle de Likert en 6 points (pratiquement tous les jours, plusieurs fois par semaine, environ 1 fois par semaine, environ 1 fois par mois, quelquefois, jamais)	Aucune relation établie avec les niveaux d'exposition RF mesurés par dosimètres personnels et les différents symptômes non spécifiques étudiés, sauf pour le 3ème quartile d'exposition pour lequel une diminution du risque de troubles du sommeil est observée chez les enfants (OR = 0,63 [0,41-0,96]). Association chez les enfants entre troubles du sommeil et exposition déclarée [OR = 1,91 [1.04-3.50] (pas d'agrément entre les deux types de mesure)
			1 508 adolescents		Aucune relation établie avec les niveaux d'exposition RF mesurés par dosimètres personnels et les différents symptômes non spécifiques étudiés Association chez les adolescents entre irritabilité et exposition déclarée [OR = 1,48 [1,13-1,64] (pas d'agrément entre les deux types de mesure)		

Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	Population	Publications	Effets étudiés	Nombre de sujets	Outils utilisés	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
Étude transversale <i>German MobilEe-study</i>	Exposition au téléphone mobile par une double approche : Mesures des RF pendant 24h avec dosimètre individuel Exposition auto-déclarée : utilisation quotidienne du téléphone mobile ou du sans fil et estimation de la distance de l'habitation à une station de base	Enfants de 8 à 12 ans Adolescents de 13 à 17 ans	Heinrich <i>et al.</i> , 2010	Symptômes aigus aspécifiques : maux de tête, irritabilité, nervosité, étourdissements, fatigue, anxiété et troubles du sommeil.	1 484 enfants	Questionnaire HBSC (Health Behavior in School aged children) Évalués à 2 reprises au cours de la journée étudiée (midi, et avant le coucher)	À midi : • Céphalées ○ augmentées si exposition auto-rapportée, ○ pas de relation si exposition mesurée • Pas d'autre effet observé Le soir • troubles de la concentration ○ 4 ^{ème} quartile d'exposition mesurée : OR = 1,55 [1,02 – 2,33]. ○ Estimation de même niveau mais non significative si exposition auto-rapportée OR=1.44 [0.66-3.16] • Pas d'autre effet observé
					1 508 adolescents	Échelle de Lickert en 4 points (important, modéré, léger, pas du tout)	À midi : • Céphalées augmentées quelle que soit le mode d'exposition 4ème quartile d'exposition mesurée : OR =1.50 1.03-2.19 • Irritabilité OR si plus de 5 mn = 1,64 [1.10-2.44] ; si expo mesurée OR _{Q4} = 1,44 [0,97 - 2,15] • Fatigue OR si plus de 5 mn = 1.76 [1.22-2.56] Le soir • Irritabilité : OR _{Q4} = 1,79 [1,23 – 2,61]. • Vertiges : augmentation avec l'exposition (mais non significatif) Pas d'autre effet observé
Étude de cohorte rétrospective de la <i>Danish National Birth Cohort</i>	Exposition par auto-questionnaire à la mère (lors de l'examen à six ans de l'enfant) sur l'exposition pré et postnatale de l'enfant	Enfants nés entre 1997 et 1999 bilan à l'âge de 7 ans	Sudan <i>et al.</i> 2012	Migraines Symptômes « reliés aux maux de tête » (céphalées, maux d'estomac et maladie)	52 680 enfants		Association entre exposition pré- et post- natale au téléphone mobile et • migraine (OR=1,30 [1,01-1,68]) • symptômes « reliés aux maux de tête » (OR=1,32 [1,23-1,40]) Association entre exposition prénatale seule et • symptômes « reliés aux maux de tête » (OR=1,16 [1,08-1,23]) Association entre exposition prénatale seule et symptômes « reliés aux maux de tête » (OR=1,28 [1,19-1,37])
Étude transversale	Exposition au téléphone mobile Évaluation auto déclarée par questionnaire	Enfants de 10 à 13 ans	Redmayne <i>et al.</i> , 2013b	Bien-être : maux de tête, baisse de moral/dépression, insomnie, réveil pendant la nuit, acouphène, mal au pouce, fatigue	373 participants	Questionnaire de l'étude MoRPhEUS sur le sommeil	Association entre le nombre et la durée des appels téléphonique avec un téléphone mobile ou un DECT et l'apparition de maux de tête. Association entre l'utilisation d'un kit main libre filaire et acouphènes, Association entre l'utilisation de kit main libre sans fil et maux de tête, sensation d'être déprimé, et être réveillé la nuit. Association entre certaines bandes de fréquences de téléphone sans

Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	Population	Publications	Effets étudiés	Nombre de sujets	Outils utilisés	Résultats <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
				à l'école			fil et acouphène, sensation d'être déprimé et somnolence à l'école.

DOCUMENT EN CONSULTATION

1 **5.4.1 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le**
2 **bien-être.**

3 Il n'existe pas de données sur les enfants de moins de 6 ans.

4 Les études investiguant les conséquences d'une exposition chronique aux radiofréquences sur le
5 bien-être des enfants et des adolescents ne montrent pas d'association (Kühnlein *et al.*, 2009 ;
6 Heinrich *et al.*, 2011).

7 Concernant les effets aigus, seule la *German MobilEe-study* recherche les effets d'une exposition
8 aux radiofréquences, les autres études n'explorant que l'usage du téléphone mobile sans étudier
9 la relation effet/dose. En fonction de la méthode d'évaluation de l'exposition (mesurée ou auto-
10 rapportée), les résultats ne sont pas cohérents.

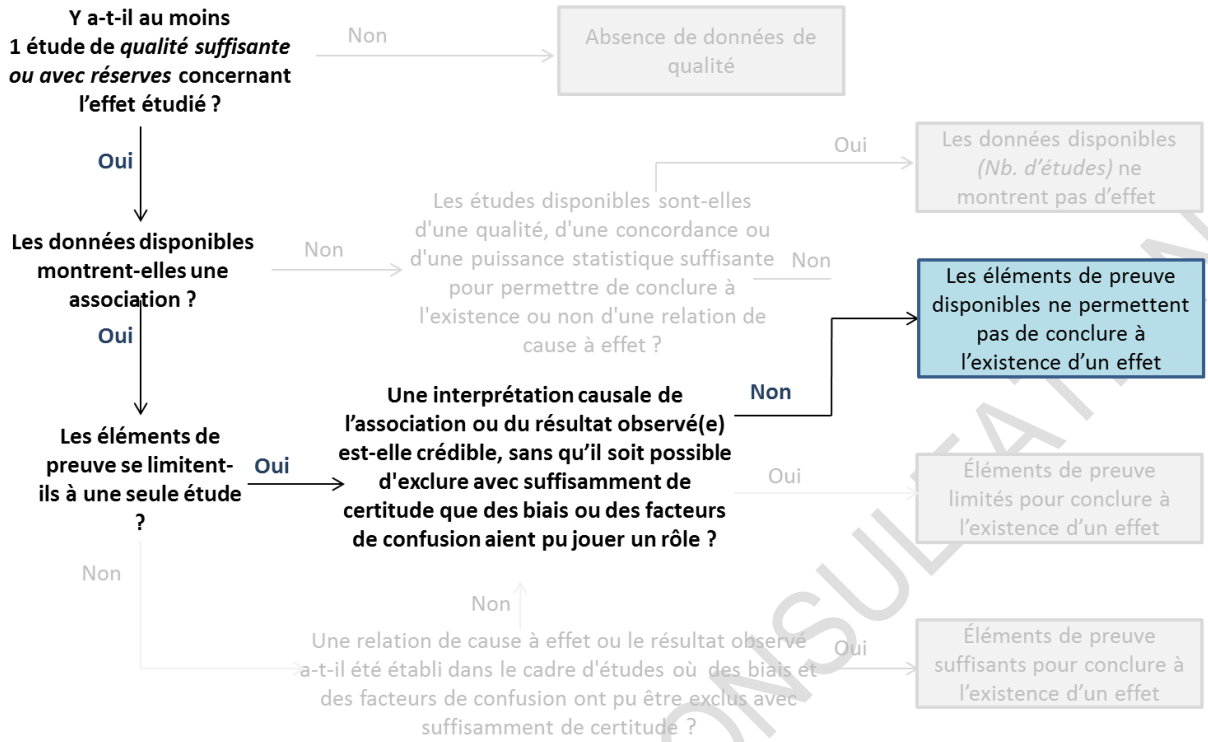
11 Les éléments de preuves disponibles à ce jour **ne permettent donc pas de conclure à un effet**
12 **des radiofréquences** sur le bien-être (Figure 42). D'autres études, présentant une mesure de
13 l'exposition aux radiofréquences, sont nécessaires pour confirmer ces résultats.

14 Chez l'animal, les données sont **inexistantes** (Figure 43).

15 En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à un effet des**
16 **radiofréquences sur le bien-être** des enfants (Figure 44).

17 En revanche, toutes les études (Van den Bulck, 2007 ; Kühnlein *et al.*, 2009 ; Heinrich *et al.*, 2010,
18 2011 ; Redmayne *et al.*, 2013) s'accordent sur une relation possible chez les adolescents entre
19 **l'utilisation de téléphone mobile** et des symptômes aspécifiques d'altération du bien-être, tels
20 que les céphalées et les symptômes d'irritabilité, tant en exposition aiguë qu'en exposition
21 chronique. Au vu de ces éléments, une association entre l'usage du téléphone mobile et l'altération
22 du bien-être chez les adolescents pourrait exister et mérite d'être approfondie. Il serait nécessaire
23 d'étudier le lien entre l'usage du téléphone mobile et les perturbations du sommeil, la fatigue...

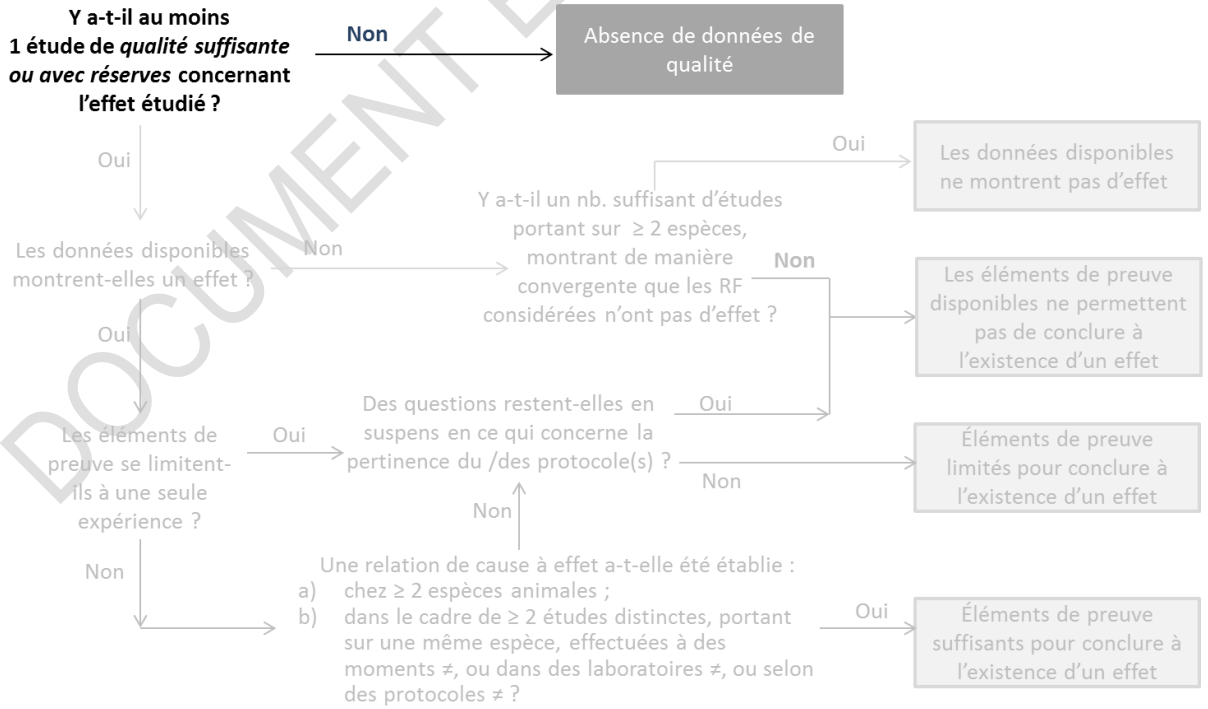
Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve



1
2
3

Figure 42 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au bien-être dans les études épidémiologiques

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve



4
5

Figure 43 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au bien-être dans les études sur les modèles animaux

1

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'enfant				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'enfant	Effet possible pour l'enfant			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'enfant	Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			
	Absence de données de qualité					
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'enfant

Figure 44 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le bien-être chez l'enfant

2

3

4

5.5 Études sur la santé mentale

6 Les études analysées dans ce paragraphe portent sur la notion « d'usage problématique du
7 téléphone mobile » et non sur les radiofréquences qu'ils émettent. De plus, elles concernent les
8 adolescents ou préadolescents. Bien qu'elles ne fassent pas directement partie du cadre de la
9 saisine, ces études ont paru importantes au collectif d'experts mobilisé pour cette expertise, qui a
10 décidé de les mentionner.

11 Depuis quelques années, plusieurs études réalisées dans divers pays, notamment asiatiques, se
12 sont intéressées aux relations entre l'usage problématique du téléphone mobile par les
13 adolescents (par exemple après leur coucher) et les troubles de la santé mentale. La principale
14 hypothèse investiguée est que l'usage du téléphone mobile après le coucher réduit la durée du
15 sommeil des adolescents ; or, plusieurs études ont montré la relation entre une durée du sommeil
16 raccourcie et les idées suicidaires.

17 La notion « d'usage problématique » a été proposée dans une étude précédente (Bianchi &
18 Phillips 2005). Ces derniers auteurs ont développé un questionnaire spécifique utilisé dans l'étude
19 de Yen, le questionnaire PCPU-Q (*Problematic Cellular Phone Use Questionnaire*) comprenant 12
20 items. Les 7 premières questions demandent aux participants s'ils ont eu des symptômes d'usage
21 problématique du téléphone mobile dans l'année passée, et les 5 questions suivantes investiguent
22 les conséquences de l'usage problématique du téléphone sur 5 exemples de la vie courante.

23 Une étude menée à Taiwan a analysé la relation entre l'usage problématique du téléphone mobile
24 et la dépression de l'adolescent (Yen *et al.* 2009). Il s'agit d'une étude transversale de grande
25 ampleur, réalisée dans les écoles accueillant des préadolescents et adolescents (2 sexes, entre 12
26 et 19 ans, moyenne d'âge 14,6 ans) ; les écoles ont été tirées au sort. De plus, cette étude est
27 inscrite dans un programme de suivi des adolescents réalisé tous les trois ans. Dix mille cent
28 quatre-vingt-onze adolescents ont participé sur la base du volontariat et de façon anonyme à

1 l'enquête et ont rempli un auto-questionnaire contenant entre autres le questionnaire sur l'usage
2 problématique du téléphone mobile et l'échelle CES-D (*Center for Epidemiologic Studies -*
3 *Depression Scale*) validée en chinois mandarin, permettant de mesurer la dépression. Les
4 analyses ont fait l'objet d'ajustements sur l'âge, le sexe et la zone d'habitat. Seize pourcents des
5 participants rapportent avoir au moins un symptôme d'impact sur leur fonctionnement social (le
6 symptôme le plus fréquent étant le fait d'avoir de mauvaises relations avec ses amis ou
7 camarades de classe en lien avec l'usage problématique du téléphone mobile). Le fait d'être
8 dépressif (Score CES-D > 28) est lié à l'usage problématique du téléphone mobile (OR = 2,57 IC
9 95% = [2,25 - 2,94]), après ajustement (les filles étant significativement plus concernées par un
10 usage problématique du téléphone mobile). Les forces de cette étude sont la puissance statistique
11 et la représentativité de la population sélectionnée. Elle ne permet cependant pas d'établir un lien
12 de causalité entre l'usage du téléphone mobile de manière inconsiderée et la dépression. La prise
13 en compte de facteurs de confusion tels que des facteurs familiaux ou l'usage de substance illicite
14 aurait été informative.

15 Une deuxième étude portant sur cette même population (11 111 sujets inclus dans l'étude) a
16 analysé la relation entre le fait d'avoir un usage du téléphone mobile qualifié de problématique et
17 divers facteurs comportementaux de prise de risque (Yang *et al.* 2010). Chez les préadolescentes
18 (moins de 15 ans), l'usage problématique du téléphone mobile est associé au fait d'avoir agressé
19 ou avoir été victime d'agression, au fait de porter des tatouages, d'être insomniaque, d'avoir une
20 durée du sommeil courte, d'avoir une mauvaise opinion de soi, de fumer du tabac, de consommer
21 de l'alcool ou des drogues illicites, d'avoir des idées suicidaires et une activité sexuelle non
22 protégée. Chez les préadolescents, les mêmes prises de risque sont observées, à l'exception de la
23 prise de drogue illicite ou d'acte sexuel non protégé ; par contre, l'usage du téléphone mobile
24 problématique est associé à un antécédent de casier judiciaire. Chez les adolescentes de plus de
25 15 ans, l'usage problématique du téléphone mobile est associé à des facteurs de risque moins
26 nombreux (perpétration d'agression ou victime d'agression, insomnies, faible estime de soi, usage
27 de tabac, tendances suicidaires, activité sexuelle non protégée) ; chez les adolescents de plus de
28 15 ans, tous les facteurs à risque sont associés avec le fait d'avoir un usage problématique du
29 téléphone mobile. Les auteurs de cette étude de grande ampleur attirent l'attention sur le fait qu'un
30 usage problématique du téléphone mobile (plus facile à repérer) pourrait être un bon indicateur de
31 l'existence d'autres comportements à risque, ce qui avait déjà été signalé précédemment chez les
32 adultes par Bianchi et Philips (2005).

33 Entre 2008 et 2009, Oshima *et al.* ont mené une enquête transversale au Japon auprès de
34 9 400 adolescents (âge moyen : 16,6 ans) et 8 520 préadolescents (moyenne d'âge : 13,7 ans)
35 (Oshima *et al.* 2012). Les auto-questionnaires ont été distribués dans des écoles par le biais des
36 professeurs, et comprenaient des questions de santé mentale (GHQ12 (*General Health*
37 *Questionary*), idées suicidaires, tentatives de suicide antérieures...), et sur les habitudes (heures
38 de coucher et lever, usage du téléphone mobile, en particulier fréquence des usages après le
39 coucher, usage de drogue et d'alcool). Les questionnaires étaient remplis lors du temps scolaire et
40 remis au professeur dans une enveloppe fermée. Il était précisé au préalable que la participation
41 au questionnaire était basée sur le volontariat et qu'en aucun cas les professeurs ne prenaient
42 connaissance des réponses, les enveloppes anonymes étant immédiatement remises à l'équipe
43 de recherche, interdisant ainsi tout retour d'information. Les tentatives et idées suicidaires étaient
44 codées par deux évaluateurs indépendants avec arbitrage en cas de désaccord. L'agrément de la
45 codification entre les deux évaluateurs a été jugé bon (Kappa : 0,83).

46 Chez les préadolescents, 7,6 % des garçons et 13,1 % des filles avaient des idées suicidaires
47 (respectivement 1,1 % et 5,6 % avaient déjà fait une tentative de suicide), 9 % des garçons et
48 19 % des filles disaient utiliser quotidiennement leur téléphone au cours de la nuit. La durée
49 moyenne du sommeil était de 7,4 heures.

50 Chez les adolescents, 10,7 % des garçons et 15,5 % des filles avaient des idées suicidaires, la
51 durée moyenne de sommeil étant de 6,7 h (23 % des garçons et 37 % des filles disant utiliser

1 quotidiennement leur téléphone en cours de nuit). Après ajustement sur l'âge, le sexe, l'usage de
2 drogue ou d'alcool et la durée du sommeil, il existe une relation significative entre l'usage nocturne
3 quotidien du téléphone mobile et les indicateurs de mauvaise santé mentale dans les deux
4 groupes :

5 • Préadolescents :

- 6 – OR_{santé mentale altérée si usage de téléphone mobile la nuit} : 1,65 [1,43 - 1,92]
7 – OR_{idées suicidaires si usage de téléphone mobile la nuit} : 1,62 [1,31 -1,99]
8 – OR_{tentatives de suicide antérieure si usage de téléphone mobile la nuit} : 1,56 [1,12 - 2,17]

9 • Adolescents :

- 10 – OR_{santé mentale altérée si usage de téléphone mobile la nuit} : 1,54 [1,38 - 1,72]
11 – OR_{idées suicidaires si usage de téléphone mobile la nuit} : 1,22 [1,04 - 1,42]
12 – OR_{tentative de suicide antérieure si usage de téléphone mobile la nuit} : 1,75 [1,33 - 2,29]

13 La durée du sommeil dans cette étude n'est pas liée à la dégradation de la santé mentale.

14 Comme le reconnaissent les auteurs de cette étude, il s'agit d'une étude transversale qui ne
15 permet pas d'explorer les liens de causalité, en particulier en ce qui concerne les tentatives de
16 suicide antérieures et l'usage du téléphone mobile. Cependant, cette étude doit attirer l'attention
17 des parents et médecins sur l'usage du téléphone mobile la nuit, qui pourrait être un indicateur de
18 souffrance mentale chez les adolescents et préadolescents.

1
2
3
4

Tableau 24 : Études épidémiologiques descriptives transversales sur la relation entre l'usage « problématique » du téléphone mobile et la santé mentale chez les enfants ou adolescents. *Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses*

Étude	Population	Effets étudiés	Caractérisation de l'exposition	Nombre de sujets	Résultats <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Yen <i>et al.</i> , 2009	Adolescents entre 12 et 19 ans, (en moyenne 14,6 ans) Taiwan	Dépression	Questionnaire construit et validé pour l'étude d'usage problématique du téléphone	10 191 adolescents et préadolescents	Association entre dépression et usage problématique du téléphone mobile (OR =2 ,57 [2,25-2,94]). Cette étude transversale ne permet pas d'explorer la causalité des associations.
Yang <i>et al.</i> , 2010	Adolescents (16,6 ans en moyenne) et préadolescents (13,7 ans en moyenne) Taiwan	Comportements à risque et faible estime de soi	Questionnaire construit et validé dans l'étude du Yen <i>et al.</i> (2009) pour l'étude d'usage problématique du téléphone	11 111 adolescents et préadolescents	Associations significatives entre usage problématique du téléphone mobile et agression, insomnie, tabagisme, tendances suicidaires et faible estime de soi dans tous les groupes d'âge, quel que soit le sexe. En fonction de l'âge et du sexe, associations significatives entre usage problématique du téléphone mobile et exclusion de l'école, délits mineurs, tatouages, faible durée de sommeil, rapports sexuels non protégés, usage de drogues, alcoolisme et consommation de noix d'arec. Cette étude transversale ne permet pas d'explorer la causalité des associations.
Oshima <i>et al.</i> , 2012	Adolescents (plus de 15 ans) et préadolescents (12-15 ans) Japon	Santé mentale altérée Idées suicidaires Tentative de suicide antérieure	Fréquence de l'usage du téléphone mobile la nuit après le coucher	9 400 adolescents et 8 520 préadolescents	Dans les deux groupes, association significative entre l'usage quotidien du téléphone mobile la nuit, et altération de la santé mentale, la présence d'idées suicidaires et antécédents de tentatives de suicide. Cette étude transversale ne permet pas d'explorer la causalité des associations.

1 **5.5.1 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur la**
 2 **santé mentale**

3 Chez l'enfant, les données étudiant l'association entre l'exposition aux radiofréquences et les
 4 troubles de la santé mentale sont **inexistantes** (Figure 45).

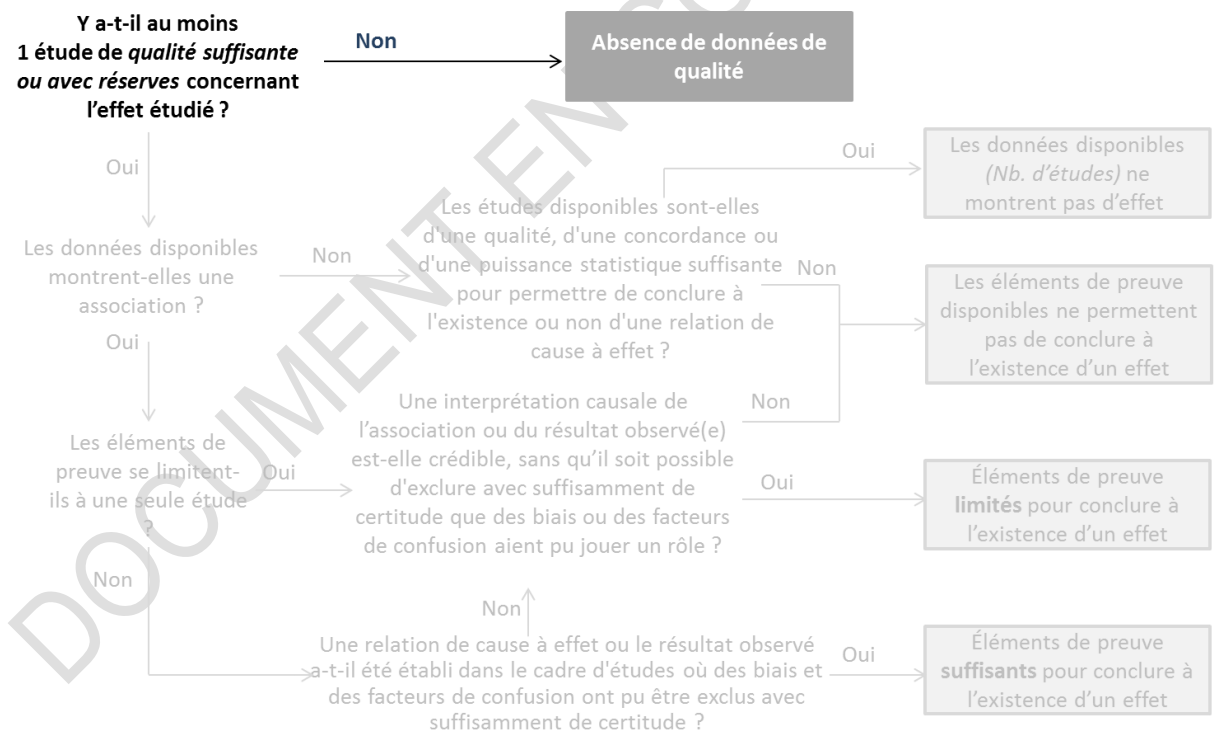
5 Chez l'animal, les données sont **inexistantes** (Figure 46).

6 En conclusion, les **données disponibles ne permettent pas de conclure sur un effet des**
 7 **radiofréquences sur la santé mentale et les idées suicidaires** chez l'enfant (Figure 47).

8 En revanche, 3 études de taille importante concernant des adolescents investiguent les
 9 conséquences de « l'usage problématique du téléphone » et non les radiofréquences qu'il émet.
 10 Elles montrent une association entre un usage intensif et inadéquat du téléphone par des
 11 adolescents ou des préadolescents et une santé mentale affectée. Cependant, l'usage du
 12 téléphone peut n'être qu'un indicateur de risque de troubles mentaux et non une cause. Il s'agit
 13 d'études transversales qui ne permettent pas d'explorer la causalité des associations. Des études
 14 longitudinales pourraient permettre de prendre en compte la temporalité des associations ainsi que
 15 d'autres facteurs de risques, notamment familiaux ou d'organisation sociale qui pourraient être les
 16 éléments pathogènes.

17

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve



18 Figure 45 : Évaluation des éléments de preuve relatifs à la santé mentale dans les études épidémiologiques
 19
 20

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve

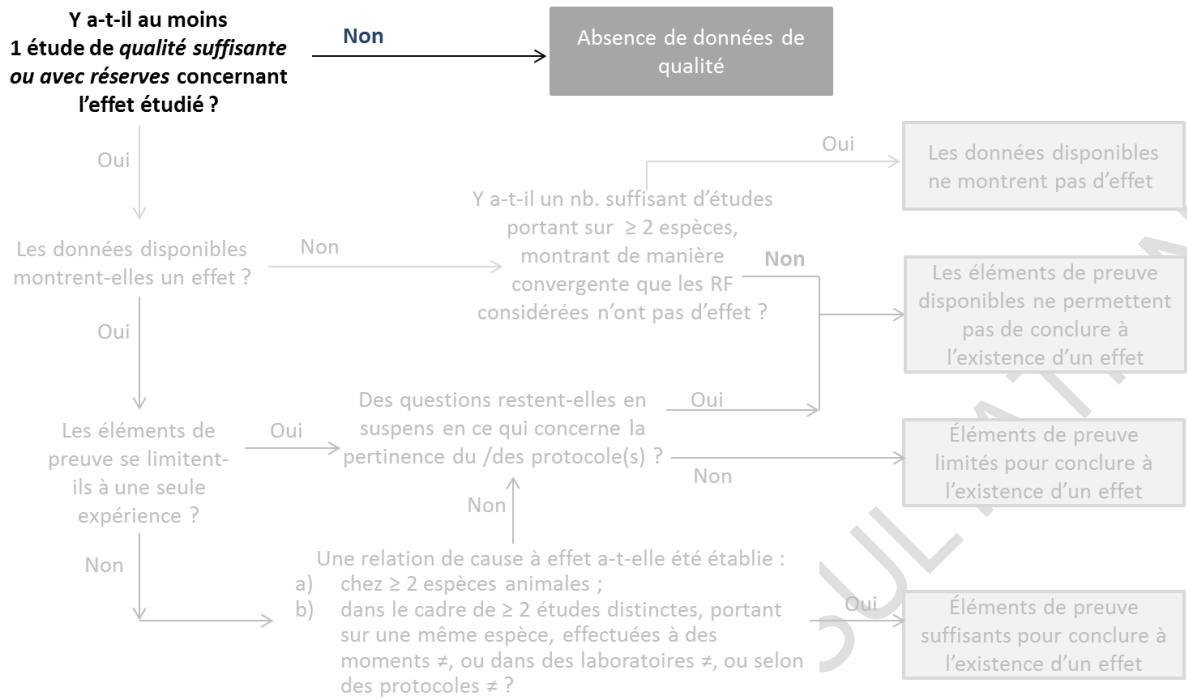


Figure 46 : Évaluation des éléments de preuve relatifs à la santé mentale dans les études sur les modèles animaux

1
2
3
4

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'enfant				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'enfant	Effet possible pour l'enfant			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'enfant	Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			
	Absence de données de qualité		Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			
		Les données disponibles ne montrent pas d'effet	Probablement pas d'effet chez l'enfant			

Figure 47 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur la santé mentale chez l'enfant

5
6
7

5.6 Études sur la reproduction et le développement

5.6.1 Chez l'Homme

Il n'existe pas d'études de qualité suffisante chez l'enfant sur la reproduction ou le développement.

5.6.2 Chez l'animal

5.6.2.1 Exposition *in utero*

Lee *et al.* (2009) ont exposé des souris en gestation (GD 1 – GD 17) à deux types de signaux radiofréquences (CDMA et W-CDMA) à raison de 2 séquences de 45 min par jour espacées d'un intervalle de 15 min par jour pendant 18 jours. Le DAS a été évalué à 2 W/kg. Les animaux ont été séparés en 4 groupes (n = 4 ou 5) : exposition factice CDMA, exposition réelle CDMA seul, exposition factice CDMA + W-CDMA et exposition réelle CDMA + WCDMA. Les animaux ont été sacrifiés au 18^{ème} jour de gestation. Aucune mortalité maternelle n'a été constatée avant le sacrifice. Les fœtus issus de mères exposées ne présentaient pas de différence d'implantation et de mortalité comparativement au groupe témoin. Le nombre de fœtus atteints de retard de croissance était légèrement augmenté dans le groupe exposé aux radiofréquences CDMA, sans que l'augmentation soit statistiquement significative. La taille du corps, le poids et les dimensions de la tête n'étaient pas différentes dans les 4 groupes. Les conditions d'exposition et la métrologie décrites sont satisfaisantes.

Ogawa *et al.* (2009) ont exposé des rats *in utero* (GD 7 à GD 17) 90 min par jour à un signal W-CDMA (1,95 GHz, DAS de 0,67 W/kg ou de 2 W/kg) dans une chambre d'exposition comportant une antenne centrale. Les rats ont été répartis en 4 groupes (n = 5) : groupe contrôle cage, groupe exposition factice, exposition faible (DAS de 0,67 W/kg) et exposition élevée (DAS de 2 W/kg). Quatre expérimentations ont été effectuées par condition (donc 20 rates par groupe). Les rates ont été sacrifiées à 20 jours de gestation. Chez les mères, aucune différence de croissance entre les 4 groupes n'a été retrouvée, 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 fœtus vivants, le *sex-ratio*, les poids fœtaux, le poids placentaire, le taux d'anomalies externes et le taux d'anomalies viscérales et squelettiques n'a été mise en évidence (Ogawa *et al.*, 2009).

Poullétier de Gannes *et al.* (2012) ont exposé des rates en gestation à un signal Wi-Fi de 2 450 MHz, 2 h par jour, 6 jours par semaine pendant 18 jours (GD 2 – GD 20), à 3 niveaux différents de DAS (0,08, 0,4 ou 4 W/kg). L'exposition est contrôlée et le protocole est bien décrit. L'étude globale a porté sur 100 animaux, répartis en 5 groupes (témoin-cage, exposition factice et 3 groupes exposés). Dans chaque groupe, 5 femelles ont été sacrifiées à GD 20 et le contenu de l'utérus examiné. Pour les autres, la délivrance s'est faite naturellement à GD 21 et les femelles et nouveau-nés ont été examinés 2 jours après leur naissance (examen clinique, poids, taille de la portée). Aucune différence significative sur la reproduction et sur le développement des nouveau-nés n'a été observée entre les différents groupes. Seule une augmentation significative de la consommation de nourriture pendant la lactation chez les mères exposées à 0,4 W/kg a été relevée, sans conséquence pour le développement néonatal (Poullétier de Gannes, *et al.*, 2012). Selon les auteurs, ces résultats sont en accord avec des études précédentes montrant une absence d'effet des radiofréquences sur la gestation et le développement postnatal (Heynick & Merritt 2003, Juutilainen 2005, Pourlis 2009).

5.6.2.2 Exposition prénatale, postnatale ou combinée pré- et post- natale

Cobb *et al* (2000) ont exposé des rats *in utero* (GD 3 à la naissance) ou de façon pré- et post-natale (GD 3 à PND 10) à un champ électromagnétique de type UWB (DAS évalué à 45 mW/kg).

1 Trois groupes ont été réalisés : un groupe exposé, un groupe contrôle négatif et un groupe
2 contrôle positif auquel une solution de plomb a été administrée dans l'eau de boisson (voir § 1.2.1,
3 1.2.4 et 1.3 pour autres résultats de l'étude). Les nouveau-nés F1 qui ont été exposés de façon
4 prénatale ont été examinés quotidiennement (taille de la portée, *sex-ratio*, poids, date d'apparition
5 du pelage, des dents, de l'ouverture des yeux, et réflexe de redressement). Les auteurs montrent
6 que les mâles exposés *in utero* s'accouplent moins fréquemment que les animaux du groupe
7 témoin, mais aucune différence n'a été constatée sur leur fertilité et sur le nombre de petits à la
8 naissance par rapport au groupe témoin. Aucun effet sur le développement postnatal de la
9 génération F2 n'a été observé. Aucune différence entre les groupes exposés et non exposés n'a
10 été observée.

11 L'étude de Sommer *et al.*, (2009) a porté sur l'exposition chronique (24 h / 24 h ; vie entière) de
12 souris C57BL à un signal UMTS (1 966 MHz, DAS de 0 ; 0,08 ; 0,4 et 1,3 W/kg) sur 4 générations
13 grâce à 8 guides d'ondes localisés dans une même pièce. Un rat mâle (128 au total à la 1^{ère}
14 génération) et 2 femelles (256 au total) ont été placés dans une même cage. Dix-huit jours après
15 accouplement, une des 2 femelles est euthanasiée et les foetus sont comptés, pesés et les
16 malformations sont recherchées. Chez la femelle, le nombre de corps jaunes résiduels et le poids
17 de l'utérus sont évalués. Les petits de la deuxième femelle sont utilisés pour l'analyse de la 2^{ème}
18 génération. Après reproduction, les animaux parents sont sacrifiés et les organes reproducteurs
19 sont pesés et inspectés (analyse histologique). Les petits sont pesés à intervalles réguliers et le
20 taux de survie est calculé. Cette expérience est répétée jusqu'à la 4^{ème} génération (foetus des
21 animaux F3). Toute l'expérimentation est effectuée en aveugle. Les résultats mettent en évidence
22 une tendance à une moindre consommation de nourriture chez les exposés, mais sans différence
23 dans la consommation d'eau. Aucun effet sur les paramètres de la fertilité chez les mâles ni chez
24 les femelles n'a été rapporté. Concernant le développement et le comportement des souriceaux,
25 aucune différence dans le poids, ni dans la date d'ouverture des yeux, ni dans le test de réflexe, ni
26 dans le taux de survie pendant la période de sevrage n'a été notée entre les 2 groupes de souris.
27 Les auteurs concluent à une absence d'effet des ondes UMTS sur la reproduction et le
28 développement des souris. Dans une étude précédente, ces même auteurs, utilisant un protocole
29 similaire, n'avaient également pas noté d'effet d'une exposition chronique aux radiofréquences
30 (signal UMTS à 1 966 MHz) chez des souris adultes ARK/J sur l'évolution du poids corporel
31 (Sommer *et al.* 2007).

32 Takahashi *et al.* (2010) ont exposé des rats à un signal de type W-CDMA de fréquence 2,14 GHz,
33 20 h / jour, de GD 7 à PND 21. Le DAS a été évalué entre 0,068 et 0,146 W/kg pour l'exposition la
34 plus forte, et entre 0,026 et 0,067 W/kg pour l'exposition la plus faible. Les générations F1 et F2
35 ont été examinées. De nombreux paramètres ont été étudiés (voir § 1.4.2, 1.2.4). Le
36 développement sexuel et la fertilité ont été examinés, ainsi que divers paramètres de gestation de
37 la génération F1 et les caractéristiques des foetus F2. Les résultats ne montrent pas d'effet des
38 radiofréquences sur la fertilité des mâles et des femelles, ni sur l'apparence macroscopique des
39 organes sexuels, ni sur la gestation en général (poids), quel que soit le DAS. L'examen des
40 femelles F1 en gestation montre une diminution du nombre de *corpora lutea* et une augmentation
41 du poids des foetus F2 vivants dans le groupe exposé au DAS faible seulement. Cependant, ces
42 observations ne modifient pas l'issue de la gestation. Malgré ces observations, les auteurs
43 concluent à une absence d'effets délétères de l'exposition sur la génération F1 et F2.

44 Lee *et al.* (2010) ont étudié sur des rats mâles âgés de 30 jours les effets d'une exposition
45 chronique aux radiofréquences (CDMA, 848,5 MHz, DAS = 2 W/kg) sur la fertilité et la
46 spermatogenèse. L'exposition s'est déroulée par tranches de 2 séquences quotidiennes de 45 min
47 séparées de 15 min, 5 jours par semaine pendant 12 semaines. L'exposition est contrôlée,
48 homogène et reproductible et le nombre d'animaux suffisant (n = 20 dans chaque groupe).
49 Pendant l'exposition, aucun effet n'a été noté sur l'évolution du poids corporel, ni sur celui des
50 testicules et de l'épididyme. Les rats ont été euthanasiés à 16 semaines. Un spermogramme est
51 réalisé à la fin de l'exposition, ainsi qu'une mesure de la peroxydation lipidique (quantité de

1 malondialdéhyde) dans les testicules et dans l'épididyme. Une analyse histologique des testicules
2 est effectuée, avec une étude des étapes de la spermatogénèse, et un comptage des cellules
3 germinales. Des paramètres de l'apoptose ont également été investigués (apparition de corps
4 apoptotiques, mesure de l'expression de la protéine p53, bcl-2, caspase-3, p21 et PARP). Aucun
5 effet n'a été observé concernant le spermogramme. Aucune anomalie n'a été détectée sur la
6 morphologie et l'histologie des organes reproducteurs. Les paramètres d'apoptose mesurés dans
7 les testicules et l'épididyme ne montrent pas de différence significative entre les exposés et les
8 témoins.

9 Imai *et al.* (2011) ont exposé des rats mâles de 35 jours (3 groupes de 24 animaux chacun :
10 témoins et 2 niveaux d'exposition) à des radiofréquences de type GSM à 1 950 MHz (5 h par jour
11 pendant 5 semaines, à deux valeurs de DAS différentes, 0,08 et 0,4 W/kg). Au terme de
12 l'expérimentation, le poids du corps et des organes reproducteurs (testicule, épидидyme, vésicule
13 séminale, prostate), le nombre de spermatozoïdes, leur motilité et les anomalies morphologiques
14 ont été examinés. L'étude conclut à une absence d'effets délétères sur le développement du
15 système reproducteur. L'étude a été conduite sur un nombre d'animaux suffisant (n = 24). Au
16 terme de l'expérimentation, le poids du corps et des organes reproducteurs (testicule, épидидyme,
17 vésicule séminale, prostate) n'était pas différent entre les groupes exposés aux radiofréquences et
18 le groupe contrôle. Il est intéressant de noter que le nombre de spermatozoïdes dans le groupe
19 exposé à un DAS de 0,4 W/kg est significativement augmenté par rapport à celui observé dans le
20 groupe contrôle.

21 Ozlem Nisbet *et al.* (2012) ont étudié les effets d'une exposition chronique aux radiofréquences
22 (90 jours, 2 h / j, 7 j / 7 j, GSM 900 ou 1 800 MHz) à partir du 2^{ème} jour post-natal chez des rats
23 mâles Wistar sur la fonction et structure testiculaire. Les rats ont été euthanasiés 24 h après la
24 dernière exposition. Les valeurs de DAS pour l'exposition à 900 MHz sont de 3,0, 2,7, 2,2 et
25 1,2 mW/kg pour 10, 20, 50 et 70 jours alors que pour l'exposition à la fréquence de 1 800 MHz,
26 ces valeurs sont respectivement de 0,053, 0,046, 0,011 et 0,011 mW/kg. Les résultats montrent
27 chez les rats de 92 jours (13 semaines), une augmentation significative des concentrations
28 circulantes de testostérone dans les 2 groupes exposés aux radiofréquences (+ 4,5 et + 4,9 %).
29 De plus, à une fréquence d'exposition de 1 800 MHz, les rats exposés présentent une
30 augmentation de la motilité des spermatozoïdes, sans atteinte de leur concentration, avec une
31 augmentation du pourcentage d'anomalies histologiques de l'épithélium séminifère. En revanche,
32 à 900 MHz, les taux de spermatozoïdes morphologiquement normaux étaient plus élevés, avec un
33 pourcentage d'anomalies totales et d'anomalies de la queue diminué par rapport au groupe
34 témoin. Les auteurs proposent que les radiofréquences entraîneraient une stimulation de l'axe
35 hypothalamo-pituito-gonadique, qui pourrait être une cause de puberté précoce chez les rats. Les
36 résultats sont à prendre avec réserves à cause de limites méthodologiques importantes
37 concernant l'exposition (valeur réelle du champ électrique non mesurée), et la partie biologie
38 (exposition des rats de 2 jours sans leur mère, étude non en aveugle dans les analyses). De
39 plus, les coupes histologiques de l'épithélium séminifère qui montrent une absence criante de
40 spermatozoïdes due à la dégénérescence du tissu semblent contradictoires avec les valeurs de
41 numération des spermatozoïdes qui ne montrent pas de variation de la concentration spermatique.

42 Lee *et al.* (2012) ont étudié les effets de l'exposition simultanée aux champs électromagnétiques
43 CDMA et W-CDMA (DAS de 2 W/kg chacun (4 W/kg au total), 45 min par jour, 5 jours par semaine
44 pendant 12 semaines) sur la fonction testiculaire du rat. Les paramètres mesurés comprenaient la
45 concentration en testostérone du sérum, le nombre et la morphologie des spermatozoïdes dans
46 l'épididyme, et des indicateurs de la peroxydation lipidique et de l'apoptose dans les testicules
47 (méthode TUNEL et paramètres biochimiques en lien avec le processus apoptotique). La
48 température rectale des animaux a également été contrôlée. Les auteurs concluent à l'absence
49 d'effet de l'exposition combinée CDMA / WCDMA-RF sur le système reproducteur mâle chez le rat.

1 Au cours d'une étude sur l'immunité (voir paragraphe 5.8.1), Aït-Aïssa *et al.* (2012) ont évalué les
2 effets d'une exposition *in utero* sur certains paramètres généraux de la santé de rats nouveau-nés
3 (poids, comportement et posture), et sur la distance ano-génitale. Les animaux ont été exposés *in*
4 *utero* (GD 6 – GD 21) ou de façon pré- et post- natale (GD 6 – PND 35) à un signal Wi-Fi (2 450
5 MHz, DAS = 0,08, 0,4 ou 4 W/kg) 2 heures par jour, 5 jours par semaine. L'exposition est bien
6 contrôlée. Les résultats ne mettent en évidence ni de modification de la croissance ou du
7 comportement, ni d'effet sur la distance ano-génitale. La méthodologie est très sérieuse car elle
8 comporte une habituation des animaux au système d'exposition, la présence de contrôles positifs,
9 d'une exposition factice et de contrôles cage.

10 Poulletier de Gannes *et al.* (2013) ont évalué les effets de l'exposition à un signal Wi-Fi de
11 2,45 GHz sur la reproduction de jeunes rats. Les rats mâles âgés de 7 semaines ont été exposés
12 pendant 3 semaines tandis que les femelles, âgées de 8 semaines, ont été exposées pendant
13 2 semaines à raison d'1 h / j, 6 j / semaine. Lorsque les animaux ont atteint 10 semaines, un mâle
14 et une femelle ont été regroupés à raison d'un couple par cage (12 couples), et l'exposition a
15 encore duré 3 semaines. À la fin de l'exposition, les animaux sont euthanasiés. Chez les mâles,
16 les testicules, épидидymes, glandes séminales et la prostate ont été prélevés, examinés
17 macroscopiquement puis soumis à une analyse histologique. Chez les femelles, les animaux ont
18 été anesthésiés entre le 19^{ème} et le 21^{ème} jour de la gestation, et l'utérus et les ovaires ont été
19 prélevés. Les ovaires ont été examinés pour déterminer le nombre de corps jaunes de chaque
20 ovaire. L'utérus a été analysé pour déterminer le nombre de fœtus vivants et morts ainsi que le
21 nombre et la distribution de chaque site d'implantation. Un examen des fœtus a été réalisé, avec
22 examen macroscopique, poids et *sex-ratio*.

23 Les résultats, aux niveaux macroscopique et microscopique, ne montrent aucun effet de
24 l'exposition aux radiofréquences sur le système reproducteur mâle chez le rat. Aucun effet de
25 l'exposition aux radiofréquences n'est observé sur le système reproducteur femelle, que ce soit au
26 niveau de l'histologie des ovaires ou en nombre et sites d'implantation des fœtus. Aucune
27 différence n'a été constatée entre les différents groupes d'exposition concernant les fœtus.

28 Sangun *et al.* (2014) ont étudié chez le rat les effets sur la croissance et le développement
29 pubertaire d'une exposition à un signal Wi-Fi (2 450 MHz, 0,1 W/kg, 1 h / j). Ils ont réalisé 2 types
30 d'exposition :

- 31 - exposition prénatale : de GD 0 à la naissance, puis de PND 21 à la puberté ;
- 32 - exposition postnatale : de PND 21 à la puberté.

33 À la puberté, les animaux sont sacrifiés. Des examens histologiques sont réalisés, les indicateurs
34 du stress oxydant sont mesurés dans les organes reproducteurs et le cerveau (voir § 1.3.1.2.2), et
35 les hormones sériques (LH, FSH, E2 et IGF-1) sont dosées.

36 Dans le groupe exposé de façon prénatale, le gain de poids journalier était plus bas et la puberté
37 plus tardive. Les tissus cérébraux et ovariens ont également un statut oxydant augmenté. Les
38 niveaux de LH sériques sont augmentés dans les 2 groupes d'exposition, et les niveaux de FSH et
39 E2 sont inchangés. Aucune différence dans les observations histologiques n'est constatée entre
40 les 3 groupes d'exposition. L'absence de groupe contrôle cage est regrettable, car les paramètres
41 évalués (prise alimentaire, prise de poids) et les conditions d'exposition (contention dans un
42 carrousel d'exposition) sont très impactés par le stress. De plus, les animaux ne semblent pas
43 avoir été habitués préalablement au carrousel. L'interprétation des résultats n'est pas rigoureuse
44 (comparaison avec d'autres travaux exposant des rats à des champs électromagnétiques basses
45 fréquences)

46

47 Le groupe de travail « Radiofréquences et santé », à l'occasion de son travail sur la mise à jour
48 des connaissances concernant les effets sanitaires des radiofréquences publié le 15 octobre 2013,
49 avaient identifié des études qui ne peuvent pas être utilisées pour évaluer les effets des
50 radiofréquences sur la reproduction et le développement en raison des nombreux biais

- 1 méthodologiques. Ces études sont : Gul *et al.* 2009, Fragopoulou *et al.* 2010, Lyaginskaja *et al.*
- 2 2010, Atasoy *et al.* 2013.
- 3
- 4

DOCUMENT EN CONSULTATION

1
2
3
4

Tableau 25 : Études investiguant les effets sur la fertilité et le système reproducteur. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge lors de l'exposition	Effets étudiés	Nombre d'animaux / groupe	Résultats <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Exposition in utero					
Lee <i>et al.</i> , 2009	CDMA (848,5 MHz) et W- CDMA (1 950 MHz) simultanément DAS = 4 W/kg 2 séquences quotidiennes de 45 min séparées de 15 min, 5 jours /semaine pendant 18 jours (GD 1 – GD 17)	Souris <i>in utero</i>	Mortalité maternelle Effets tératogènes	n = 4 ou 5	Absence de surmortalité maternelle Absence d'effets tératogènes
Ogawa <i>et al.</i> , 2009	W-CDMA 1 950 MHz DAS = 0,67 ou 2 W/kg 90 min/jour (GD 7 – GD 17)	Rat <i>in utero</i>	Embryogenèse	n = 20 mères	Pas d'effet sur les paramètres reproducteurs et embryologiques investigués, tels que le nombre de naissances vivantes, mortes, le poids placentaire, le <i>sex-ratio</i> , le poids ou les anomalies viscérales ou squelettiques des fœtus viables.
Poullietier de Gannes <i>et al.</i> , 2012	Wi-Fi 2 450 MHz DAS = 0,08, 0,4 et 4 W/kg 2 h/jour, 6 j/semaine, pendant 18 jours (GD2 – GD 20)	Rat <i>in utero</i>	Effets tératogènes Développement néonatal	n = 15 mères	Absence d'anomalie chez les mères exposées Absence d'effet tératogène Augmentation de la consommation de nourriture pendant la lactation chez les mères exposées à 0,4 W/kg, sans conséquence pour le développement néonatal

5

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge lors de l'exposition	Effets étudiés	Nombre d'animaux / groupe	Résultats <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Exposition pré- et post- natale					
Cobb <i>et al.</i> , 2000	Signal pulsé UWB DAS = 45 mW/kg 24h/24, 7j/7 GD 3 – GD 18 ou GD 3 - PND 10 ou PND 1 – PND 10	Rat <i>in utero</i>	Capacité reproductrice	6 animaux par groupe	Diminution de la fréquence d'accouplement des petits mâles exposés <i>in utero</i> sans conséquence sur leur fertilité et sur le nombre de petits à la naissance. Aucun effet sur le développement postnatal.
Sommer <i>et al.</i> , 2009	UMTS 1 966 MHz DAS = 0 ; 0,08 ; 0,4 et 1,3 W/kg 24 h/24 ; vie entière	Souris C57BL Naissance	Fertilité mâle Fertilité femelle Taux de malformation foetale Développement génération F1	n = 128 mâles et 256 femelles	Absence d'effet sur la reproduction et le développement des souris
Takahashi, <i>et al.</i> , 2010	W-CDMA 2,14 GHz DAS ₁ = 0,068 - 0,146 W/kg DAS ₂ = 0,026 et 0,067W/kg 20h/j	Rat GD 7 à PND 21	Examen des générations F1 et F2 F1 : croissance des animaux, les conditions de la gestation, le poids des petits et leur survie, leur développement physique et fonctionnel, le statut hormonal, les fonctions cognitives et leur capacité reproductrice F2 : l'embryotoxicité et la tératogénicité	8 rats / groupe	Diminution du nombre de corps jaunes chez les femelles F1 en gestation exposées au plus faible DAS Augmentation des poids des fœtus vivants F2 exposés au plus faible DAS

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge lors de l'exposition	Effets étudiés	Nombre d'animaux / groupe	Résultats <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Lee <i>et al.</i> 2010	CDMA 848,5 MHz DAS = 2 W/kg 2 séquences quotidiennes de 45 min séparées de 15 min, 5 j/semaine pendant 12 semaines	Rat 30 jours	Fonction testiculaire (spermogramme, concentration MDA, étapes de maturation des spermatozoïdes) Paramètres de l'apoptose	n = 20	Aucun effet sur la fonction testiculaire (spermogramme, concentration en MDA, stades de maturation des spermatozoïdes, numération des cellules germinales, nombre de cellules apoptotiques)
Imai <i>et al.</i> 2011	GSM 1 950 MHz 5h par jour pendant 5 semaines DAS = 0,08 et 0,4 W/kg	Rat 35 jours	Poids des organes reproducteurs (testicule, épидидyme, vésicule séminale, prostate) Spermogramme Détection d'anomalies morphologiques	24 rats / groupe	Absence d'effet sur la fertilité et la qualité du sperme
Ozlem Nisbet <i>et al.</i> , 2012	GSM 900 ou 1 800 MHz A 10, 20, 50 et 70 jours, pour 900MHz : DAS = 3.00, 2.7, 2.2, 1.2 mW/kg pour 1800 MHz : DAS = 0.053, 0.046, 0.011, 0.011 mW/kg 2h/j, 7j/7j, pendant 90 jours	Rat PND 2 – PND 92	- Concentration sérique de testostérone - caractéristiques spermatiques (concentration, motilité, pourcentage de spermatozoïdes présentant des anomalies morphologiques) - Histopathologie testiculaire	11 rats / groupe	Augmentation significative des concentrations circulantes de testostérone dans les 2 groupes exposés aux radiofréquences. À 1800 MHz, augmentation de la motilité des spermatozoïdes, sans atteinte de leur concentration et augmentation du pourcentage d'anomalies morphologiques des spermatozoïdes. À 900 MHz, les taux de spermatozoïdes morphologiquement normaux étaient plus élevés, avec un pourcentage d'anomalies totales et d'anomalies de la queue diminué par rapport au groupe témoin.

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge lors de l'exposition	Effets étudiés	Nombre d'animaux / groupe	Résultats <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Lee <i>et al.</i> 2012	Exposition simultanée aux champs électromagnétiques CDMA et WCDMA DAS = 4 W/kg au total 45 min par jour, 5 jours par semaine pendant 12 semaines	Rat 28 jours	Fonction testiculaire du rat	n = 20 animaux / groupe (témoin négatif et exposés) n = 5 animaux / groupe (contrôle cage et contrôle positif)	Absence d'effet de l'exposition combinée CDMA/WCDMA-RF sur la fonction testiculaire du rat (spermogramme, concentration en MDA, stades de maturation des spermatozoïdes, numération des cellules germinales, nombre de cellules apoptotique))
Aït-Aïssa <i>et al.</i> 2012	Wi-fi 2450 MHz DAS = 0,08, 0,4 ou 4 W/kg 2h/j, 5 jours par semaine	Rat GD 6 – GD 21 Ou GD 6 – PND 35	Santé des rats nouveau-nés (poids, comportement et posture) Distance ano-génitale	Entre 9 et 11 rats / groupe	Absence d'effet sur la croissance, le comportement des rats nouveau-nés ni sur la distance anogénitale
Poullétier de Gannes <i>et al.</i> 2013	Wi-Fi de 2,45 GHz 1 h/j, 6 j/semaine pendant 5 ou 6 semaines	Rat 6 semaines	Rat mâle : analyse macroscopique et histologique des testicules, épидидyme, glandes séminales et de la prostate Rat femelle en gestation : nombre de corps jaunes par ovaire, nombre de fœtus vivants et morts, le nombre et la distribution de chaque site d'implantation	12 rats / groupe	Absence d'effet chez les mâles et les femelles
Sangun <i>et al.</i> , 2014	Wifi 2450 MHz DAS = 0,1 W/kg 1h / j	Rat GD 1 – naissance puis PND 21- puberté Ou PND 21 – puberté	- Age à la puberté - Stress oxydant - Analyse histologique des ovaires et du cerveau - Concentration sérique hormonal (LH, FSH, E2, IGF-1)	8 rats / groupe	Diminution du gain de poids journalier et retard de la puberté chez les exposés <i>in utero</i> Augmentation du statut oxydant dans les tissus cérébraux chez les exposés <i>in utero</i> . Augmentation des concentrations sériques de LH dans les 2 groupes d'exposition, absence d'effet pour les concentrations de FSH et E2 Aucune différence dans les examens histologiques entre les 3 groupes d'exposition

5.6.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur la reproduction mâle et femelle chez l'Homme et l'animal

- Concernant les effets tératogènes et le développement

Chez l'enfant, les données sont **inexistantes** (Figure 48).

Chez l'animal, six études ont investigué les effets tératogènes et sur le développement des radiofréquences. Parmi ces études, 3 ont exposé les animaux de façon prénatale (Lee *et al.*, 2009 ; Ogawa *et al.*, 2009 ; Poullétier de Gannes *et al.*, 2012) et 3 autres ont exposé les animaux de façon combinée pré- et post- natale (Cobb *et al.*, 2000 ; Sommer *et al.*, 2009 et Aït-Aïssa *et al.*, 2012). Aucune étude ne rapporte d'effet sur le développement des animaux. Par conséquent, **les données disponibles ne montrent pas d'effet** des radiofréquences sur les effets tératogènes et le développement des animaux (Figure 49).

En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur les effets tératogènes et développementaux** (Figure 50).

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve

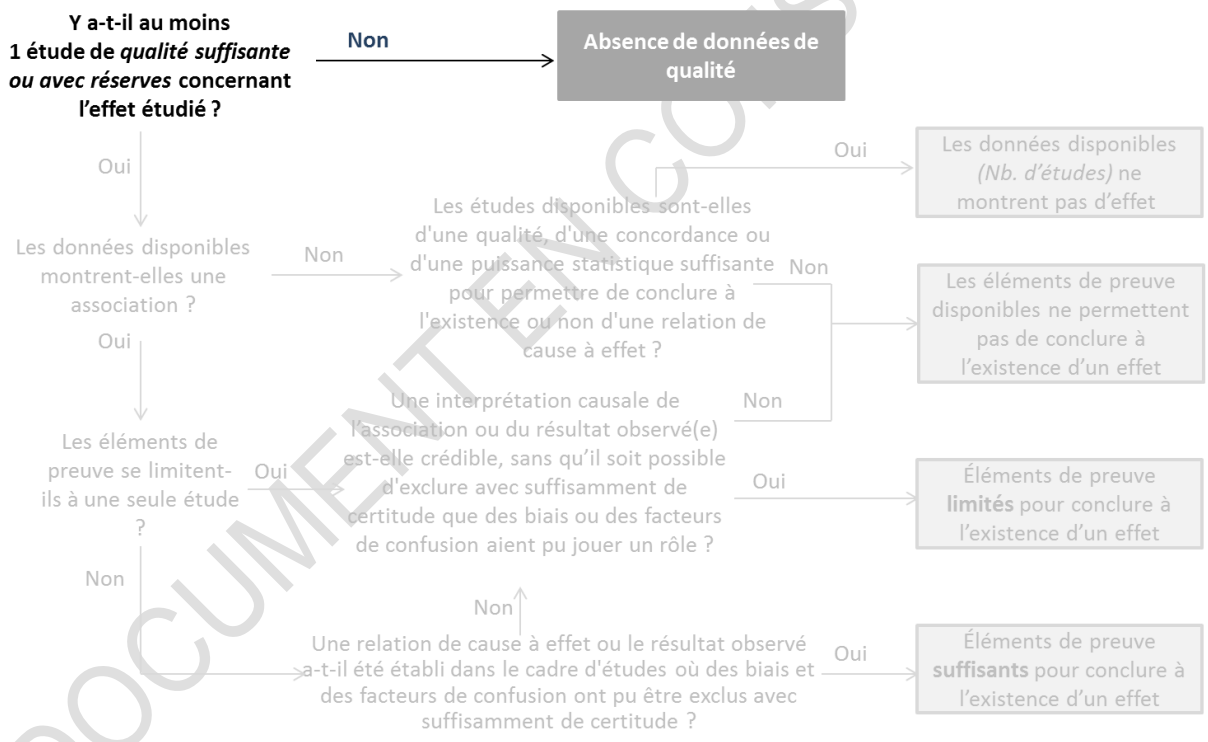


Figure 48 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets tératogènes dans les études épidémiologiques

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve

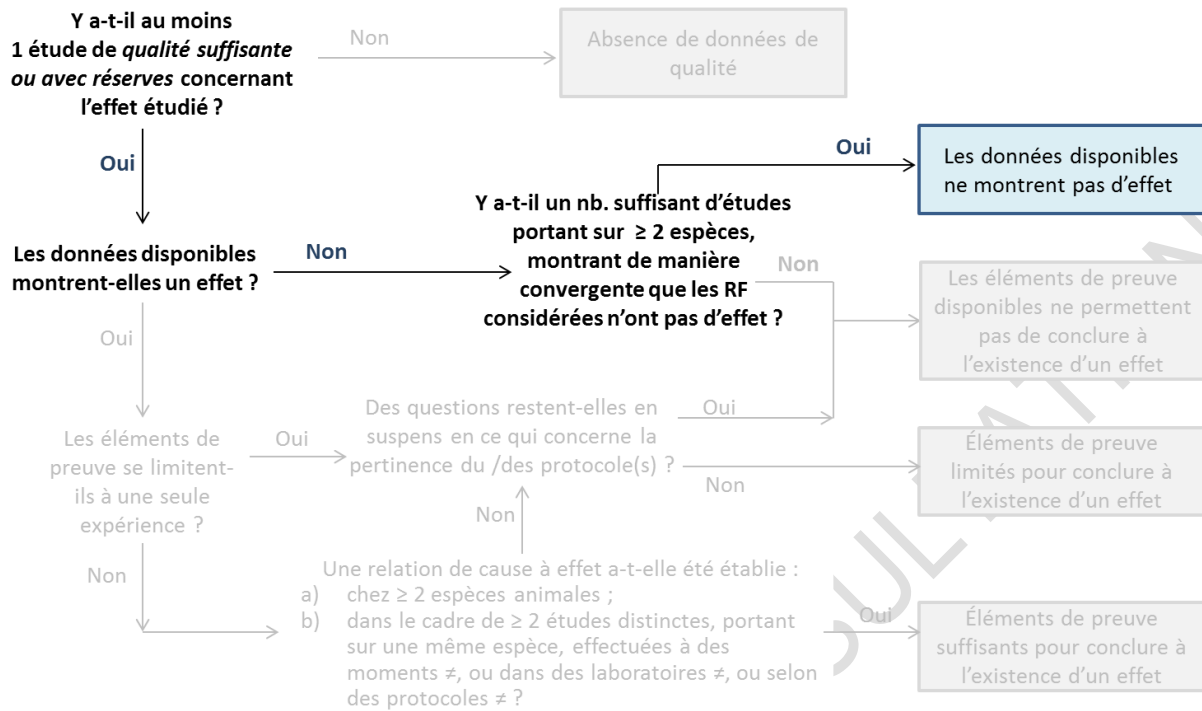
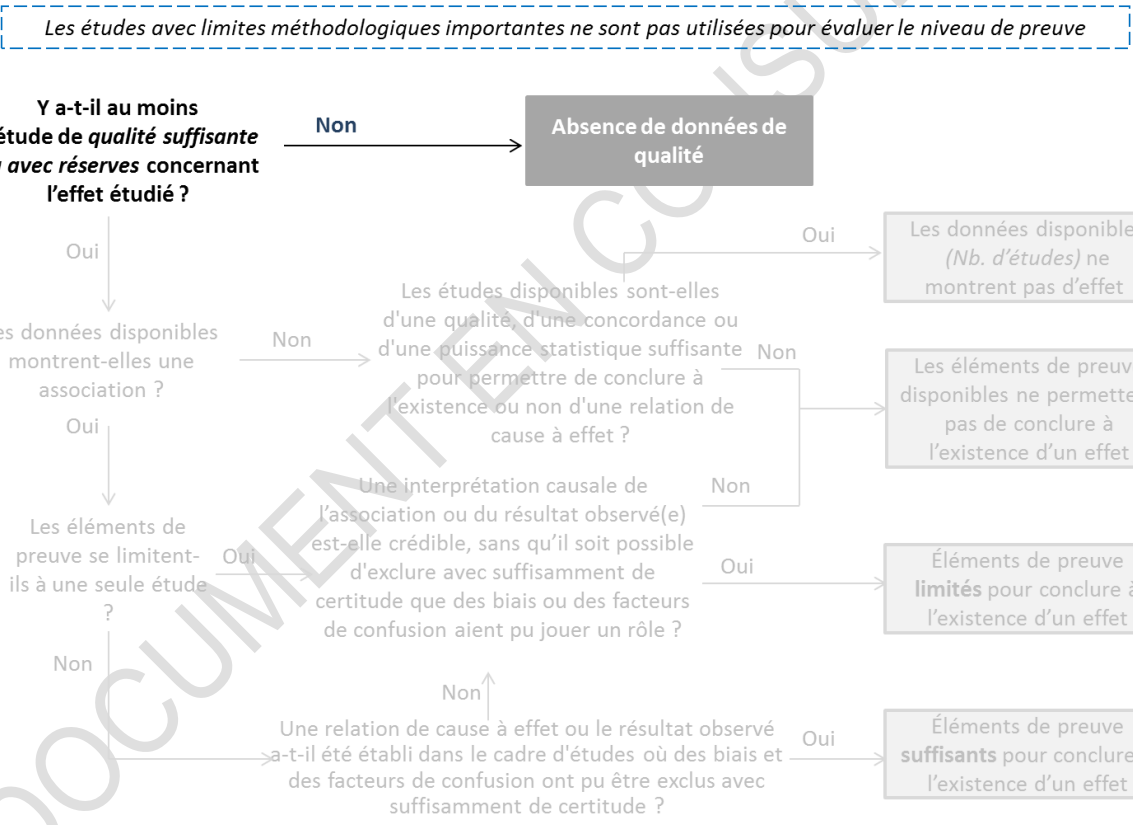


Figure 49 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets tératogènes dans les études sur les modèles animaux

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'enfant				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'enfant	Effet possible pour l'enfant			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'enfant	Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			
	Absence de données de qualité					Probablement pas d'effet chez l'enfant

Figure 50 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur la tératogénicité et le développement chez l'enfant

- 1 - Concernant le système reproducteur femelle
- 2 Chez la femme, les données sont **inexistantes** (Figure 51).
- 3 Chez l'animal, quatre études se sont intéressées aux effets des radiofréquences sur le
- 4 développement des organes reproducteurs féminins. Deux études ne rapportent pas d'effet
- 5 (Sommer *et al.*, 2009 ; Poullietier de Gannes *et al.*, 2013). Takahashi *et al.*, (2010) montrent une
- 6 diminution des corps jaunes chez les femelles F1 en gestation exposées au DAS le plus faible de
- 7 l'expérience. Cependant, cette diminution ne semble pas affecter l'issue de la gestation. Sangun *et*
- 8 *al.*, (2014) rapportent une puberté plus tardive et une augmentation de la LH circulante chez les
- 9 animaux exposés à la fois en pré-natal et en post-natal à partir du 21^{ème} jour et jusqu'à la puberté.
- 10 Ces résultats ne semblent pas cohérents avec ceux de Takahashi *et al.* (2010), car une
- 11 augmentation de la LH circulante aurait pour effet une augmentation des corps jaunes. Par
- 12 conséquent, **les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence**
- 13 **d'un effet** des radiofréquences sur les organes reproducteurs femelles (Figure 52).
- 14 En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un**
- 15 **effet sur le système reproducteur femelle** de l'enfant (Figure 53).
- 16



17 Figure 51 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur femelle dans les études

18 épidémiologiques

19

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve

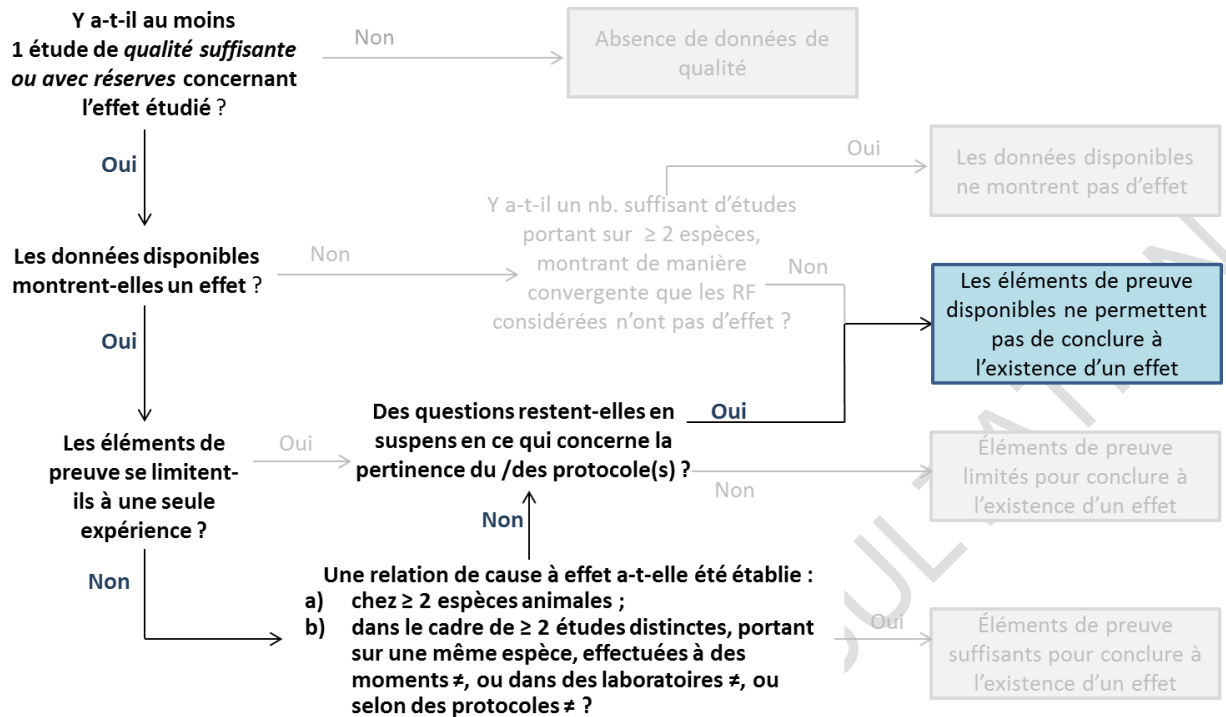


Figure 52 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur femelle dans les études sur les modèles animaux

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'enfant				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'enfant	Effet possible pour l'enfant			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'enfant				
	Absence de données de qualité		Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			Probablement pas d'effet chez l'enfant
		Les données disponibles ne montrent pas d'effet				

Figure 53 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le système reproducteur femelle chez l'enfant

1 - Concernant les effets sur le système reproducteur mâle

2 Chez l'enfant, les données sont **inexistantes** (Figure 54).

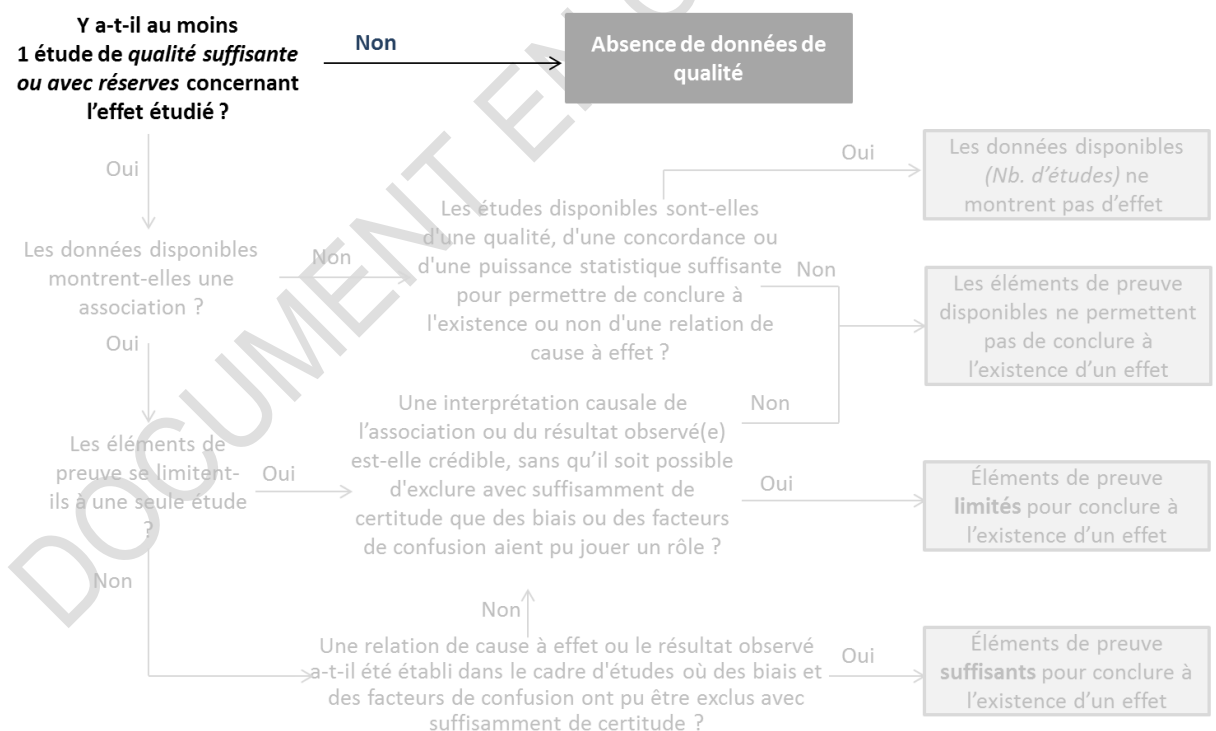
3 Chez l'animal, huit études ont évalué les effets de l'exposition aux radiofréquences sur le système
 4 reproducteur mâle. Quatre études ont réalisé un spermogramme. L'équipe de Lee (Lee *et al.*, 2010
 5 et 2012) n'a pas trouvé d'anomalie sur la concentration et la morphologie spermatique après une
 6 exposition postnatale (à partir du 28^{ème} jour). En revanche, pour les 2 autres études, les résultats
 7 ne sont pas concordants. En effet, Ozlem Nisbet *et al.*, (2012) rapportent chez le rat exposé à
 8 partir du 2^{ème} jour postnatal une augmentation de la motilité des spermatozoïdes sans atteinte de
 9 leur concentration, mais avec un pourcentage d'anomalies histologiques augmenté. Imai *et al.*,
 10 eux, trouvent une augmentation de la concentration spermatique dans le groupe exposé à un DAS
 11 de 0,4 W/kg à partir du 35^{ème} jour postnatal, sans anomalie dans la motilité des spermatozoïdes ni
 12 dans l'histologie des tubes séminifères.

13 Les autres études qui ont concerné une exposition prénatale et / ou postnatale ne rapportent
 14 aucune différence entre les groupes exposés et les non-exposés sur les paramètres investigués
 15 du système reproducteur mâle (Sommer *et al.*, 2009 ; Takahashi *et al.*, 2010 ; Lee *et al.*, 2011 ;
 16 Poullétier de Gannes *et al.*, 2013).

17 Par conséquent, **les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à**
 18 **l'existence d'un effet** des radiofréquences sur le système reproducteur mâle (Figure 55).

19 En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas d'évaluer l'existence d'un effet**
 20 **sur le système reproducteur mâle** de l'enfant (Figure 56).

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve



21
 22 Figure 54 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur mâle dans les études
 23 épidémiologiques
 24

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve

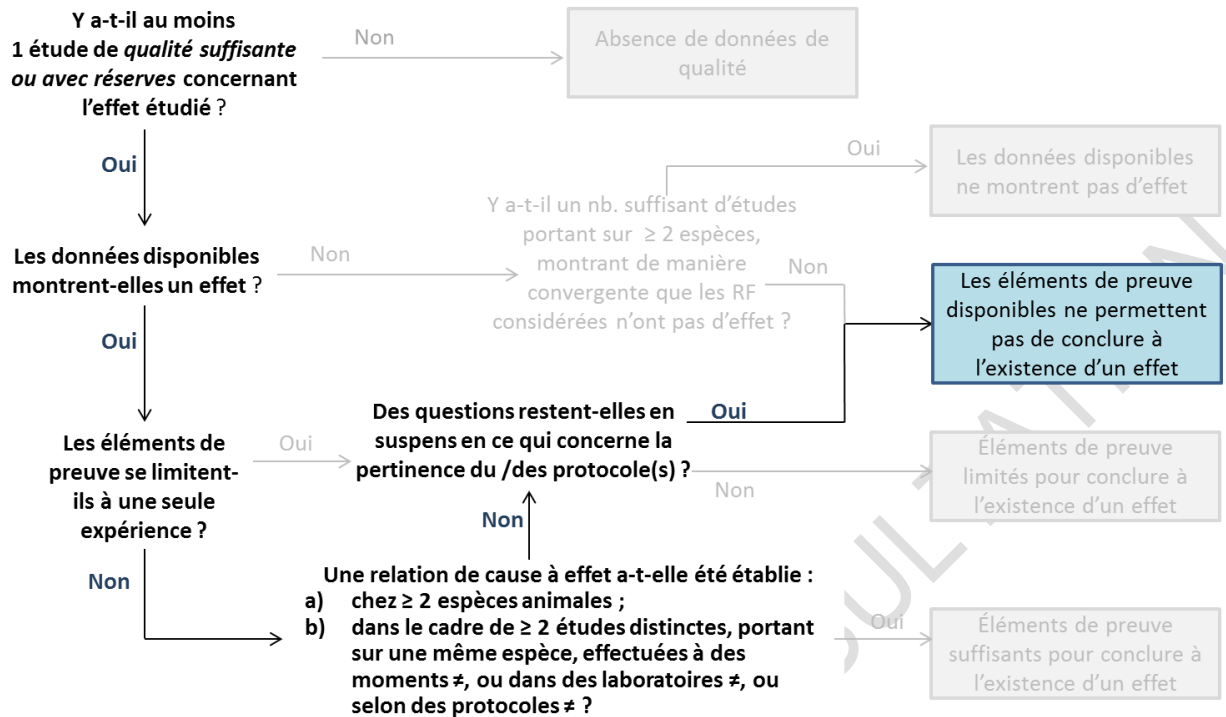


Figure 55 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur mâle dans les études sur les modèles animaux

1
2
3
4

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'enfant				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'enfant	Effet possible pour l'enfant			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'enfant				
	Absence de données de qualité		Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			Probablement pas d'effet chez l'enfant
		Les données disponibles ne montrent pas d'effet				

Figure 56 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le système reproducteur mâle chez l'enfant

5
6

1 5.7 Études sur la cancérogénèse

2 5.7.1 Chez l'Homme

3 5.7.1.1 Exposition aux tours d'émissions radio et stations de base

4 Ha *et al.*, (2007) se sont intéressés à la relation entre la survenue d'une tumeur cérébrale ou d'une
5 leucémie infantile et le fait d'habiter dans l'entourage d'une des 31 tours de diffusion radiophonique
6 AM (modulation d'amplitude) dans le cadre d'une étude cas-témoins en Corée du Sud (Ha *et al.*,
7 2007). L'étude a porté sur 1 926 cas et 3 082 témoins, âgés de moins de 15 ans, recrutés entre
8 1993 et 1999 dans l'un des 14 hôpitaux de Corée du Sud participant au système d'assurance
9 publique. Les témoins ont été recrutés dans le même hôpital, parmi les enfants consultant pour
10 des problèmes respiratoires la même année que le cas correspondant. Ils ont été appariés aux cas
11 sur l'âge et le sexe. Les facteurs de confusion pris en compte sont le statut socioéconomique des
12 parents et la densité de population autour des tours, en vue de prendre en compte le niveau
13 d'industrialisation et de pollution environnementale. L'exposition a été évaluée d'une part à partir
14 de la distance, et d'autre part à partir d'un modèle de propagation des champs à côté du domicile
15 de chaque enfant, en tenant compte de la puissance des antennes, des conditions
16 météorologiques moyennes et d'un certain nombre de caractéristiques géographiques locales. Ce
17 modèle a été validé par des mesures de champs radiofréquences générés par les transmetteurs
18 d'ondes radio AM (de fréquence comprise entre 540 kHz et 90 500 kHz), réalisées en points fixes
19 et mobiles. Les résultats de cette étude mettent en évidence :

- 20 • un excès de leucémies (tous types) dans le périmètre le plus proche des tours (< 2 km)
21 (OR = 2,15 [IC95 % : 1,00 – 4,67]). Cependant, pour le quartile supérieur d'exposition, un
22 OR égal à 0,83 [IC95 % : 0,63 - 1,10], ce qui ne va pas dans le sens d'une relation entre
23 les leucémies et l'exposition ;
- 24 • pour les leucémies lymphoïdes, les *odds-ratios* pour les quartiles 25 - 50 et 50 - 75 étaient
25 supérieurs à 1 (respectivement 1,39 [1,04 - 1,86] et 1,59 [1,19 – 2,11]), sans que la
26 tendance avec le niveau d'exposition ne soit significative,
- 27 • pour les leucémies myéloïdes, un *odds-ratio* supérieur à 1, à la limite de la significativité, a
28 été observé (OR = 1,53 [0,99 – 2,35] dans le quartile de l'exposition la plus élevée ;
- 29 • aucune association entre les tumeurs cérébrales et l'exposition aux champs
30 électromagnétiques n'a été mise en évidence.

31 L'auteur relève certaines limites à l'étude, en particulier la non prise en compte des expositions
32 antérieures, de l'exposition pendant la grossesse, et de l'exposition concomitante à d'autres
33 sources de radiofréquences (téléphones mobiles et stations de base), cependant, les téléphones
34 mobiles ont été introduits en Corée du Sud vers la fin des années 90, leur contribution à
35 l'exposition ne doit donc pas être importante. Le choix de témoins ayant eu des problèmes
36 respiratoires pourrait également être discuté. L'interprétation des résultats de cette étude, dans
37 laquelle aucune relation dose-effet n'a été mise en évidence, doit également envisager la présence
38 de facteurs de confusion qui n'auraient pas été pris en compte.

39 Merzenich *et al.* (2008) ont réalisé une étude cas-témoins portant sur les hémopathies malignes de
40 l'enfant de 3 à 14 ans (leucémies lymphoïdes chroniques, leucémies myéloïdes chroniques,
41 syndromes myéloprolifératifs, myélodysplasies) dans l'entourage de 24 tours d'émission radio et
42 TV (16 tours AM et 8 FM/TV). De plus, 312 tours de transmission émettant un champ
43 radiofréquence d'une puissance inférieure ou comparable aux principaux émetteurs des zones
44 d'études ont également été intégrées dans la modélisation de l'exposition. L'identification des cas
45 a été réalisée sur une période allant de 1984 à 2004 à partir des registres des cancers. Trois
46 témoins appariés sur le sexe, l'âge et la zone d'étude ont été attribués à chaque cas. Les témoins
47 ont été choisis de manière aléatoire dans la population générale vivant autour des tours de
48 transmission au moment du diagnostic. L'étude porte sur 1 959 cas et 5 848 témoins. L'exposition
49 individuelle aux champs radiofréquences a été calculée grâce à un logiciel initialement développé

1 pour assurer une bonne couverture radiophonique et télévisuelle aux ménages allemands. Un
2 système d'information géographique intégré, basé sur les coordonnées cartésiennes, utilisé en
3 aveugle, a permis l'évaluation de l'exposition au niveau des lieux de résidence des cas et des
4 témoins. L'évaluation de l'exposition des populations a été réalisée à partir des calculs des
5 champs radiofréquences provenant de la télévision et des ondes radio AM et FM ; ce système de
6 modélisation a été validé par comparaison avec des mesures environnementales de
7 radiofréquences et les résultats ont montré que les champs mesurés et calculés sont très
8 fortement corrélés. L'analyse a été effectuée par régression logistique conditionnelle. Les résultats
9 observés sont les suivants :

- 10 • pas d'association entre l'exposition aux radiofréquences émises par les antennes de radio-
11 télédiffusion et la fréquence de survenue de leucémies infantiles ;
- 12 • une stratification sur le temps (1983 - 1991 et 1992 - 2002) n'a pas mis en évidence une
13 différence avant et après l'introduction du téléphone mobile ; cependant, cette dernière
14 analyse est peu pertinente car rien ne permet d'assurer que les leucémies dues au
15 téléphone mobile seraient susceptibles de se développer dès la date de développement du
16 téléphone mobile (pas de prise en compte de l'exposition progressive, et de la latence
17 attendue pour ce type de pathologie). L'analyse des seuls enfants âgés de 0 à 4 ans n'a
18 pas changé les résultats.

19 La limite la plus importante de cette étude repose sur le fait que seule l'adresse au moment du
20 diagnostic du cas a été prise en compte. Or, les enfants ont pu vivre à d'autres adresses, la
21 dernière pouvant être assez récente pour ne pas contribuer à l'exposition en cause.

22 Elliott *et al.* (2010) ont étudié en Grande-Bretagne, de 1999 à 2001, l'exposition *in utero* aux
23 stations de base pour 1 397 enfants de moins de 4 ans, atteints de cancers (tumeurs solides et
24 leucémies) de l'enfant (73 % des cas éligibles, identifiés dans le registre des cancers), et de 5 588
25 témoins appariés sur la date de naissance et le sexe (90 % des témoins éligibles, identifiés dans
26 les registres de naissances) (Elliott *et al.* 2010). L'exposition aux stations de base
27 (81 781 antennes GSM à 900 MHz et 1 800 MHz) a été estimée par une modélisation basée sur
28 des mesures sur le terrain (à l'extérieur des habitations) et tenant compte de plusieurs
29 paramètres : distance entre l'adresse du domicile au moment de la naissance et l'antenne la plus
30 proche, directivité et densité de puissance de cette antenne. S'agissant des tumeurs du cerveau et
31 du système nerveux central (251 cas), les observations sont les suivantes :

- 32 • absence d'association avec la distance : OR (0 - 612 m) = 1,0 [0,7 - 1,4] ;
- 33 • absence d'association avec la densité de puissance : OR (> 0,017 mW/m²) = 0,8 [0,5 - 1,1].

34 Dans cette étude, les sources d'exposition aux radiofréquences autres que les antennes-relais au
35 domicile n'ont pas été prises en compte. De plus, l'adresse à la naissance n'est pas forcément
36 l'adresse lors de la grossesse (nombreux déménagements en fin de grossesse en raison de
37 l'arrivée prochaine d'un enfant), ce qui limite la portée des conclusions.

38 Hauri *et al.* (2014) ont investigué l'association entre l'exposition aux radiofréquences émises par
39 les tours d'émissions de radio (FM) ou de télévision et les cancers de l'enfant, enregistrés dans le
40 registre suisse des tumeurs de l'enfant. Deux types d'analyse ont été réalisées : une analyse de
41 Cox sur la période 2000-2008 (*time to event*) et une analyse de densité d'incidence dans la
42 population des jeunes suisses habitant dans le pays entre 1985 et 2008. Aucun effet de
43 l'exposition n'a été retrouvé, ni sur le risque de cancers en général, ni sur les leucémies. En
44 revanche, sur les tumeurs cérébrales, un OR augmenté est retrouvé dans la première étude (test
45 de tendance significatif) chez les sujets ayant l'exposition la plus forte, mais pas dans la deuxième
46 analyse. Cependant, lorsqu'une stratification sur la période d'exposition est réalisée (avant et
47 après l'introduction du téléphone mobile), le résultat de l'analyse de densité d'incidence sur les
48 tumeurs du cerveau est significatif pour la première période (1985-1995). De très nombreux
49 facteurs de confusion sont pris en compte dans la première analyse, mais pas dans la seconde :
50 les auteurs montrent cependant que l'effet de confusion est très faible, et qu'il est légitime de ne
51 pas en avoir tenu compte dans la deuxième analyse. Les auteurs mentionnent également que

1 dans la première analyse (*time to event*), les résultats semblent « tirés » par deux valeurs
 2 extrêmes de l'exposition, il est regrettable qu'une analyse excluant ces deux cas n'ait pas été
 3 présentée. Il faut signaler que l'exposition au téléphone mobile personnel n'est pas prise en
 4 compte et pourrait jouer un rôle de confusion sur la période la plus récente (1995-2008). Cette
 5 étude présente une méthodologie très soignée et très solide ; les auteurs signalent cependant que
 6 les résultats sur les tumeurs du cerveau ne sont pas totalement cohérents. Néanmoins, il est
 7 difficile de les suivre dans leur affirmation que la seconde analyse serait plus légitime que la
 8 première, par le fait notamment que dans la première étude, les expositions aux adresses
 9 antérieures au diagnostic ont été prises en compte, alors que dans la seconde seule l'adresse au
 10 moment du diagnostic est intégrée.

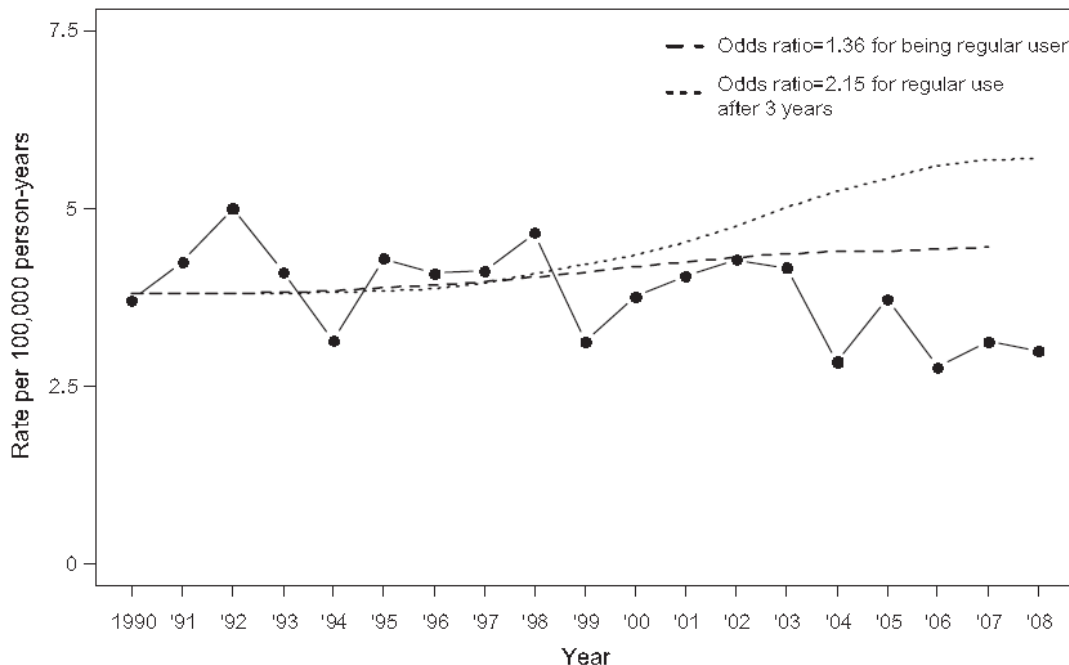
11 5.7.1.2 Exposition via le téléphone mobile

12 5.7.1.2.1 Analyse des tendances temporelles

13 Les analyses de l'incidence des tumeurs du cerveau chez les jeunes montrent :

- 14 – une légère diminution du taux d'incidence chez les 7-19 ans en Suède, pour des données
 15 disponibles jusqu'en 2008 (Aydin et al., 2011a) ;
- 16 – une stabilité des taux d'incidence des tumeurs cérébrales malignes en Angleterre dans les
 17 groupes d'âges 0-9 et 10-19 ans, explorée jusqu'en 2007 (de Vocht et al. 2011a) ;
- 18 – une stabilité des taux d'incidence des tumeurs cérébrales aux États-Unis chez les enfants
 19 et adolescents de 5-19 ans analysée entre 1996 et 2007 (Boice & Tarone 2011) ;
- 20 – une stabilité des taux de tumeurs cérébrales en Gironde (France) sur la période 2000-2007
 21 (Baldi et al. 2011) pour les moins de 25 ans.

22 La Figure 57 montre deux projections de la courbe d'évolution de l'incidence des gliomes dans
 23 l'étude d'Aydin *et al.*, 2011a sous deux hypothèses du niveau du risque relatif : l'hypothèse haute
 24 (OR = 2,15) semble peu compatible avec les données d'incidence observées, contrairement à la
 25 seconde hypothèse (OR = 1,36), compte-tenu de l'incertitude liée aux différents calculs.



26
 27 Figure 57 : Taux de gliomes standardisés sur l'âge et le sexe parmi les enfants et adolescents suédois âgés
 28 de 5 à 19 ans entre 1990 et 2008 (d'après Aydin *et al.*, 2011a).

29 Lignes discontinues : tendance des taux d'incidence projetés sous l'hypothèse que le risque augmenterait
 30 l'incidence de 36 % [OR = 1.36] (tirets larges) ou de 115 % [OR = 2,15] (tirets fins) après 3 ans de latence.
 31 Ligne continue : taux d'incidence observés.
 32

1 Kundi a commenté les résultats d'Aydin *et al.*, objectant que l'augmentation de l'utilisation du
2 téléphone mobile entre 1985 et 2003 ne pouvait pas conduire à une augmentation notable des
3 taux de tumeurs cérébrales pour la période 1998 - 2007, même si le téléphone mobile était associé
4 à une augmentation du risque de tumeurs, à cause de la longue latence d'apparition de ces
5 tumeurs (Kundi 2011). Il a émis l'hypothèse qu'une partie de l'augmentation d'incidence des
6 tumeurs de localisation temporale pouvait néanmoins être attribuée à l'exposition aux
7 radiofréquences. Ces commentaires ont motivé une analyse plus approfondie de l'incidence des
8 tumeurs cérébrales (de Vocht *et al.* 2011b), qui n'a pas mis en évidence de tendance temporelle
9 depuis 1979 quels que soit le sexe ou la classe d'âge. Des augmentations annuelles des taux de
10 tumeurs du lobe temporal (0,04 nouveau cas/an chez l'homme et 0,02 nouveau cas par an chez la
11 femme) sont observées, ainsi que des diminutions des taux de tumeur du lobe pariétal, du cerveau
12 et du cervelet chez l'homme seulement. Si l'augmentation du taux de tumeur du lobe temporal est
13 due à l'exposition au téléphone mobile, elle ne constituerait qu'un cas sur 100 000 entre 1998 et
14 2007. Les auteurs concluent donc que l'augmentation de l'utilisation du téléphone mobile entre
15 1985 et 2003 n'a pas entraîné de changement notable dans l'incidence des tumeurs cérébrales en
16 Angleterre entre 1998 et 2007. Ils recommandent toutefois de répéter ce type d'analyse comme
17 outil de surveillance de santé publique.

18

19 5.7.1.2.2 Études cas/témoins

20 L'étude cas-témoin multicentrique CEFALO (Danemark, Norvège, Suède et Suisse) a été réalisée
21 chez des enfants et adolescents de 7 à 19 ans : les 352 cas ont été sélectionnés sur le diagnostic
22 d'une tumeur du cerveau entre 2004 et 2008 ; les 646 témoins ont été sélectionnés à partir de
23 registres de population, et appariés par âge, sexe, et régions géographiques. Un questionnaire sur
24 les habitudes d'utilisation des téléphones mobiles a été complété avec les parents. L'exposition a
25 été évaluée grâce aux données du questionnaire, mais certaines données des opérateurs
26 téléphoniques disponibles ont aussi été incluses dans l'étude (Aydin *et al.* 2011). Les résultats de
27 l'étude montrent que :

- 28 • l'excès de risque de survenue d'une tumeur cérébrale en comparaison avec les non-
29 utilisateurs, observé pour les utilisateurs réguliers, n'est pas statistiquement significatif
30 (OR = 1,36 ; IC [0,92 - 2,02]) ;
- 31 • les enfants qui ont commencé à utiliser un téléphone mobile au moins 5 ans auparavant ne
32 présentent pas d'excès de risque significatif par rapport à ceux qui ne l'ont jamais
33 régulièrement utilisé (OR = 1,26 ; IC [0,70 - 2,28]) ;
- 34 • si les risques relatifs globaux augmentent avec la quantité d'usage pour plusieurs
35 indicateurs, aucune relation significative « exposition-réponse » n'apparaît par localisation
36 de la tumeur cérébrale. Le risque relatif de tumeur n'est pas supérieur dans l'aire cérébrale
37 la plus proche du téléphone (lobe temporal), de fait la plus exposée.

38 Pour les participants ayant donné leur accord et ayant fourni leur numéro de téléphone, la
39 comparaison entre leurs déclarations et les données de trafic fournies par 2 opérateurs suédois et
40 3 opérateurs danois pour 48 cas et 86 témoins (environ 34 % des participants danois et suédois) a
41 montré une fréquence d'erreurs et de biais de rappel encore plus importante que chez les adultes
42 de l'étude Interphone, ce qui pourrait refléter la difficulté des participants à évaluer correctement
43 leur niveau d'usage passé. Pour ce sous-ensemble de sujets pour lesquels les données des
44 opérateurs étaient disponibles au Danemark et en Suède, l'analyse du risque en fonction du temps
45 depuis la première souscription a montré :

- 46 • un OR augmenté (OR = 2,15 [1,9 - 4,3]) pour plus de 2,8 ans d'abonnement (basé sur 24
47 cas) ; cependant, la probabilité de survenue n'augmente pas avec la durée cumulée des
48 appels ;
- 49 • des OR élevés mais non significatifs pour les autres indicateurs d'exposition obtenus *via*
50 les données fournies par les opérateurs, et sans relation dose-effet (Aydin, *et al.* 2011a).

1 L'étude CEFALO a une puissance limitée, ce qui pourrait expliquer que certains *odds-ratios* soient
2 augmentés mais non significatifs. De plus, les données auto-rapportées telles que le nombre
3 d'appels et leur durée peuvent induire des biais de classement. L'utilisation des données des
4 opérateurs pour déterminer l'exposition a probablement été utile pour réduire ce biais, mais ces
5 données ne sont pas disponibles pour tout l'échantillon et leur disponibilité n'est pas aléatoire
6 (Aydin *et al.*, 2011a). Les données stratifiées sur les pays participant à l'étude sont très disparates
7 et évoquent la possibilité d'un biais de sélection très important dans certains pays (OR utilisateur
8 régulier Suède : OR = 1,73 ; [0,87 - 3,41] / Norvège : OR = 0,51 ; [0,18 - 1,41]) : la réalisation
9 d'études de sensibilité aurait été sans doute intéressante.

10 Söderqvist *et al.* ont contesté la conclusion d'Aydin *et al.* dans un commentaire publié en 2011
11 (Soderqvist et al. 2011). Ils ont considéré que les données contenaient plusieurs indications d'une
12 augmentation de risque, en dépit de la faible exposition, de la courte période de latence et des
13 limites de la conception, des analyses et de l'interprétation de l'étude.

14 Dans leur réponse, Aydin *et al.* notent que Söderqvist *et al.* n'expliquent pas comment une
15 augmentation notable de risque correspondrait à une tendance temporelle relativement stable de
16 l'incidence des tumeurs cérébrales chez les enfants et les adolescents dans les pays nordiques et
17 dans d'autres pays, et montrent pourquoi la vérification de la cohérence entre les résultats des
18 études cas-témoins et les tendances temporelles des taux d'incidence est essentielle, compte tenu
19 des limites des études cas-témoins et de l'augmentation rapide de l'utilisation de téléphone mobile
20 par les enfants et les adolescents au cours des dix dernières années. Toutefois, ils notent qu'*une*
21 *augmentation de risque restreinte à une utilisation importante du téléphone mobile, à une*
22 *exposition très tôt dans la vie, ou à de rares sous-types de tumeurs cérébrales, peut être*
23 *compatible avec la stabilité des tendances d'incidence actuelles*, impliquant la poursuite d'une
24 étroite surveillance des taux d'incidence des tumeurs cérébrales de l'enfant (Aydin et al. 2012).

25 L'étude Mobi-Kids est une étude cas-témoins en cours dans 13 pays. Sur une période de 5 ans
26 seront inclus dans l'étude près de 2 000 patients de 10 à 24 ans atteints de tumeurs cérébrales et
27 4 000 témoins du même âge. Elle utilise des données validées sur l'exposition chez les enfants et
28 les jeunes adultes et prend en compte de nombreux facteurs potentiellement confondants. Ses
29 résultats devraient permettre d'apporter un certain nombre d'éclaircissements.

30 5.7.1.3 Autres expositions des enfants aux radiofréquences

31 Il n'existe pratiquement aucune étude évaluant la relation entre des expositions aux
32 radiofréquences autres (veille-bébé, jouets, etc.) que celles liées aux stations de base, aux
33 antennes et au téléphone mobile.

34 Une seule analyse réalisée par Aydin *et al.* (2011a) dans le cadre de l'étude CEFALO s'est
35 intéressée à la relation entre usage du veille-bébé et tumeurs cérébrales. Aucun excès de risque
36 n'a été mis en évidence (OR_{usage de babyphone} = 0,96 [0,50 - 1,86]). Cependant, ne s'agissant pas de
37 l'objet principal de l'étude, il n'est pas possible de connaître les conditions de l'usage et la qualité
38 du recueil de cette information (Aydin *et al.*, 2011a).

39

1
2

Tableau 26 : Études portant sur l'association entre exposition aux radiofréquences et cancers. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses

Étude	Type d'étude	Population	Pathologie étudiée	Caractérisation de l'exposition	Nombre de sujets	Mesure d'association (avec IC à 95%)
Ha <i>et al.</i> , 2007	Étude cas-témoin	Enfants âgés de 0 à 14 ans diagnostiqués entre 1993 et 1999 Témoins recrutés à l'hôpital appariés sur l'âge et le sexe	Leucémie et tumeurs cérébrales	Tour d'émission radio AM Estimation du champ par la distance ¹ entre la tour d'émission AM et le domicile de l'enfant Estimation aussi par un modèle de propagation	1 928 cas de leucémie 956 cas de tumeurs cérébrales 3 082 témoins	Distance < 2km OR _{leucémie} = 2,15 [1,00 – 4,67] Le plus haut quartile d'exposition : OR _{leucémie} = 0,83 [0,63 – 1,08] OR _{tumeurs cérébrales} = 0,77 [0,54 – 1,10]
Mezernich <i>et al.</i> , 2008	Étude cas-témoin	Enfant âgés de 0 à 14 ans vivant dans des zones définies autour de stations émettrices AM ou FM Cas identifiés dans le registre allemand des cancers infantiles diagnostiqués entre le 1/01/1984 et 31/12/2002 3 témoins par cas appariés sur la zone géographique du domicile, l'âge au diagnostic le sexe et l'âge.	Leucémie	Tour d'émission radio AM Estimation du champ par modélisation entre la tour d'émission AM et FM/TV et le domicile de l'enfant	1 959 cas de leucémie 5 848 témoins	Toutes leucémies confondues, comparaison entre les quantiles haut ($\geq 95\%$ /0,701 V/m) et bas (<90%/0,504 V/m) OR = 0,86 [0,67– 1,11]
Elliott <i>et al.</i> , 2010	Étude cas-témoin	Enfants âgés entre 0 et 4 ans, diagnostiqués entre 1999 et 2001 en Grande-Bretagne Témoins appariés en fonction de l'âge et du sexe	Tous cancers Tumeurs du cerveau Leucémies	Antenne-relais Estimation de l'exposition par modélisation à partir de la distance entre l'adresse du domicile au moment de la naissance et l'antenne la plus proche, la directivité et la densité de puissance de l'antenne, validée par des mesures sur le terrain	1 397 cas de cancer 251 cas de tumeurs du cerveau et SNC 527 cas de leucémies et de lymphomes malins non-Hodgkinien 5 588 témoins	A la plus haute exposition : OR _{tous cancers} = 1,02 [0,88-1,20] OR _{cerveau} = 0,76 [0,51-1,11] OR _{leucémie} = 1,03 [0,79 – 1,34]
Hauri <i>et al.</i> , 2014	Étude de cohorte	Enfants suisses de 0 à 16 ans vivant dans un périmètre de 10 km d'une tour de télévision.	Tous cancers Leucémies Tumeurs du SNC	Tour d'émission radio FM-AM Estimation du champ par modélisation entre la tour d'émission AM et FM/TV et le domicile de l'enfant	1 ^{ère} analyse (Time-to-event) 1 287 354 enfants	RR _{tous cancers} = 1,03 [0,74-1,43] RR _{leucémie} = 0,55 [0,26-1,19] RR _{cerveau} = 1,68 [0,98-2,91]
					2 ^{ème} analyse (Analyse de densité d'incidence)	RR _{tous cancers} = 1,23 [0,54-0,87] RR _{leucémie} = 1,13 [0,74-1,71] RR _{cerveau} = 1,60 [0,98-2,61]

Étude	Type d'étude	Population	Pathologie étudiée	Caractérisation de l'exposition	Nombre de sujets	Mesure d'association (avec IC à 95%)
Aydin <i>et al.</i> , 2011a	Étude cas-témoin	Enfants âgés entre 7 et 19 ans, diagnostiqués entre janvier 2004 et août 2008. Témoins recrutés sur les registres de population, appariés par âge, sexe, et régions géographiques	Tumeurs du cerveau	Téléphone mobile Évaluation de la consommation téléphonique par questionnaire envoyé aux parents Données opérateurs disponibles pour une sous-partie de l'échantillon	356 cas de tumeurs cérébrales 646 témoins	Utilisation régulière : OR = 1,36 [0,92-2,02] Utilisation depuis plus de 5 ans : OR = 1,26 [0,70-2,28]

5.7.2 Chez l'animal

Dans ce paragraphe sont présentées uniquement les données ayant trait au développement de tumeurs et aux effets cytotoxiques et génotoxiques. Les articles expérimentaux chez l'animal et concernant le stress oxydant/cytotoxique dans le cerveau sont présentés dans le paragraphe « Effets sur la réponse cellulaire et le stress oxydant ». Ces études qui sont parfois proposées par leurs auteurs dans le cadre des effets clastogènes/cancérogènes des radiofréquences, abordent la question de modifications biologiques éventuelles induites par une exposition aux radiofréquences et pouvant être en lien avec une réponse de type stress oxydant : si ce dernier est impliqué dans la formation de tumeurs, il l'est tout autant dans d'autres pathologies neurologiques, comme par exemple les maladies neurodégénératives ou encore au cours du vieillissement normal et de la dégradation d'un certain nombre de fonctions cérébrales chez le sujet âgé.

Shirai *et al.* (2005, 2007) n'ont pas observé d'effet cancérogène ni co-cancérogène chez des rats F344 exposés soit à signal TDMA (1 439 MHz) en 2005 soit à un signal W-CDMA (1 950 MHz) en 2007. Dans les deux études, les auteurs ont examiné l'effet de l'exposition chronique sur toute la vie (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 de rats (cerveau et moelle épinière). Un initiateur de tumeurs (N-nitroso-N-éthylurée, ENU) a été administré aux rates à 18 jours de gestation. Cinq groupes d'animaux ont été réalisés : un groupe contrôle, non exposé sans ENU, un groupe ENU seul, un groupe ENU + exposition factice, un groupe ENU + DAS faible et un groupe ENU + DAS élevé. La dosimétrie a été validée de manière numérique (simulations FDTD) et expérimentale avec une caméra thermique complétée par l'utilisation de fantômes de rat de 126, 253, et 359 g (poids croissant avec l'âge des animaux). La température est suivie dans chaque chambre d'exposition.

La prise alimentaire et la survie ont été suivies durant la période de l'expérience. Deux jours avant la fin de l'exposition, des dosages hormonaux de corticostérone, de mélatonine et d'acétylcholine sont réalisés. À la fin de l'exposition, les organes sont pesés (rate, foie, cœur, cerveau, glande pituitaire, glandes surrénales, testicules, ovaires) et prélevés pour examen histologique.

Le seul effet observé est une diminution de l'incidence des tumeurs pituitaires à 2 W/kg chez les mâles dans l'étude de 2005. Dans l'étude de 2007, une tendance à l'augmentation de l'incidence et du nombre de tumeurs cérébrale est observée chez les femelles exposées, mais sans que les résultats soient significatifs.

Saran *et al.*, (2007) ont utilisé des souris *Patched1* (*Ptc1*^{-/-}) qui ont la particularité de montrer une sensibilité accrue aux radiations ionisantes et de développer des tumeurs dans multiples organes (notamment cervelet et peau). Au total, 200 souriceaux *Ptc1*^{-/-} et 200 souriceaux non mutés (*wild type Ptc1*^{+/+}) ont été inclus dans cette étude et ont été exposés en aveugle à un signal GSM de 900 MHz (DAS de 0,4 W/kg) 30 min 2 fois par jour pendant 5 jours dès le 2^{ème} jour post-natal. Après exposition, les auteurs ont laissé les souris grandir afin d'étudier les taux de survie dans les différents groupes. L'incidence des médulloblastomes, des rhabdomyosarcomes et les signes précoces de carcinomes basocellulaires est mesurée. Une analyse histologique et une quantification des tumeurs ont également été effectuées. Quel que soit le type de souris, aucun effet de l'exposition n'a été constaté sur la survie, ou sur l'incidence des tumeurs. Cette étude montre qu'une exposition aigüe à un signal GSM en période néonatale sur des animaux prédisposés à développer des tumeurs n'a pas eu de conséquences sur l'apparition de tumeurs ni sur la survie des souris nouveau-nées.

L'étude de Ziemann *et al.* (2009) s'inscrit dans la continuité des travaux PERFORM-A1 publiés par Tillmann *et al.* 2007. Les auteurs ont cherché à identifier l'effet génotoxique d'une exposition chronique chez la souris à partir de l'âge de 45 jours (n = 1 170) par le test des micronoyaux. Après 2 années d'exposition à un signal GSM ou DCS (DAS de 0,4, 1,3 ou 4 W/kg), 2 h/j, 5 j/semaine, l'apparition de micronoyaux a été explorée au sein des cellules sanguines. Aucune différence significative n'a pu être mise en évidence quelles que soient les conditions d'exposition.

1 Cette étude a utilisé un protocole très rigoureux et un nombre très important d'animaux, ce qui lui
2 donne un poids et une puissance statistique particulièrement forts.

3 L'étude de Tillmann *et al.* (2010) s'est intéressée à l'effet cancérigène des radiofréquences au
4 cours d'une co-exposition en présence d'ENU. Dans cette expérimentation, 5 groupes de souris
5 sont utilisés : 1) témoin, 2) témoin-cage, 3) exposé *in utero* à l'ENU puis de manière chronique
6 (20 h / j durant 2 ans) à un rayonnement électromagnétique de type 3G (UMTS) à 4,8 W/m², 4)
7 exposé à l'ENU uniquement et 5) exposé aux rayonnements UMTS à 48 W/m² uniquement. Les
8 résultats de ces travaux mettent en évidence des augmentations significatives de l'incidence des
9 tumeurs chez les animaux co-exposés aux radiofréquences par rapport à ceux exposés à l'ENU
10 seul. En effet, les incidences du carcinome bronchoalvéolaire multiple et de l'adénome
11 hépatocellulaire multiple sont significativement augmentées chez les animaux co-exposés (ENU +
12 radiofréquences) par rapport au groupe ENU seul. En revanche, aucun effet n'est observé chez les
13 animaux exposés aux radiofréquences uniquement (Tillmann *et al.*, 2010). Cette étude bien menée
14 ne met pas en évidence un effet cancérigène des radiofréquences seules, mais les présente
15 comme un potentiel cofacteur cancérigène.

16 Şekeroğlu *et al.* (2012) ont également étudié les effets cytotoxiques et génotoxiques d'une
17 exposition de 45 jours (2 h / j) sur les cellules de la moelle osseuse issues de jeunes rats exposés
18 à partir de l'âge 15 jours post-natal ou de rats adultes exposés à partir de l'âge de 10 semaines.
19 De plus, les auteurs ont testé la possibilité d'une récupération au cours des 15 jours suivant la fin
20 de l'exposition. L'étude a porté sur 6 groupes de rats (n = 8 / groupe), 3 groupes par catégorie
21 d'âge (immature vs mature) avec 2 groupes de rats contrôle cages), 2 groupes de rats exposés
22 pendant 45 jours (DAS = 0,37 W/Kg pour rats immatures, DAS = 0,49 W/kg pour les rats adultes)
23 et 2 groupes de rats exposés et testés après un délai de 15 jours post-exposition. Immédiatement
24 après exposition, les résultats montrent une augmentation significative de la fréquence des
25 aberrations chromosomiques (CA), et des micronoyaux (MN) chez les rats exposés, juvéniles ou
26 matures, avec une fréquence plus élevée chez les animaux jeunes. Le type de lésion d'ADN le
27 plus retrouvé est la fragmentation des brins. Chez les rats juvéniles, la période de récupération
28 diminue la formation de CA et de MN. L'index mitotique (IM) et le rapport des érythrocytes
29 polychromatiques (PCEs) sont significativement diminués chez les rats exposés (matures et
30 immatures) et restent bas même après la période de récupération. Les auteurs concluent sur la
31 nécessité d'études complémentaires pour comprendre les effets des radiofréquences sur l'ADN et
32 les mécanismes de réparation et pour déterminer les limites d'exposition environnementale, en
33 particulier pour les enfants. L'exposition semble homogène pour tous les rats, et bien que la
34 puissance soit élevée, les niveaux de champs ne donnent pas d'effets thermiques.
35 La limite méthodologique majeure est l'absence de groupe d'exposition factice, l'étude possédant
36 seulement un groupe contrôle cage. L'intégration d'un groupe d'exposition factice est d'autant plus
37 cruciale que les animaux exposés sont en contention, occasionnant un stress important. L'absence
38 de contrôle positif est également regrettable, alors qu'il n'aurait pas été très contraignant d'en
39 inclure un en administrant un agent cancérigène.

40

1
2
3

Tableau 27 : Études investiguant les effets cancérigènes chez l'animal. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Age à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux	Résultats <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Shirai <i>et al.</i> , 2005 et 2007	TDMA (1 439 MHz) ou W- CDMA (1 950 MHz) DAS = 0,67 et 2 W/kg 90 min/jour, 5 j/semaine, pendant 104 semaines	Rat De l'âge de 5 semaines pendant 2 ans	Effet cancérigène et co- cancérigène avec l'administration d'un initiateur de tumeur (ENU)	100 animaux par groupe	Pas d'effet cancérigène ni d'effet co-cancérigènes
Saran <i>et al.</i> , 2007	GSM 900 MHz DAS = 0,4 W/kg 2x30min/jour pendant 5 jours	Souris mutée Ptc1 ^{+/+} PND 2 – PND 7	Effet cancérigène	200 animaux par groupe	Pas d'effet cancérigène Pas d'effet sur la survie des animaux
Ziemann <i>et al.</i> , 2009	GSM (902 MHz) ou DCS (1 747 MHz) DAS = 0,4, 1,3 et 4 W/kg 2 h/jour, 5 j/semaine pendant 2 ans	Souris 45 jours	Effet génotoxique (micronoyaux)	100 animaux par groupe 30 animaux par groupe pour des études intermédiaires	Pas de différence de fréquence des micronoyaux entre les groupes exposés, non exposés (exposition factice) et contrôle cage.
Tillmann <i>et al.</i> , 2010	UMTS 1966 MHz DAS = 4,8 et 48 W/m ² 20 h/jour, 7 j/semaine, pendant plus de 2 ans	Souris <i>In utero</i>	Effet cancérigène et co- cancérigène avec l'administration d'un initiateur de tumeur (ENU)	50 à 60 animaux pour les petits exposés	Pas d'effet cancérigène des RF seules Signal UMTS potentiellement co-cancérigène : augmentation de l'incidence et de la multiplicité du carcinome malin bronchoalvéolaire et de l'incidence de l'adénome hépatocellulaire
Jin <i>et al.</i> , 2011	CDMA (849 MHz) + W-CDMA (1 950 MHz) DAS = 2 W/kg chacun 45 min/jour, 5 j/semaine, 53 semaines	Rat 5 semaines	Effet cancérigène	20 animaux par groupe	Pas d'effet cancérigène (cerveau, thymus, cœur, foie, rate, rein, ovaires, testicules, ganglions lymphatiques)

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Age à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux	Résultats <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Lee <i>et al.</i> , 2011	Exposition simultanée aux champs électromagnétiques CDMA et WCDMA DAS = 4 W/kg au total 45 min/j, 5 j/semaine pendant 42 semaines	Souris 6 semaines	Développement de lymphomes	20 animaux par groupe	Aucune différence significative entre les groupes exposés et témoins concernant la survie, l'incidence de lymphome, la numération de la formule sanguine et la diffusion métastatique.
Şekeroğlu <i>et al.</i> , 2012	GSM 1 800 MHz DAS = 0,37 W/kg pour rats immature et 0,49 W/kg pour rats adultes 2 h/jour pendant 45 jours	Rat Wistar albinos 2 groupes : - jeunes âgés de 2 semaines - adultes âgés de 10 semaines	Effet cytotoxiques et génotoxique dans la moelle osseuse (aberrations chromosomique, micronoyaux, index mitotique, ratio d'érythrocytes polychromatique)	8 animaux par groupe	Augmentation de la fréquence des aberrations chromosomique et des micronoyaux chez les animaux exposés, matures et immatures. Normalisation de ces paramètres après le temps de récupération de 15 jours pour les rats matures, mais pas pour les rats immatures Diminution significative de l'index mitotique et du ratio d'érythrocytes polychromatiques dans les groupes exposés et absence de normalisation après la période de récupération de 15 jours chez les rats immatures

5.7.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet cancérigène des radiofréquences

Chez l'enfant, sur les 4 études concernant des effets liés à une exposition aux émetteurs de radio-télévision, 2 ne montrent pas d'effet (Merzernich *et al.*, 2008 ; Eliott *et al.*, 2010), et 2 montrent des résultats non concordants (Ha *et al.*, 2007 ; Hauri *et al.*, 2014). En effet, l'étude de Hauri *et al.*, (2014) ne montre pas de relation entre l'exposition aux radiofréquences de type FM et les leucémies de l'enfant alors que l'étude de Ha *et al.*, (2007) montre l'inverse.

Les analyses de tendances temporelles ne soutiennent pas l'hypothèse d'une association entre l'exposition aux radiofréquences et la survenue de tumeurs cérébrales chez les enfants et adolescents. Cependant, elles ne permettent pas non plus de l'exclure. En effet, il faut noter la faible capacité des études de tendance temporelle à étudier une relation de cause à effet, dans la mesure où il s'agit d'études écologiques, pour lesquelles l'information est obtenue au niveau global d'une population et non au niveau de chaque individu. De plus, ces études ne permettent pas de prendre en compte les facteurs de confusion éventuels et sont de faible sensibilité au changement, notamment pour surveiller des risques faibles.

Les études cas-témoins ne permettent pas de conclure à une relation entre une exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences et les cancers de l'enfant. Les résultats de l'étude CEFALO soulèvent cependant des interrogations : s'il n'est pas possible de conclure, à ce jour, à l'existence d'une association entre usage du téléphone mobile et tumeurs cérébrales de l'enfant, certaines associations significatives ou à la limite de la significativité devront être confrontés avec les résultats de l'étude Mobikids, lorsque ceux-ci seront disponibles, afin de rechercher l'existence d'une cohérence entre les deux études.

Par conséquent, les éléments de preuve **disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet** cancérigène chez l'enfant (Figure 58).

Chez l'animal, trois études ont examiné l'apparition de tumeurs après une exposition aux radiofréquences.

Deux études ont été publiées sur l'effet co-cancérogène des radiofréquences. Elles rapportent des effets non concordants. Les études de l'équipe de Shirai (Shirai *et al.*, 2005 ; Shirai *et al.*, 2007) ainsi que l'étude de Tillmann *et al.*, 2010 ont exposé des animaux de façon chronique pendant toute leur vie (2 ans). Les études de Shirai n'ont pas montré d'effet co-cancérogène des radiofréquences, tandis que l'étude de Tillmann *et al.*, rapporte une augmentation de l'incidence des tumeurs bronchoalvéolaires et hépatiques. Cependant, bien qu'ils aient réalisé un examen histologique du foie, Shirai *et al.* n'ont pas examiné les poumons. Par ailleurs, les doses d'ENU administrées ne sont pas comparables ; Tillmann *et al.* ont administré 40 mg/kg d'ENU, tandis que Shirai *et al.* ont administré 4 mg/ml/kg d'ENU, sans préciser le volume injecté.

Deux études ont investigué les effets d'une exposition aux radiofréquences sur la cytotoxicité et la génotoxicité de cellules sanguines matures (Ziemann *et al.*, 2009) ou non (Şekeroğlu *et al.*, 2012). Tandis que la première étude ne montre pas d'effet, la seconde rapporte une augmentation significative de la fréquence des aberrations chromosomiques et des micronoyaux chez les rats exposés, juvéniles ou matures, avec une fréquence plus élevée chez les animaux jeunes. Cependant, chez les rats juvéniles, après la période de récupération, le nombre d'aberrations chromosomiques et de micronoyaux diminue. Ces résultats étant contradictoires, et l'étude de Şekeroğlu *et al.*, faisant l'objet de limites méthodologiques, une confirmation par d'autres études est nécessaire.

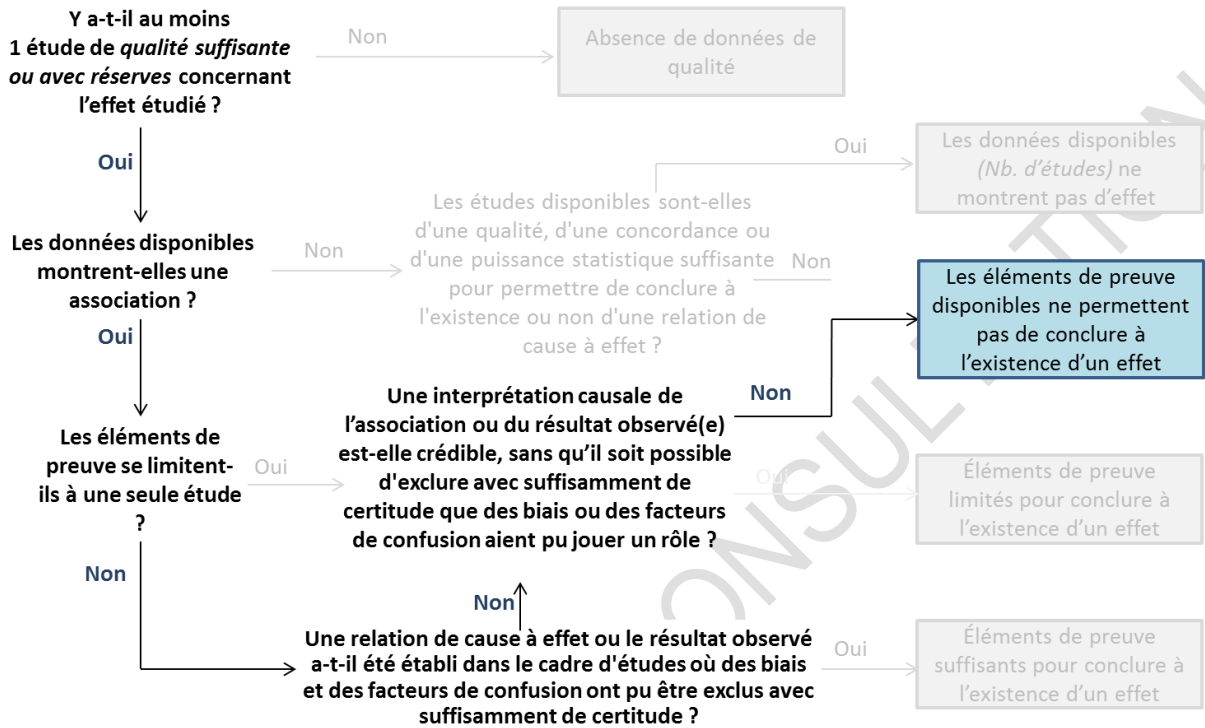
L'étude de Saran (Saran *et al.*, 2007) n'a exposé des souris transgéniques présentant une sensibilité accrue au développement de tumeurs que pendant 5 jours seulement. Il serait nécessaire de conforter ces données avec d'autres études, présentant notamment un début d'exposition prénatale.

Par conséquent, les éléments de preuve **disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet** cancérigène ou co-cancérogène chez l'animal (Figure 59).

1 En conclusion, les éléments de preuve **ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet**
 2 **cancérogène** chez l'enfant (Figure 60).

3

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve



4

5

6

7

Figure 58 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets cancérogènes dans les études épidémiologiques

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve

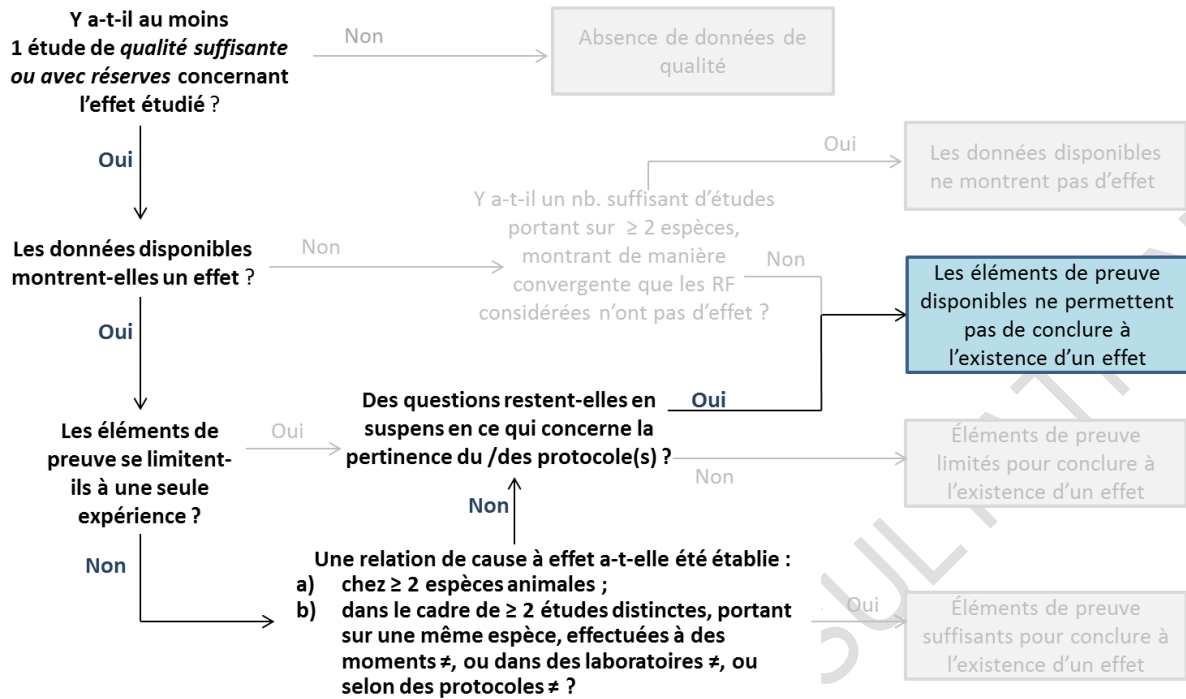


Figure 59 : Évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets cancérogènes dans les études sur les modèles animaux

1
2
3
4

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'enfant				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'enfant	Effet possible pour l'enfant			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'enfant	Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			
	Absence de données de qualité					
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'enfant

Figure 60 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur la cancérogénèse chez l'enfant

5
6
7

1 5.8 Autres effets

2 5.8.1 Système immunitaire

3 5.8.1.1 Exposition *in utero*

4 Sambucci *et al.* (2010) ont exposé des souris en gestation (16 souris par groupe) 2 h par jour, du
5 5^{ème} au 19^{ème} jour après l'accouplement, à un signal Wi-Fi de 2 462 MHz (DAS de 4 W/kg). Les
6 DAS corps entier chez les mères exposées ont été évalués quotidiennement. Le DAS a été
7 mesuré par la méthode du bilan de puissance. Une validation numérique a été effectuée sur des
8 fantômes numériques. La taille et le poids des souris numériques ont été modélisés en fonction
9 des variations journalières mesurées sur les souris. Les animaux exposés ont été comparés à des
10 animaux témoins négatifs et témoins-cage. À 5 et 26 semaines après la naissance, différents
11 paramètres du système immunitaire ont été analysés : numération des cellules spléniques et des
12 lymphocytes B, dosage des IgG et IgM sériques, et après stimulation, évaluation de la production
13 d'anticorps et de la prolifération de lymphocytes B. L'étude ne montre aucun effet des
14 radiofréquences sur les sujets exposés comparativement aux sujets témoins ; en revanche, les
15 auteurs mettent en évidence un effet du stress sur le système immunitaire, qualifié d' « effet
16 cage », en enregistrant des différences significatives des concentrations en immunoglobulines
17 entre les animaux du groupe témoin-cage (dits « zéro stress ») et les animaux témoins ou
18 exposés.

19 L'année d'après, la même équipe a exploré les conséquences d'une exposition *in utero* à un signal
20 Wi-Fi sur les lymphocytes T (Laudisi *et al.* 2012). Le protocole d'exposition est le même que celui
21 décrit précédemment. Aucune différence n'a été constatée entre les animaux témoins et les
22 animaux exposés quel que soit l'âge (5 ou 26 semaines), concernant la numération et la
23 prolifération des cellules du thymus, et après stimulation, la prolifération des lymphocytes T et la
24 production de cytokines.

25 5.8.1.2 Exposition pré- et post- natale

26 Sambucci *et al.* (2011) ont étudié les effets des radiofréquences sur le système immunitaire de
27 souriceaux nouveau-nés exposés à un signal Wi-Fi (DAS = 0,08 ou 4 W/kg) pendant 5 semaines
28 consécutives (2 h par jour, 5 jours par semaine). L'exposition a débuté le jour suivant la naissance.
29 L'expérience a été réalisée en aveugle et le groupe exposé comparé à un groupe témoin. Aucune
30 différence n'a été observée entre les 2 groupes, quels que soient le sexe des animaux et le DAS
31 utilisé, en ce qui concerne le poids et le développement des nouveau-nés, la maturation des
32 thymocytes, la numération des lymphocytes T dans le compartiment périphérique, ainsi que la
33 prolifération des lymphocytes B et la concentration des anticorps dans le sérum. Seule la
34 production d'IFN- γ dans les cellules de la rate est augmentée chez les mâles exposés au plus haut
35 DAS. Ce résultat isolé mérite d'être vérifié.

36 Selon une méthode développée par leur propre équipe, Aït-Aïssa *et al.* (2012) ont dosé des
37 marqueurs immunitaires reflétant d'une manière indirecte les altérations pathologiques et la
38 capacité de la formation ultérieure de néoantigènes. Les rats ont été exposés *in utero* (GD 6 –
39 GD 21) ou de façon pré- et post- natale (GD 6 – PND 35) à un signal Wi-Fi (2 450 MHz,
40 DAS = 0,08, 0,4 ou 4 W/kg) 2 h par jour, 5 jours par semaine. L'exposition est bien contrôlée. Les
41 marqueurs sériques d'antigènes, de stress oxydant et d'inflammation ont été dosés dans le sérum
42 de rats 35 jours après la naissance. L'exposition n'a pas révélé d'effet sur la production de
43 néoantigènes relatifs à des processus pathologiques. La méthodologie est rigoureuse : les
44 animaux sont habitués au système d'exposition, un contrôle positif est présent, les expositions
45 sont réalisées en aveugle.

1
2
3
4

Tableau 28 : Études investiguant les effets sur le système immunitaire. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux	Résultats <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Sambucci <i>et al.</i> 2010	Wi-Fi de 2 462 MHz DAS de 4 W/kg 2h/j,	Souris GD 5 – GD 19	numération des cellules spléniques et des lymphocytes B, dosage des IgG et IgM sériques, et après stimulation, évaluation de la production d'anticorps et de la prolifération de lymphocytes B	16 souris par groupe	Aucun effet des RF sur les paramètres évalués du système immunitaire Mise en évidence de « l'effet cage », c'est-à-dire de la modification de paramètres du système immunitaire en fonction du stress
Laudisi <i>et al.</i> 2012	Wi-Fi de 2 462 MHz DAS de 4 W/kg 2h/j	Souris GD 5 – GD 19	numération et prolifération des cellules du thymus, et après stimulation, de prolifération des lymphocytes T et production de cytokines	16 souris par groupe	Aucun effet des RF sur les paramètres évalués du système immunitaire
Sambucci <i>et al.</i> 2011	Wi-Fi de 2450 MHz DAS = 0,08 ou 4 W/kg 2 h/j, 5 j/semaine, 5 semaines	Souris PND 1 – PND 35	maturation des thymocytes, numération des lymphocytes T dans le compartiment périphérique, prolifération des lymphocytes B et leur concentration des anticorps dans le sérum	16 souris par groupe	Augmentation de la production d'IFN- γ dans les cellules de la rate chez les mâles exposés au plus haut DAS Aucun effet des RF sur les autres paramètres évalués du système immunitaire
Aït-Aïssa <i>et al.</i> 2012	Wi-Fi 2 450 MHz DAS = 0,08, 0,4 ou 4 W/kg 2h/j, 5j/semaine	rat GD 6 – GD 21 ou GD 6 – PND 35	Marqueurs antigéniques, stress oxydant, marqueurs indirect de stress oxydant, marqueurs d'inflammation	12 rats par groupe	Absence d'effet de l'exposition aux RF sur la production de néoantigènes relatifs à des processus pathologiques

1 5.8.1.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le système
 2 immunitaire

3 Chez l'enfant, les données sont **inexistantes** (Figure 61).

4 Chez l'animal, le seul effet observé est l'augmentation de l'IFN γ mis en évidence dans l'étude de
 5 Sambucci *et al.*, 2011, qui ne peut pas être interprété comme un effet sanitaire. Ce résultat doit
 6 être vérifié par d'autres études.

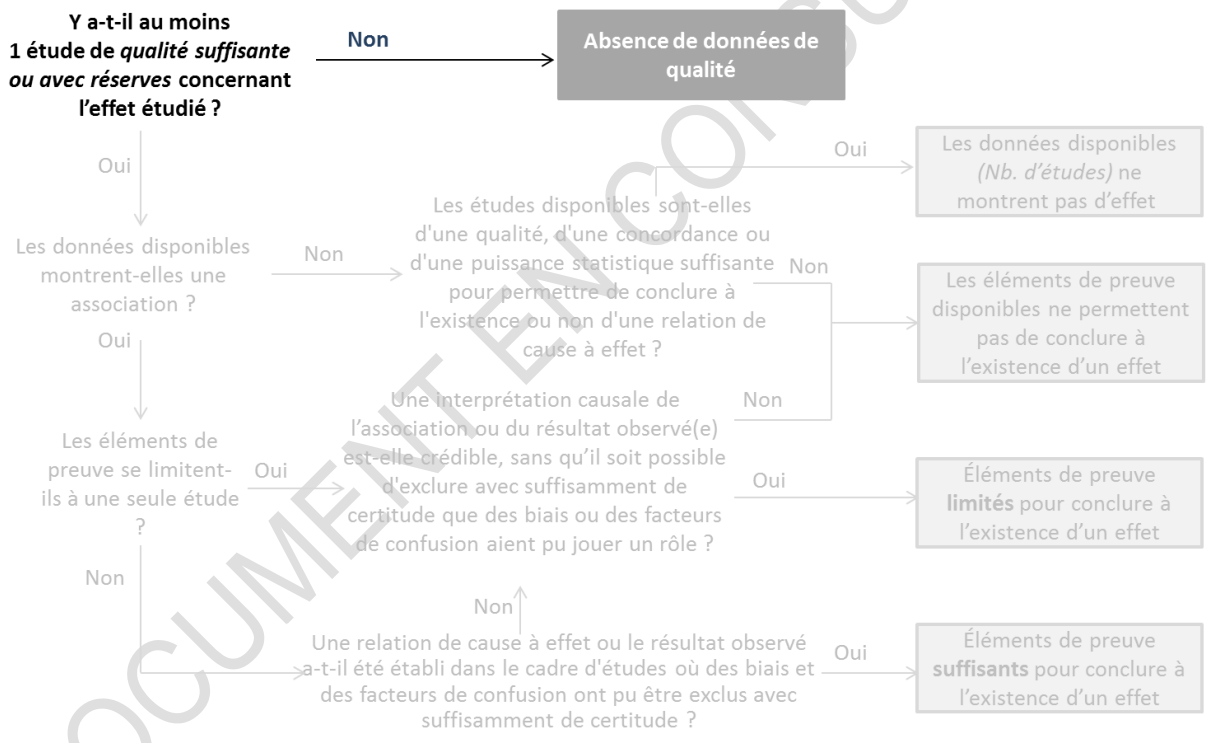
7 Les 3 autres études ne montrent pas d'effet de l'exposition aux signaux Wi-Fi sur le système
 8 immunitaire, que l'exposition survienne avant ou après la naissance. Les études sont rigoureuses
 9 et bien menées (Figure 62).

10 Par conséquent, chez l'animal, les éléments de preuve **disponibles ne permettent pas de**
 11 **conclure à l'existence d'un effet** sur le système immunitaire.

12 En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un**
 13 **effet sanitaire sur le système immunitaire** chez l'enfant (Figure 63).

14

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve



15
 16
 17

Figure 61 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au système immunitaire dans les études épidémiologiques

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve

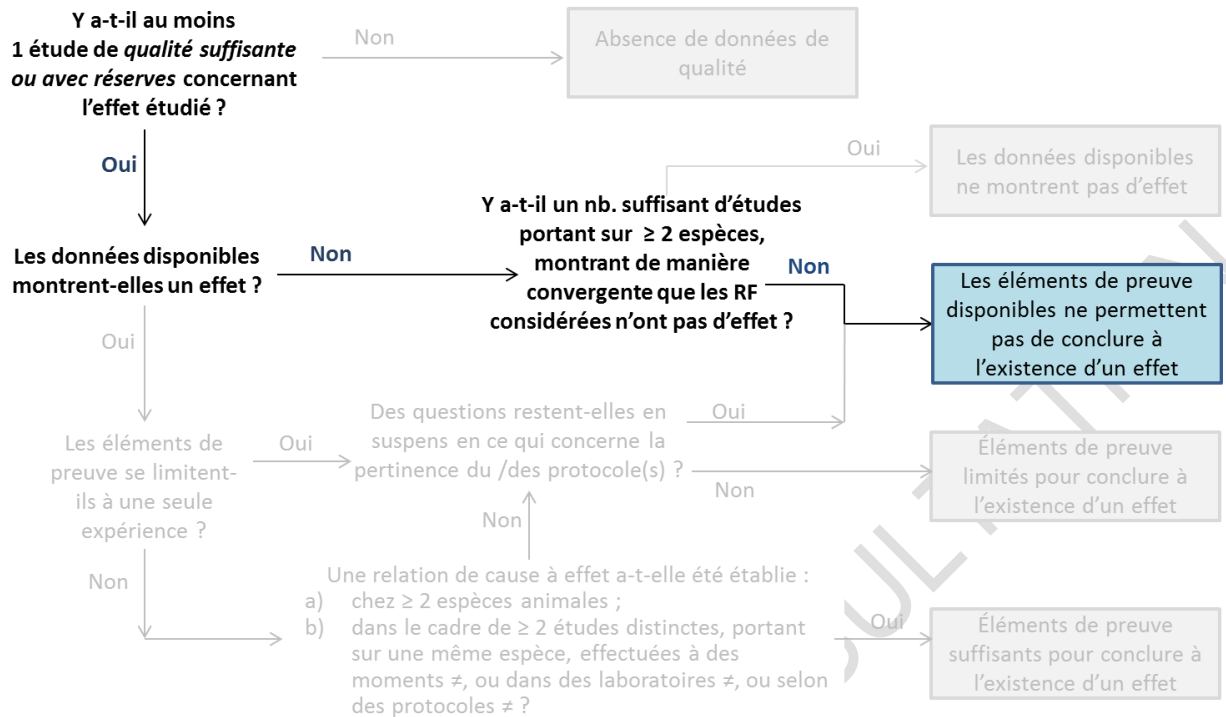


Figure 62 : Évaluation des éléments de preuve relatifs au système immunitaire dans les études sur les modèles animaux

1
2
3
4

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'enfant				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'enfant	Effet possible pour l'enfant			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'enfant	Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			
	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié				
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'enfant

Figure 63 : Évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le système immunitaire chez l'enfant

5
6
7

1 5.8.2 Toxicité systémique

2 Jin *et al.* (2011) ont suivi des rats Sprague-Dawley (50 % de mâles et 50 % de femelles, n = 20 par
3 groupe). Les animaux, âgés de 5 semaines, ont été exposés à des radiofréquences (signal de type
4 CDMA à 849 MHz et W-CDMA à 1,95 GHz simultanément, DAS de 2,0 W/kg chacun, soit un total
5 de 4 W/kg) pendant 45 min / j, 5 jours par semaine pendant 1 an. Le poids du corps et des
6 organes a été mesuré à la fin de l'exposition. Des analyses urinaires, hématologiques,
7 biochimiques, ainsi qu'un examen histopathologique de la majorité des organes ont été réalisés
8 (cerveau, thymus, cœur, foie, rate, rein, ovaires, testicules, ganglions lymphatiques). Les résultats
9 suggèrent qu'une co-exposition chronique aux radiofréquences CDMA et W-CDMA n'accroît pas
10 les maladies chroniques chez le rat, bien que certains paramètres hématologiques et biochimiques
11 soient modifiés, mais n'ont pas été considérées par les auteurs comme liés à l'exposition aux
12 radiofréquences.

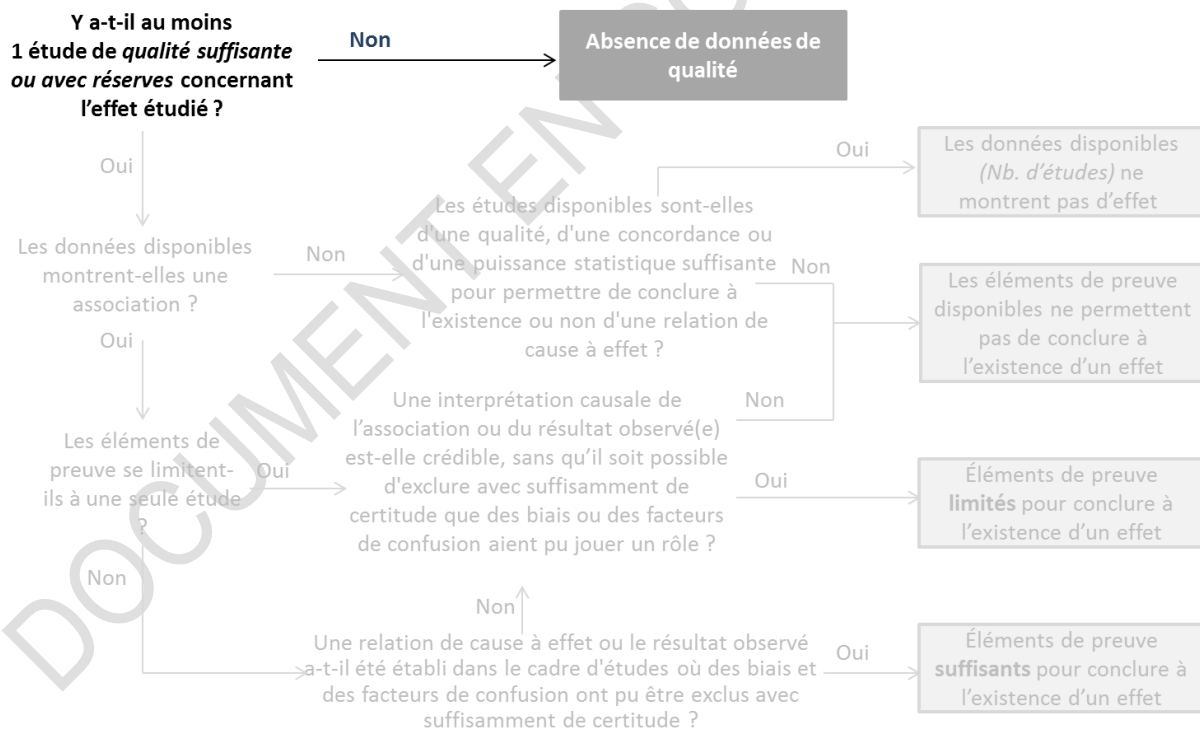
13 5.8.2.1 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur la toxicité 14 systémique

15 Chez l'enfant, les données sont **inexistantes** (Figure 64).

16 Chez l'animal, **les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à**
17 **l'existence d'un effet** (Figure 65).

18 En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'une**
19 **toxicité systémique** chez l'enfant (Figure 66).

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve



20 Figure 64 : Évaluation des éléments de preuve relatifs à la toxicité systémique dans les études
21 épidémiologiques
22

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve

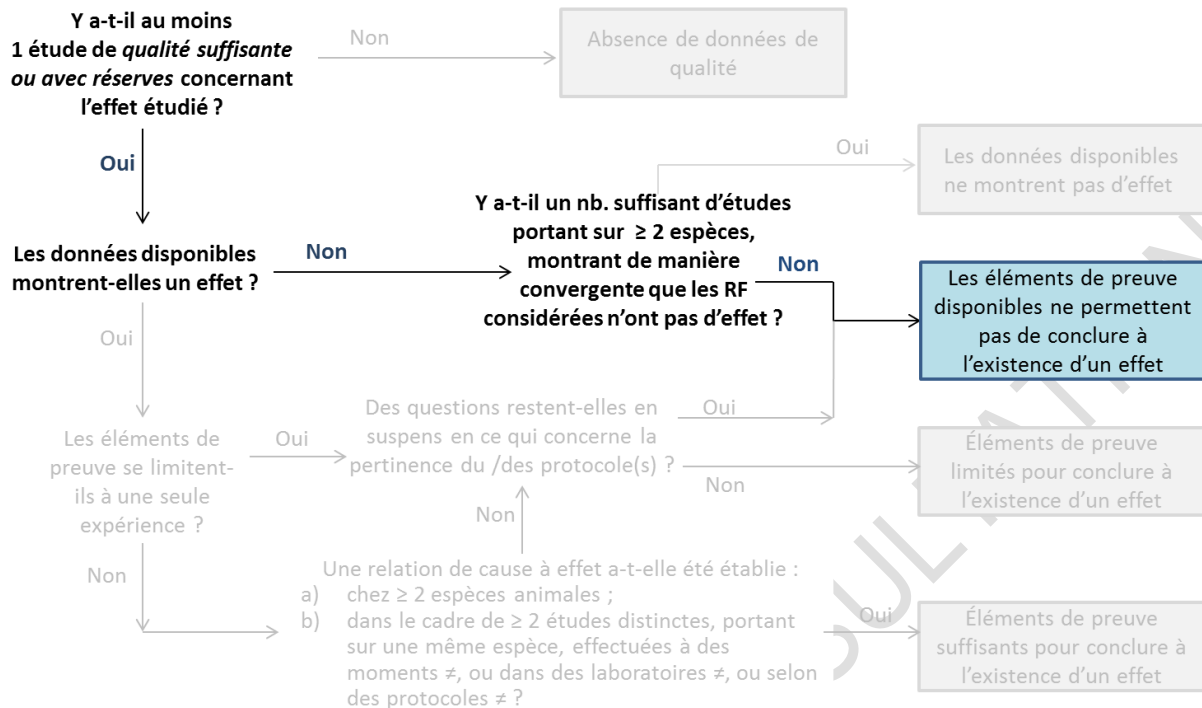


Figure 65 : Évaluation des éléments de preuve relatifs à la toxicité systémique dans les études sur les modèles animaux

1
2
3
4

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'enfant				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'enfant	Effet possible pour l'enfant			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'enfant				
	Absence de données de qualité		Les données disponibles ne permettent pas de montrer l'existence de l'effet étudié			
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'enfant

Figure 66 : Évaluation globale de l'effet systémique des radiofréquences chez l'enfant

5
6
7

1
2
Tableau 29 : Études investiguant la toxicité systémique. Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
Shirai <i>et al.</i> , 2005 et 2007	TDMA (1 439 MHz) ou W-CDMA (1 950 MHz) DAS = 0,67 et 2 W/kg 90 min/jour, 5 j/semaine, pendant 104 semaines	Rat De l'âge de 5 semaines pendant 2 ans	Effet cancérogène et co-cancérogène avec l'administration d'un initiateur de tumeur (ENU)	100 animaux par groupe	Aucun effet sur la prise alimentaire
Sommer <i>et al.</i> , 2009	UMTS 1 966 MHz DAS = 0 ; 0,08 ; 0,4 et 1,3 W/kg 24 h/24 ; vie entière	Souris C57BL Naissance	Quantification de la prise alimentaire	128 mâles et 256 femelles	Moindre consommation de nourriture chez les animaux exposés, mais pas de diminution de consommation d'eau
Pelletier <i>et al.</i> , 2012	GSM 900 MHz DAS de 0,3 mW/kg à 0,1 mW/kg en fonction de la croissance de l'animal 24°C et 31°C 6 semaines	Rat 3 semaines	Équilibre entre le sommeil, la régulation de température corporelle et la prise alimentaire	8 animaux par groupe	À 24°C, aucune différence de croissance et de prise alimentaire entre les exposés et les non exposés. À 31°C, diminution significative de la prise alimentaire chez les exposés
Poullietier de Gannes <i>et al.</i> , 2012	Wi-Fi 2 450 MHz DAS = 0,08, 0,4 et 4 W/kg 2 h/jour, 6 j/semaine, pendant 18 jours (GD2 – GD 20)	Rat <i>in utero</i>	Effets tératogènes Développement néonatal	15 mères par groupe	Augmentation de la consommation de nourriture pendant la lactation chez les mères exposées à 0,4 W/kg, sans conséquence pour le développement néonatal

6 Bibliographie

6.1 Publications

- 1
2
3 Abramson, M.J., Benke, G.P., Dimitriadis, C., Inyang, I.O., Sim, M.R., Wolfe, R.S. and Croft, R.J.,
4 (2009) Mobile telephone use is associated with changes in cognitive function in young
5 adolescents. *Bioelectromagnetics* **30**, 678–686.
- 6 Ackerman, M.J., (1998) The Visible Human Project: a resource for anatomical visualization. *Stud*
7 *Health Technol Inform* **52 Pt 2**, 1030–1032.
- 8 Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement (Afsse), (2005) Téléphonie mobile et
9 santé.
- 10 Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset), (2009) Les
11 radiofréquences : mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences.
- 12 Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses),
13 (2013) Radiofréquences et santé (No. 978-2-11-138450-7).
- 14 Aït-Aïssa, S., Billaudel, B., De Gannes, F.P., Hurtier, A., Haro, E., Taxile, M., Ruffie, G., Athane,
15 A., Veyret, B. and Lagroye, I., (2010) In situ detection of gliosis and apoptosis in the brains
16 of young rats exposed in utero to a Wi-Fi signal. *Comptes Rendus Physique* **11**, 592–601.
- 17 Aït-Aïssa, S., Billaudel, B., Poulletier de Gannes, F., Ruffié, G., Duleu, S., Hurtier, A., Haro, E.,
18 Taxile, M., Athané, A., Geffard, M., Wu, T., Wiart, J., Bodet, D., Veyret, B. and Lagroye, I.,
19 (2012) In utero and early-life exposure of rats to a Wi-Fi signal: screening of immune
20 markers in sera and gestational outcome. *Bioelectromagnetics* **33**, 410–420.
- 21 Aït-Aïssa, S., de Gannes, F.P., Taxile, M., Billaudel, B., Hurtier, A., Haro, E., Ruffié, G., Athané, A.,
22 Veyret, B. and Lagroye, I., (2013) *In Situ* Expression of Heat-Shock Proteins and 3-
23 Nitrotyrosine in Brains of Young Rats Exposed to a WiFi Signal *In Utero* and In Early Life.
24 *Radiation Research* **179**, 707–716.
- 25 Aldad, T.S., Gan, G., Gao, X.-B. and Taylor, H.S., (2012) Fetal Radiofrequency Radiation
26 Exposure From 800-1900 Mhz-Rated Cellular Telephones Affects Neurodevelopment and
27 Behavior in Mice. *Sci Rep* **2**.
- 28 Alling, C., (1985) Biochemical maturation of the brain and the concept of vulnerable periods, in:
29 *Alcohol and the Developing Brain*. Raven Press New York, pp. 5–10.
- 30 Ammari, M., Gamez, C., Lecomte, A., Sakly, M., Abdelmelek, H. and De Seze, R., (2010) GFAP
31 expression in the rat brain following sub-chronic exposure to a 900 MHz electromagnetic
32 field signal. *Int. J. Radiat. Biol.* **86**, 367–375.
- 33 Anderson, V., (2003) Comparisons of peak SAR levels in concentric sphere head models of
34 children and adults for irradiation by a dipole at 900 MHz. *Phys Med Biol* **48**, 3263–3275.
- 35 Atasoy, H.I., Gunal, M.Y., Atasoy, P., Elgun, S. and Bugdayci, G., (2013) Immunohistopathologic
36 demonstration of deleterious effects on growing rat testes of radiofrequency waves emitted
37 from conventional Wi-Fi devices. *Journal of Pediatric Urology* **9**, 223–229.
- 38 Aydin, D., Feychting, M., Schüz, J., Röösl, M. and \$author.lastName, \$author.firstName, (2012)
39 Childhood brain tumours and use of mobile phones: comparison of a case–control study
40 with incidence data. *Environmental Health* **11**, 35.
- 41 Aydin, D., Feychting, M., Schüz, J., Tynes, T., Andersen, T.V., Schmidt, L.S., Poulsen, A.H.,
42 Johansen, C., Prochazka, M., Lannering, B., Klæboe, L., Eggen, T., Jenni, D., Grotzer, M.,
43 Von der Weid, N., Kuehni, C.E. and Röösl, M., (2011) Mobile phone use and brain tumors
44 in children and adolescents: a multicenter case-control study. *J. Natl. Cancer Inst.* **103**,
45 1264–1276.
- 46 Bit-Babik, G., Guy, A.W., Chou, C.-K., Faraone, A., Kanda, M., Gessner, A., Wang, J. and
47 Fujiwara, O., (2005) Simulation of Exposure and SAR Estimation for Adult and Child Heads

- 1 Exposed to Radiofrequency Energy from Portable Communication Devices. *Radiation*
2 *Research* **163**, 580–590.
- 3 Bakker, J.F., Paulides, M.M., Christ, A., Kuster, N. and van Rhoon, G.C., (2010) Assessment of
4 induced SAR in children exposed to electromagnetic plane waves between 10 MHz and 5.6
5 GHz. *Phys Med Biol* **55**, 3115–3130.
- 6 Bakker, J.F., Paulides, M.M., Neufeld, E., Christ, A., Chen, X.L., Kuster, N. and van Rhoon, G.C.,
7 (2012) Children and adults exposed to low-frequency magnetic fields at the ICNIRP
8 reference levels: theoretical assessment of the induced electric fields. *Phys Med Biol* **57**,
9 1815–1829.
- 10 Baldi, I., Gruber, A., Alioum, A., Berteaud, E., Lebaillly, P., Huchet, A., Tourdias, T., Kantor, G.,
11 Maire, J.P., Vital, A., Loiseau, H., Champeaux, K., Dhauteribes, M., Eimer, S., Gimbert, E.,
12 Liguoro, D., Monteil, P., Penchet, G., San-Galli, F. and Vignes, J., (2011) Descriptive
13 epidemiology of CNS tumors in France: results from the Gironde Registry for the period
14 2000-2007. *Neuro Oncol* **13**, 1370–1378.
- 15 Bas, O., Odaci, E., Mollaoglu, H., Ucok, K. and Kaplan, S., (2009) Chronic prenatal exposure to the
16 900 megahertz electromagnetic field induces pyramidal cell loss in the hippocampus of
17 newborn rats. *Toxicol Ind Health* **25**, 377–384.
- 18 Beard, B.B., Kainz, W., Onishi, T., Iyama, T., Watanabe, S., Fujiwara, O., Wang, J., Bit-Babik, G.,
19 Faraone, A., Wiart, J., Christ, A., Kuster, N., Lee, A.-K., Kroeze, H., Siegbahn, M.,
20 Keshvari, J., Abrishamkar, H., Simon, W., Manteuffel, D. and Nikoloski, N., (2006)
21 Comparisons of computed mobile phone induced SAR in the SAM phantom to that in
22 anatomically correct models of the human head. *IEEE Transactions on Electromagnetic*
23 *Compatibility* **48**, 397–407.
- 24 Bennett, M.R., (2011) Schizophrenia: susceptibility genes, dendritic-spine pathology and gray
25 matter loss. *Progress in Neurobiology* **95**, 275–300.
- 26 Bianchi, A. and Phillips, J.G., (2005) Psychological predictors of problem mobile phone use.
27 *Cyberpsychol Behav* **8**, 39–51.
- 28 Böhler, E. and Schüz, J., (2004) Cellular telephone use among primary school children in
29 Germany. *European journal of epidemiology* **19**, 1043–1050.
- 30 Boice, J.D. and Tarone, R.E., (2011) Cell Phones, Cancer, and Children. *JNCI J Natl Cancer Inst*
31 **103**, 1211–1213.
- 32 Bouji, M., Lecomte, A., Hode, Y., de Seze, R. and Villégier, A.-S., (2012a) Effects of 900 MHz
33 radiofrequency on corticosterone, emotional memory and neuroinflammation in middle-
34 aged rats. *Experimental Gerontology* **47**, 444–451.
- 35 Bouji, M., Lecomte, A., Hode, Y., de Seze, R. and Villégier, A.-S., (2012b) Effects of 900 MHz
36 radiofrequency on corticosterone, emotional memory and neuroinflammation in middle-
37 aged rats. *Exp. Gerontol.* **47**, 444–451.
- 38 Brillaud, E., Piotrowski, A. and de Seze, R., (2007) Effect of an acute 900MHz GSM exposure on
39 glia in the rat brain: a time-dependent study. *Toxicology* **238**, 23–33.
- 40 Budak, G.G., Muluk, N.B., Budak, B., Oztürk, G.G., Apan, A. and Seyhan, N., (2009) Effects of
41 GSM-like radiofrequency on distortion product otoacoustic emissions of rabbits: comparison
42 of infants versus adults. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* **73**, 1143–1147.
- 43 Budak, G.G., Muluk, N.B., Budak, B., Öztürk, G.G., Apan, A. and Seyhan, N., (2009) Effects of
44 intrauterine and extrauterine exposure to GSM-like radiofrequency on distortion product
45 otoacoustic emissions in infant male rabbits. *International Journal of Pediatric*
46 *Otorhinolaryngology* **73**, 391–399.
- 47 Van den Bulck, J., (2007) Adolescent Use of Mobile Phones for Calling and for Sending Text
48 Messages After Lights Out: Results from a Prospective Cohort Study with a One-Year
49 Follow-Up. *Sleep* **30**, 1220–1223.

- 1 Byun, Y.-H., Ha, M., Kwon, H.-J., Hong, Y.-C., Leem, J.-H., Sakong, J., Kim, S.Y., Lee, C.G.,
2 Kang, D., Choi, H.-D. and Kim, N., (2013) Mobile Phone Use, Blood Lead Levels, and
3 Attention Deficit Hyperactivity Symptoms in Children: A Longitudinal Study. *PLoS ONE* **8**,
4 e59742.
- 5 Carrubba, S., Frilot, C., Chesson, A.L. and Marino, A.A., (2010) Mobile-phone pulse triggers
6 evoked potentials. *Neurosci. Lett.* **469**, 164–168.
- 7 Casey, B.J., Jones, R.M. and Hare, T.A., (2008) The Adolescent Brain. *Ann N Y Acad Sci* **1124**,
8 111–126.
- 9 Christ, A., Gosselin, M.-C., Christopoulou, M., Kühn, S. and Kuster, N., (2010) Age-dependent
10 tissue-specific exposure of cell phone users. *Phys Med Biol* **55**, 1767–1783.
- 11 Christ, A., Gosselin, M.-C., Kühn, S. and Kuster, N., (2010) Impact of pinna compression on the RF
12 absorption in the heads of adult and juvenile cell phone users. *Bioelectromagnetics* **31**,
13 406–412.
- 14 Christ, A., Kainz, W., Hahn, E.G., Honegger, K., Zefferer, M., Neufeld, E., Rascher, W., Janka, R.,
15 Bautz, W., Chen, J., Kiefer, B., Schmitt, P., Hollenbach, H.-P., Shen, J., Oberle, M.,
16 Szczerba, D., Kam, A., Guag, J.W. and Kuster, N., (2010) The Virtual Family--development
17 of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric
18 simulations. *Phys Med Biol* **55**, N23–38.
- 19 Christ, A. and Kuster, N., (2005) Differences in RF energy absorption in the heads of adults and
20 children. *Bioelectromagnetics* **26**, S31–S44.
- 21 Christ, A., Samaras, T., Neufeld, E., Klingeböck, A. and Kuster, N., (2007) SAR distribution in
22 human beings when using body-worn RF transmitters. *Radiat Prot Dosimetry* **124**, 6–14.
- 23 Chugani, H.T. and Phelps, M.E., (1986) Maturational changes in cerebral function in infants
24 determined by 18FDG positron emission tomography. *Science* **231**, 840–843.
- 25 Chugani, H.T., Phelps, M.E. and Mazziotta, J.C., (1987) Positron emission tomography study of
26 human brain functional development. *Ann. Neurol.* **22**, 487–497.
- 27 Cobb, B.L., Jauchem, J.R., Mason, P.A., Dooley, M.P., Miller, S.A., Zirriax, J.M. and Murphy, M.R.,
28 (2000) Neural and behavioral teratological evaluation of rats exposed to ultra-wideband
29 electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics* **21**, 524–537.
- 30 Cole, K.S. and Cole, R.H., (1941) Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current
31 Characteristics. *The Journal of Chemical Physics* **9**, 341–351.
- 32 Conil, E., Hadjem, A., Lacroux, F., Wong, M.F. and Wiart, J., (2008) Variability analysis of SAR
33 from 20 MHz to 2.4 GHz for different adult and child models using finite-difference time-
34 domain. *Phys Med Biol* **53**, 1511–1525.
- 35 CREDOC, (Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie), (2013) La
36 diffusion des technologies de l'information et de la communication dans la société
37 française (2013). CREDOC.
- 38 Croft, R.J., Leung, S., McKenzie, R.J., Loughran, S.P., Iskra, S., Hamblin, D.L. and Cooper, N.R.,
39 (2010) Effects of 2G and 3G mobile phones on human alpha rhythms: Resting EEG in
40 adolescents, young adults, and the elderly. *Bioelectromagnetics* **31**, 434–444.
- 41 Daniels, W.M.U., Pitout, I.L., Afullo, T.J.O. and Mabandla, M.V., (2009) The effect of
42 electromagnetic radiation in the mobile phone range on the behaviour of the rat. *Metab*
43 *Brain Dis* **24**, 629–641.
- 44 Darki, F. and Klingberg, T., (2014) The Role of Fronto-Parietal and Fronto-Striatal Networks in the
45 Development of Working Memory: A Longitudinal Study. *Cereb. Cortex*.
- 46 Davie, R., Panting, C. and Charlton, T., (2004) Mobile phone ownership and usage among pre-
47 adolescents. *Telematics and Informatics* **21**, 359–373.

- 1 Dhungel, A., Zmirou-Navier, D. and Deventer, E. van, (2014) Risk Management Policies and
2 Practices Regarding Radio Frequency Electromagnetic Fields: Results from a Who Survey.
3 Radiat Prot Dosimetry ncu324.
- 4 Dimbylow, P., (2005) Resonance behaviour of whole-body averaged specific energy absorption
5 rate (SAR) in the female voxel model, NAOMI. Phys Med Biol **50**, 4053–4063.
- 6 Dimbylow, P., (2006) Development of pregnant female, hybrid voxel-mathematical models and
7 their application to the dosimetry of applied magnetic and electric fields at 50 Hz. Phys Med
8 Biol **51**, 2383–2394.
- 9 Dimbylow, P., (2007) SAR in the mother and foetus for RF plane wave irradiation. Phys Med Biol
10 **52**, 3791–3802.
- 11 Dimbylow, P. and Bolch, W., (2007) Whole-body-averaged SAR from 50 MHz to 4 GHz in the
12 University of Florida child voxel phantoms. Phys Med Biol **52**, 6639–6649.
- 13 Dimbylow, P., Bolch, W. and Lee, C., (2010) SAR calculations from 20 MHz to 6 GHz in the
14 University of Florida newborn voxel phantom and their implications for dosimetry. Phys Med
15 Biol **55**, 1519–1530.
- 16 Dimbylow, P.J., (1997) FDTD calculations of the whole-body averaged SAR in an anatomically
17 realistic voxel model of the human body from 1 MHz to 1 GHz. Phys Med Biol **42**, 479–490.
- 18 Dimbylow, P.J., Nagaoka, T. and Xu, X.G., (2009) A comparison of foetal SAR in three sets of
19 pregnant female models. Phys Med Biol **54**, 2755–2767.
- 20 Divan, H.A., Kheifets, L., Obel, C. and Olsen, J., (2008) Prenatal and postnatal exposure to cell
21 phone use and behavioral problems in children. Epidemiology **19**, 523–529.
- 22 Divan, H.A., Kheifets, L., Obel, C. and Olsen, J., (2010) Cell phone use and behavioural problems
23 in young children. J Epidemiol Community Health **66**, 524–529.
- 24 Divan, H.A., Kheifets, L. and Olsen, J., (2011) Prenatal cell phone use and developmental
25 milestone delays among infants. Scand J Work Environ Health **37**, 341–348.
- 26 Dobbing, J., (1971) Undernutrition and the developing brain: the use of animal models to elucidate
27 the human problem. Psychiatr Neurol Neurochir **74**, 433–442.
- 28 Elliott, P., Toledano, M.B., Bennett, J., Beale, L., de Hoogh, K., Best, N. and Briggs, D.J., (2010)
29 Mobile phone base stations and early childhood cancers: case-control study. BMJ **340**,
30 c3077–c3077.
- 31 Eurobaromètre, (2008) Towards a safer use of the Internet for children in the EU – a parents'
32 perspective.
- 33 Fernandez, C.R., Bulla, G., Pedra, A.C. and De Salles, A.A.A., (2005) Comparison of
34 electromagnetic absorption characteristics in the head of adult and a children for 1800 MHz
35 mobile phones. Presented at the 2005 SBMO/IEEE MTT-S International Conference on
36 Microwave and Optoelectronics, pp. 523–528.
- 37 Findlay, R.P. and Dimbylow, P.J., (2010) SAR in a child voxel phantom from exposure to wireless
38 computer networks (Wi-Fi). Phys Med Biol **55**, N405–411.
- 39 Findlay, R.P., Lee, A.-K. and Dimbylow, P.J., (2009) FDTD calculations of SAR for child voxel
40 models in different postures between 10 MHz and 3 GHz. Radiat Prot Dosimetry **135**, 226–
41 231.
- 42 Finlay, B.L. and Darlington, R.B., (1995) Linked regularities in the development and evolution of
43 mammalian brains. Science **268**, 1578–1584.
- 44 Finnie, J.W., Blumbergs, P.C., Cai, Z., Manavis, J. and Kuchel, T.R., (2006a) Neonatal mouse
45 brain exposure to mobile telephony and effect on blood-brain barrier permeability.
46 Pathology **38**, 262–263.
- 47 Finnie, J.W., Blumbergs, P.C., Cai, Z., Manavis, J. and Kuchel, T.R., (2006b) Effect of mobile
48 telephony on blood-brain barrier permeability in the fetal mouse brain. Pathology **38**, 63–65.

- 1 Finnie, J.W., Blumbergs, P.C., Manavis, J., Utteridge, T.D., Gebiski, V., Davies, R.A., Vernon-
2 Roberts, B. and Kuchel, T.R., (2002) Effect of long-term mobile communication microwave
3 exposure on vascular permeability in mouse brain. *Pathology* **34**, 344–347.
- 4 Finnie, J.W., Chidlow, G., Blumbergs, P.C., Manavis, J. and Cai, Z., (2009) Heat shock protein
5 induction in fetal mouse brain as a measure of stress after whole of gestation exposure to
6 mobile telephony radiofrequency fields. *Pathology* **41**, 276–279.
- 7 Fragopoulou, A.F., Koussoulakos, S.L. and Margaritis, L.H., (2010) Cranial and postcranial skeletal
8 variations induced in mouse embryos by mobile phone radiation. *Pathophysiology* **17**, 169–
9 177.
- 10 Gabriel, C., (1996) Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave
11 Frequencies. King's College, London, Department of Physics.
- 12 Gabriel, C., (2005) Dielectric properties of biological tissue: variation with age. *Bioelectromagnetics*
13 **Suppl 7**, S12–18.
- 14 Gandhi, O.P. and Kang, G., (2001) Calculation of induced current densities for humans by
15 magnetic fields from electronic article surveillance devices. *Phys Med Biol* **46**, 2759–2771.
- 16 Gandhi, O.P., Lazzi, G. and Furse, C.M., (1996) Electromagnetic absorption in the human head
17 and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz. *IEEE Transactions on Microwave*
18 *Theory and Techniques* **44**, 1884–1897.
- 19 Giedd, J.N., Blumenthal, J., Jeffries, N.O., Rajapakse, J.C., Vaituzis, A.C., Liu, H., Berry, Y.C.,
20 Tobin, M., Nelson, J. and Castellanos, F.X., (1999) Development of the human corpus
21 callosum during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Prog.*
22 *Neuropsychopharmacol. Biol. Psychiatry* **23**, 571–588.
- 23 Giedd, J.N. and Rapoport, J.L., (2010) Structural MRI of pediatric brain development: what have
24 we learned and where are we going? *Neuron* **67**, 728–734.
- 25 Gogtay, N., Giedd, J.N., Lusk, L., Hayashi, K.M., Greenstein, D., Vaituzis, A.C., Nugent, T.F.,
26 Herman, D.H., Clasen, L.S., Toga, A.W., Rapoport, J.L. and Thompson, P.M., (2004)
27 Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early
28 adulthood. *Proc Natl Acad Sci U S A* **101**, 8174–8179.
- 29 Gogtay, N. and Thompson, P.M., (2010) Mapping Gray Matter Development: Implications for
30 typical development and vulnerability to psychopathology. *Brain Cogn* **72**, 6.
- 31 Goyal, M.S., Hawrylycz, M., Miller, J.A., Snyder, A.Z. and Raichle, M.E., (2014) Aerobic Glycolysis
32 in the Human Brain Is Associated with Development and Neotenus Gene Expression. *Cell*
33 *Metabolism* **19**, 49–57.
- 34 Gul, A., Celebi, H. and Uğraş, S., (2009) The effects of microwave emitted by cellular phones on
35 ovarian follicles in rats. *Arch. Gynecol. Obstet.* **280**, 729–733.
- 36 Güler, G., Tomruk, A., Ozgur, E. and Seyhan, N., (2010) The effect of radiofrequency radiation on
37 DNA and lipid damage in non-pregnant and pregnant rabbits and their newborns. *Gen.*
38 *Physiol. Biophys.* **29**, 59–66.
- 39 Guxens, M., Eijdsen, M. van, Vermeulen, R., Loomans, E., Vrijkotte, T.G.M., Komhout, H., Strien,
40 R.T. van and Huss, A., (2013) Maternal cell phone and cordless phone use during
41 pregnancy and behaviour problems in 5-year-old children. *J Epidemiol Community Health*
42 **67**, 432–438.
- 43 Guxens, M., Vermeulen, R. and Huss, A., (2013) Reply to “on the association of cell phone
44 exposure with childhood behaviour” by Sudan et al. *J Epidemiol Community Health* **67**,
45 980–980.
- 46 Ha, M., Im, H., Lee, M., Kim, H.J., Kim, B.-C., Gimm, Y.-M. and Pack, J.-K., (2007) Radio-
47 frequency radiation exposure from AM radio transmitters and childhood leukemia and brain
48 cancer. *Am. J. Epidemiol.* **166**, 270–279.

- 1 Haarala, C., Bergman, M., Laine, M., Revonsuo, A., Koivisto, M. and Hämäläinen, H., (2005)
2 Electromagnetic field emitted by 902 MHz mobile phones shows no effects on children's
3 cognitive function. *Bioelectromagnetics Suppl 7*, S144–150.
- 4 Hadjem, A., Lautru, D., Dale, C., Wong, M.-F., Hanna, V.F. and Wiart, J., (2005) Study of specific
5 absorption rate (SAR) induced in two child head models and in adult heads using mobile
6 phones. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **53**, 4–11.
- 7 Hand, J.W., Li, Y., Thomas, E.L., Rutherford, M.A. and Hajnal, J.V., (2006) Prediction of specific
8 absorption rate in mother and fetus associated with MRI examinations during pregnancy.
9 *Magn Reson Med* **55**, 883–893.
- 10 Hao, D., Yang, L., Chen, S., Tong, J., Tian, Y., Su, B., Wu, S. and Zeng, Y., (2013) Effects of long-
11 term electromagnetic field exposure on spatial learning and memory in rats. *Neurol. Sci.* **34**,
12 157–164.
- 13 Hauri, D.D., Spycher, B., Huss, A., Zimmermann, F., Grotzer, M., Weid, N. von der, Spoerri, A.,
14 Kuehni, C.E. and Rössli, M., (2014) Exposure to Radio-Frequency Electromagnetic Fields
15 From Broadcast Transmitters and Risk of Childhood Cancer: A Census-based Cohort
16 Study. *Am. J. Epidemiol.* kwt442.
- 17 Health Council of the Netherlands, (2011) Influence of radiofrequency telecommunication signals
18 on children's brains. Health Council of the Netherlands, The Hague.
- 19 Health Protection Agency (HPA), (2012) Health effects from radiofrequency electromagnetic fields.
- 20 Heinrich, S., Thomas, S., Heumann, C., von Kries, R. and Radon, K., (2010) Association between
21 exposure to radiofrequency electromagnetic fields assessed by dosimetry and acute
22 symptoms in children and adolescents: a population based cross-sectional study. *Environ*
23 *Health* **9**, 75.
- 24 Heynick, L.N. and Merritt, J.H., (2003) Radiofrequency fields and teratogenesis.
25 *Bioelectromagnetics Suppl 6*, S174–186.
- 26 Hirata, A., Asano, T. and Fujiwara, O., (2007) FDTD analysis of human body-core temperature
27 elevation due to RF far-field energy prescribed in the ICNIRP guidelines. *Phys Med Biol* **52**,
28 5013–5023.
- 29 Hirata, A., Ito, N. and Fujiwara, O., (2009) Influence of electromagnetic polarization on the whole-
30 body averaged SAR in children for plane-wave exposures. *Phys Med Biol* **54**, N59–65.
- 31 Huttenlocher, P.R., (1979) Synaptic density in human frontal cortex - developmental changes and
32 effects of aging. *Brain Res.* **163**, 195–205.
- 33 Huttenlocher, P.R. and Dabholkar, A.S., (1997) Regional differences in synaptogenesis in human
34 cerebral cortex. *J. Comp. Neurol.* **387**, 167–178.
- 35 Ibrani, M., Ahma, L., Hamiti, E. and Haxhibeqiri, J., (2011) Derivation of Electromagnetic Properties
36 of Child Biological Tissues at Radio Frequencies. *Progress In Electromagnetics Research*
37 *Letters* **25**, 87–100.
- 38 Imai, N., Kawabe, M., Hikage, T., Nojima, T., Takahashi, S. and Shirai, T., (2011) Effects on rat
39 testis of 1.95-GHz W-CDMA for IMT-2000 cellular phones. *Syst Biol Reprod Med* **57**, 204–
40 209.
- 41 Imge, E.B., Kiliçoğlu, B., Devrim, E., Cetin, R. and Durak, I., (2010) Effects of mobile phone use on
42 brain tissue from the rat and a possible protective role of vitamin C - a preliminary study.
43 *Int. J. Radiat. Biol.* **86**, 1044–1049.
- 44 Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), (2011) Reproduction et
45 environnement. Les éditions Inserm.
- 46 Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des
47 maladies professionnelles (INRS), (2001) Guide pour l'établissement de limites d'exposition
48 aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques. Champs alternatifs (de

- 1 fréquence variable dans le temps, jusqu'à 300 GHz), in: Cahiers de Notes Documentaires -
2 Hygiène et Sécurité Du Travail.
- 3 Inyang, I., Benke, G., McKenzie, R., Wolfe, R. and Abramson, M.J., (2010) A new method to
4 determine laterality of mobile telephone use in adolescents. *Occup Environ Med* **67**, 507–
5 512.
- 6 Inyang, I., Benke, G., Morrissey, J., McKenzie, R. and Abramson, M., (2009) How well do
7 adolescents recall use of mobile telephones? Results of a validation study. *BMC Med Res*
8 *Methodol* **9**, 36.
- 9 Jin, Y.-B., Lee, H.-J., Seon Lee, J., Pack, J.-K., Kim, N. and Lee, Y.-S., (2011) One-year,
10 simultaneous combined exposure of CDMA and WCDMA radiofrequency electromagnetic
11 fields to rats. *Int. J. Radiat. Biol.* **87**, 416–423.
- 12 Juutilainen, J., (2005) Developmental effects of electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics Suppl*
13 **7**, S107–115.
- 14 Kainz, W., Chan, D.D., Casamento, J.P. and Bassen, H.I., (2003) Calculation of induced current
15 densities and specific absorption rates (SAR) for pregnant women exposed to hand-held
16 metal detectors. *Phys Med Biol* **48**, 2551–2560.
- 17 Kesari, K.K., Behari, J. and Kumar, S., (2010) Mutagenic response of 2.45 GHz radiation exposure
18 on rat brain. *Int. J. Radiat. Biol.* **86**, 334–343.
- 19 Kesari, K.K., Kumar, S. and Behari, J., (2011) 900-MHz microwave radiation promotes oxidation in
20 rat brain. *Electromagn Biol Med* **30**, 219–234.
- 21 Kesari, K.K., Kumar, S. and Behari, J., (2012) Pathophysiology of microwave radiation: effect on
22 rat brain. *Appl. Biochem. Biotechnol.* **166**, 379–388.
- 23 Keshvari, J. and Lang, S., (2005) Comparison of radio frequency energy absorption in ear and eye
24 region of children and adults at 900, 1800 and 2450 MHz. *Phys Med Biol* **50**, 4355–4369.
- 25 Kim, C.H., Choi, S.H., Jeong, J.H., Lee, C. and Chung, M.S., (2008) HDRK-Man: a whole-body
26 voxel model based on high-resolution color slice images of a Korean adult male cadaver.
27 *Physics in Medicine and Biology* **53**, 4093–4106.
- 28 Knickmeyer, R.C., Gouttard, S., Kang, C., Evans, D., Wilber, K., Smith, J.K., Hamer, R.M., Lin, W.,
29 Gerig, G. and Gilmore, J.H., (2008) A Structural MRI Study of Human Brain Development
30 from Birth to 2 Years. *J Neurosci* **28**, 12176–12182.
- 31 Kramer, A., Kuhn, S., Lott, U. and Kuster, N., (2005) Development of Procedures for the
32 Assessment of Human Exposure to EMF from Wireless Devices in Home and Office
33 Environments (No. 03.001524). It's Foundation.
- 34 Krause, C.M., Björnberg, C.H., Pesonen, M., Hulten, A., Liesivuori, T., Koivisto, M., Revonsuo, A.,
35 Laine, M. and Hämäläinen, H., (2006) Mobile phone effects on children's event-related
36 oscillatory EEG during an auditory memory task. *International Journal of Radiation Biology*
37 **82**, 443–450.
- 38 Kühn, S., Cabot, E., Christ, A., Capstick, M. and Kuster, N., (2009) Assessment of the radio-
39 frequency electromagnetic fields induced in the human body from mobile phones used with
40 hands-free kits. *Phys Med Biol* **54**, 5493–5508.
- 41 Kühnlein, A., Heumann, C., Thomas, S., Heinrich, S. and Radon, K., (2009) Personal exposure to
42 mobile communication networks and well-being in children—A statistical analysis based on
43 a functional approach. *Bioelectromagnetics* **30**, 261–269.
- 44 Kumlin, T., Iivonen, H., Miettinen, P., Juvonen, A., van Groen, T., Puranen, L., Pitkäaho, R.,
45 Juutilainen, J. and Tanila, H., (2007) Mobile phone radiation and the developing brain:
46 behavioral and morphological effects in juvenile rats. *Radiat. Res.* **168**, 471–479.
- 47 Kundi, M., (2011) Comments on de Vocht et al. "time trends (1998–2007) in brain cancer incidence
48 rates in relation to mobile phone use in England". *Bioelectromagnetics* **32**, 673–674.

- 1 Kuribayashi, M., Wang, J., Fujiwara, O., Doi, Y., Nabae, K., Tamano, S., Ogiso, T., Asamoto, M.
2 and Shirai, T., (2005) Lack of effects of 1439 MHz electromagnetic near field exposure on
3 the blood–brain barrier in immature and young rats. *Bioelectromagnetics* **26**, 578–588.
- 4 Kuzawa, C.W., Chugani, H.T., Grossman, L.I., Lipovich, L., Muzik, O., Hof, P.R., Wildman, D.E.,
5 Sherwood, C.C., Leonard, W.R. and Lange, N., (2014) Metabolic costs and evolutionary
6 implications of human brain development. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **111**, 13010–13015.
- 7 Kwon, M.S., Huotilainen, M., Shestakova, A., Kujala, T., Näätänen, R. and Hämäläinen, H., (2010)
8 No effects of mobile phone use on cortical auditory change-detection in children: an ERP
9 study. *Bioelectromagnetics* **31**, 191–199.
- 10 Laudisi, F., Sambucci, M., Nasta, F., Pinto, R., Lodato, R., Altavista, P., Lovisolo, G.A., Marino, C.
11 and Pioli, C., (2012) Prenatal exposure to radiofrequencies: effects of WiFi signals on
12 thymocyte development and peripheral T cell compartment in an animal model.
13 *Bioelectromagnetics* **33**, 652–661.
- 14 Lee, A., Choi, W.Y., Chung, M.S., Choi, H. and Choi, J., (2006) Development of Korean Male Body
15 Model for Computational Dosimetry. *ETRI Journal* **28**, 107–110.
- 16 Lee, A.-K., Choi, H.-D. and Choi, J.-I., (2007) Study on SARs in Head Models With Different
17 Shapes by Age Using SAM Model for Mobile Phone Exposure at 835 MHz. *IEEE*
18 *Transactions on Electromagnetic Compatibility* **49**, 302–312.
- 19 Lee, H.-J., Jin, Y.B., Kim, T.-H., Pack, J.-K., Kim, N., Choi, H.-D., Lee, J.-S. and Lee, Y.-S., (2012)
20 The effects of simultaneous combined exposure to CDMA and WCDMA electromagnetic
21 fields on rat testicular function. *Bioelectromagnetics* **33**, 356–364.
- 22 Lee, H.-J., Lee, J.-S., Pack, J.-K., Choi, H.-D., Kim, N., Kim, S.-H. and Lee, Y.-S., (2009) Lack of
23 teratogenicity after combined exposure of pregnant mice to CDMA and WCDMA
24 radiofrequency electromagnetic fields. *Radiat. Res.* **172**, 648–652.
- 25 Lee, H.-J., Pack, J.-K., Kim, T.-H., Kim, N., Choi, S.-Y., Lee, J.-S., Kim, S.-H. and Lee, Y.-S.,
26 (2010) The lack of histological changes of CDMA cellular phone-based radio frequency on
27 rat testis. *Bioelectromagnetics* **31**, 528–534.
- 28 Lenroot, R.K. and Giedd, J.N., (2006) Brain development in children and adolescents: Insights
29 from anatomical magnetic resonance imaging. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*,
30 *Methodological and Conceptual Advances in the Study of Brain-Behavior Dynamics: A*
31 *Multivariate Lifespan Perspective* **30**, 718–729.
- 32 Lenroot, R.K., Gogtay, N., Greenstein, D.K., Wells, E.M., Wallace, G.L., Clasen, L.S., Blumenthal,
33 J.D., Lerch, J., Zijdenbos, A.P., Evans, A.C., Thompson, P.M. and Giedd, J.N., (2007)
34 Sexual dimorphism of brain developmental trajectories during childhood and adolescence.
35 *NeuroImage* **36**, 1065–1073.
- 36 Leung, S., Croft, R.J., McKenzie, R.J., Iskra, S., Silber, B., Cooper, N.R., O'Neill, B., Cropley, V.,
37 Diaz-Trujillo, A., Hamblin, D. and Simpson, D., (2011) Effects of 2G and 3G mobile phones
38 on performance and electrophysiology in adolescents, young adults and older adults. *Clin*
39 *Neurophysiol* **122**, 2203–2216.
- 40 Loughran, S.P., Benz, D.C., Schmid, M.R., Murbach, M., Kuster, N. and Achermann, P., (2013) No
41 increased sensitivity in brain activity of adolescents exposed to mobile phone-like
42 emissions. *Clinical Neurophysiology* **124**, 1303–1308.
- 43 Lyaginskaja, A.M., Grigoriev, Y.G., Osipov, V.A., Grigoriev, O.A. and Shafirkin, A.V., (2010)
44 Autoimmune processes after long-term low-level exposure to electromagnetic fields
45 (experimental results) part 5. Study of the influence of blood serum from rats exposed to
46 low-level electromagnetic fields on pregnancy and fetal and offspring development.
47 *Biophysics* **55**, 1059–1066.
- 48 Maaroufi, K., Had-Aissouni, L., Melon, C., Sakly, M., Abdelmelek, H., Poucet, B. and Save, E.,
49 (2014) Spatial learning, monoamines and oxidative stress in rats exposed to 900 MHz
50 electromagnetic field in combination with iron overload. *Behav. Brain Res.* **258**, 80–89.

- 1 Martens, L. and Vermeeren, G., (2005) Electromagnetic dosimetry of the SAR for a walkie-talkie
2 set-up. XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science (URSI):
3 Programme Oral Presentations, (Vigyan Bhavan, New Delhi India).
- 4 Martínez-Búrdalo, M., Martín, A., Anguiano, M. and Villar, R., (2004) Comparison of FDTD-
5 calculated specific absorption rate in adults and children when using a mobile phone at 900
6 and 1800 MHz. *Phys. Med. Biol.* **49**, 345.
- 7 Maskey, D., Kim, M., Aryal, B., Pradhan, J., Choi, I.-Y., Park, K.-S., Son, T., Hong, S.-Y., Kim,
8 S.B., Kim, H.G. and Kim, M.J., (2010) Effect of 835 MHz radiofrequency radiation exposure
9 on calcium binding proteins in the hippocampus of the mouse brain. *Brain Research* **1313**,
10 232–241.
- 11 Maskey, D., Pradhan, J., Aryal, B., Lee, C.-M., Choi, I.-Y., Park, K.-S., Kim, S.B., Kim, H.G. and
12 Kim, M.J., (2010) Chronic 835-MHz radiofrequency exposure to mice hippocampus alters
13 the distribution of calbindin and GFAP immunoreactivity. *Brain Research* **1346**, 237–246.
- 14 Mason, P.A., Ziriak, J.M., Hurt, W.D., Walters, T.J., Ryan, K.L., Nelson, D.A., Smith, K.I. and
15 D'andrea, J.A., (2000) Recent Advancements in Dosimetry Measurements and Modeling,
16 in: Klauenberg, B.J., Miklavčič, D. (Eds.), *Radio Frequency Radiation Dosimetry and Its*
17 *Relationship to the Biological Effects of Electromagnetic Fields*. Springer Netherlands,
18 Dordrecht, pp. 141–155.
- 19 Matsuzawa, J., Matsui, M., Konishi, T., Noguchi, K., Gur, R.C., Bilker, W. and Miyawaki, T., (2001)
20 Age-related volumetric changes of brain gray and white matter in healthy infants and
21 children. *Cereb. Cortex* **11**, 335–342.
- 22 Merzenich, H., Schmiedel, S., Bennack, S., Brüggemeyer, H., Philipp, J., Blettner, M. and Schüz,
23 J., (2008) Childhood Leukemia in Relation to Radio Frequency Electromagnetic Fields in
24 the Vicinity of TV and Radio Broadcast Transmitters. *Am. J. Epidemiol.* **168**, 1169–1178.
- 25 Mezei, G., Benyi, M. and Muller, A., (2007) Mobile phone ownership and use among school
26 children in three Hungarian cities. *Bioelectromagnetics* **28**, 309–315.
- 27 Monniaux, D., Caraty, A., Clement, F., Dalbiès-Tran, R., Dupont, J., Fabre, S., Gérard, N.,
28 Mermillod, P., Monget, P. and Uzbekova, S., (2009) Développement folliculaire ovarien et
29 ovulation chez les mammifères. *Inra Prod. Anim* **22**, 59–76.
- 30 Morrison, J.H. and Hof, P.R., (1997) Life and death of neurons in the aging brain. *Science* **278**,
31 412–419.
- 32 Mortazavi, S.M.J., Atefi, M. and Kholghi, F., (2011) The Pattern of Mobile Phone Use and
33 Prevalence of Self-Reported Symptoms in Elementary and Junior High School Students in
34 Shiraz, Iran. *Iran J Med Sci* **36**, 96–103.
- 35 Nagaoka, T., Kunieda, E. and Watanabe, S., (2008) Proportion-corrected scaled voxel models for
36 Japanese children and their application to the numerical dosimetry of specific absorption
37 rate for frequencies from 30 MHz to 3 GHz. *Phys Med Biol* **53**, 6695–6711.
- 38 Nagaoka, T., Togashi, T., Saito, K., Takahashi, M., Ito, K., Ueda, T., Osada, H., Ito, H. and
39 Watanabe, S., (2006) An anatomically realistic voxel model of the pregnant woman and
40 numerical dosimetry for a whole-body exposure to RF electromagnetic fields. *Conf Proc*
41 *IEEE Eng Med Biol Soc* **1**, 5463–5467.
- 42 Nagaoka, T., Togashi, T., Saito, K., Takahashi, M., Ito, K. and Watanabe, S., (2007) An
43 anatomically realistic whole-body pregnant-woman model and specific absorption rates for
44 pregnant-woman exposure to electromagnetic plane waves from 10 MHz to 2 GHz. *Phys*
45 *Med Biol* **52**, 6731–6745.
- 46 Nagaoka, T., Watanabe, S., Sakurai, K., Kunieda, E., Watanabe, S., Taki, M. and Yamanaka, Y.,
47 (2004) Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult
48 males and females of average height and weight, and application of models to radio-
49 frequency electromagnetic-field dosimetry. *Phys. Med. Biol.* **49**, 1.

- 1 Nagy, Z., Westerberg, H. and Klingberg, T., (2004) Maturation of white matter is associated with
2 the development of cognitive functions during childhood. *J Cogn Neurosci* **16**, 1227–1233.
- 3 Narayanan, S.N., Kumar, R.S., Paval, J., Kedage, V., Bhat, M.S., Nayak, S. and Bhat, P.G., (2013)
4 Analysis of emotionality and locomotion in radio-frequency electromagnetic radiation
5 exposed rats. *Neurol. Sci.* **34**, 1117–1124.
- 6 Ogawa, K., Nabae, K., Wang, J., Wake, K., Watanabe, S., Kawabe, M., Fujiwara, O., Takahashi,
7 S., Ichihara, T., Tamano, S. and Shirai, T., (2009) Effects of gestational exposure to 1.95-
8 GHz W-CDMA signals for IMT-2000 cellular phones: Lack of embryotoxicity and
9 teratogenicity in rats. *Bioelectromagnetics* **30**, 205–212.
- 10 Orendáčová, J., Orendáč, M., Mojžiš, M., Labun, J., Martončíková, M., Saganová, K., Lievajová,
11 K., Blaško, J., Abdiová, H., Gálik, J. and Račková, E., (2011) Effects of short-duration
12 electromagnetic radiation on early postnatal neurogenesis in rats: Fos and NADPH-d
13 histochemical studies. *Acta Histochemica* **113**, 723–728.
- 14 Oshima, N., Nishida, A., Shimodera, S., Tochigi, M., Ando, S., Yamasaki, S., Okazaki, Y. and
15 Sasaki, T., (2012) The Suicidal Feelings, Self-Injury, and Mobile Phone Use After Lights
16 Out in Adolescents. *J. Pediatr. Psychol.* **37**, 1023–1030.
- 17 Ozlem Nisbet, H., Nisbet, C., Akar, A., Cevik, M. and Onder Karayigit, M., (2012) Effects of
18 exposure to electromagnetic field (1.8/0.9 GHz) on testicular function and structure in
19 growing rats. *Research in Veterinary Science* **93**, 1001–1005.
- 20 Paulraj, R. and Behari, J., (2006a) Single strand DNA breaks in rat brain cells exposed to
21 microwave radiation. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of*
22 *Mutagenesis* **596**, 76–80.
- 23 Paulraj, R. and Behari, J., (2006b) Protein kinase C activity in developing rat brain cells exposed to
24 2.45 GHz radiation. *Electromagn Biol Med* **25**, 61–70.
- 25 Paus, T., (2005) Mapping brain maturation and cognitive development during adolescence. *Trends*
26 *Cogn. Sci. (Regul. Ed.)* **9**, 60–68.
- 27 Pelletier, A., Delanaud, S., Décima, P., Thuroczy, G., de Seze, R., Cerri, M., Bach, V., Libert, J.-P.
28 and Loos, N., (2013) Effects of chronic exposure to radiofrequency electromagnetic fields
29 on energy balance in developing rats. *Environ Sci Pollut Res Int* **20**, 2735–2746.
- 30 Petanjek, Z., Judaš, M., Šimic, G., Rasin, M.R., Uylings, H.B.M., Rakic, P. and Kostovic, I., (2011)
31 Extraordinary neoteny of synaptic spines in the human prefrontal cortex. *Proc. Natl. Acad.*
32 *Sci. U.S.A.* **108**, 13281–13286.
- 33 Peyman, A., (2011a) Dielectric properties of tissues as a function of age and their relevance in
34 assessment of the exposure of children to electromagnetic fields.
- 35 Peyman, A., (2011b) Dielectric properties of tissues; variation with age and their relevance in
36 exposure of children to electromagnetic fields; state of knowledge. *Progress in Biophysics*
37 *and Molecular Biology* **107**, 434–438.
- 38 Peyman, A., Gabriel, C., Grant, E.H., Vermeeren, G. and Martens, L., (2009) Variation of the
39 dielectric properties of tissues with age: the effect on the values of SAR in children when
40 exposed to walkie-talkie devices. *Phys Med Biol* **54**, 227–241.
- 41 Peyman, A., Holden, S.J., Watts, S., Perrott, R. and Gabriel, C., (2007) Dielectric properties of
42 porcine cerebrospinal tissues at microwave frequencies: in vivo, in vitro and systematic
43 variation with age. *Phys Med Biol* **52**, 2229–2245.
- 44 Peyman, A., Khalid, M., Calderon, C., Addison, D., Mee, T., Maslanyj, M. and Mann, S., (2011)
45 Assessment of exposure to electromagnetic fields from wireless computer networks (wi-fi)
46 in schools; results of laboratory measurements. *Health Phys* **100**, 594–612.
- 47 Peyman, A., Rezazadeh, A.A. and Gabriel, C., (2001) Changes in the dielectric properties of rat
48 tissue as a function of age at microwave frequencies. *Phys. Med. Biol.* **46**, 1617.

- 1 Poulletier de Gannes, F., Haro, E., Hurtier, A., Taxile, M., Athane, A., Ait-Aissa, S., Masuda, H.,
2 Percherancier, Y., Ruffié, G., Billaudel, B., Dufour, P., Veyret, B. and Lagroye, I., (2012)
3 Effect of in utero wi-fi exposure on the pre- and postnatal development of rats. *Birth Defects*
4 *Res. B Dev. Reprod. Toxicol.* **95**, 130–136.
- 5 Poulis, A.F., (2009) Reproductive and developmental effects of EMF in vertebrate animal models.
6 *Pathophysiology : the official journal of the International Society for Pathophysiology / ISP*
7 **16**, 179–89.
- 8 Preece, A.W., Goodfellow, S., Wright, M.G., Butler, S.R., Dunn, E.J., Johnson, Y., Manktelow, T.C.
9 and Wesnes, K., (2005) Effect of 902 MHz mobile phone transmission on cognitive function
10 in children. *Bioelectromagnetics* **26**, S138–S143.
- 11 Quinn, R., (2005) Comparing rat's to human's age: How old is my rat in people years? *Nutrition* **21**,
12 775–777.
- 13 Rağbetli, M.C., Aydinlioğlu, A., Koyun, N., Rağbetli, C., Bektas, S. and Ozdemir, S., (2010) The
14 effect of mobile phone on the number of Purkinje cells: a stereological study. *Int. J. Radiat.*
15 *Biol.* **86**, 548–554.
- 16 Redmayne, M., (2013) New Zealand adolescents' cellphone and cordless phone user-habits: are
17 they at increased risk of brain tumours already? A cross-sectional study. *Environ Health* **12**,
18 5.
- 19 Redmayne, M., Inyang, I., Dimitriadis, C., Benke, G. and Abramson, M.J., (2010) Cordless
20 telephone use: implications for mobile phone research. *J Environ Monit* **12**, 809–812.
- 21 Redmayne, M., Smith, E. and Abramson, M.J., (2013a) A forecasting method to reduce estimation
22 bias in self-reported cell phone data. *J Expo Sci Environ Epidemiol* **23**, 539–544.
- 23 Redmayne, M., Smith, E. and Abramson, M.J., (2013b) The relationship between adolescents'
24 well-being and their wireless phone use: a cross-sectional study. *Environmental Health* **12**,
25 90.
- 26 Rice, D. and Barone, S., (2000) Critical periods of vulnerability for the developing nervous system:
27 evidence from humans and animal models. *Environ. Health Perspect.* **108 Suppl 3**, 511–
28 533.
- 29 Romijn, H.J., Hofman, M.A. and Gramsbergen, A., (1991) At what age is the developing cerebral
30 cortex of the rat comparable to that of the full-term newborn human baby? *Early Human*
31 *Development* **26**, 61–67.
- 32 De Salles, A.A., Bulla, G. and Rodriguez, C.E.F., (2006) Electromagnetic absorption in the head of
33 adults and children due to mobile phone operation close to the head. *Electromagn Biol Med*
34 **25**, 349–360.
- 35 Sambucci, M., Laudisi, F., Nasta, F., Pinto, R., Lodato, R., Altavista, P., Lovisolo, G.A., Marino, C.
36 and Pioli, C., (2010) Prenatal exposure to non-ionizing radiation: effects of WiFi signals on
37 pregnancy outcome, peripheral B-cell compartment and antibody production. *Radiat. Res.*
38 **174**, 732–740.
- 39 Sambucci, M., Laudisi, F., Nasta, F., Pinto, R., Lodato, R., Lopresto, V., Altavista, P., Marino, C.
40 and Pioli, C., (2011) Early life exposure to 2.45 GHz WiFi-like signals: Effects on
41 development and maturation of the immune system. *Progress in Biophysics and Molecular*
42 *Biology* **107**, 393–398.
- 43 Sangun, O., Dundar, B., Darici, H., Comlekci, S. and Celik, S., (2014) The effects of long-term
44 exposure to a 2450 MHz electromagnetic field on growth and pubertal development in
45 female Wistar rats. *Electromagn Biol Med.*
- 46 Saran, A., Pazzaglia, S., Mancuso, M., Rebessi, S., Di Majò, V., Tanori, M., Lovisolo, G.A., Pinto,
47 R. and Marino, C., (2007) Effects of exposure of newborn patched1 heterozygous mice to
48 GSM, 900 MHz. *Radiat. Res.* **168**, 733–740.

- 1 Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (Scenih), (2007) Possible
2 effects of electromagnetic Fields (EMF) on Human Health.
- 3 Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (Scenih), (2009) Health
4 Effects of Exposure to EMF.
- 5 Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR), S., (2013)
6 Potential health effects of exposure to electromagnetic fields 15 (EMF).
- 7 Şekeroğlu, V., Akar, A. and Şekeroğlu, Z.A., (2012) Cytotoxic and genotoxic effects of high-
8 frequency electromagnetic fields (GSM 1800 MHz) on immature and mature rats.
9 *Ecotoxicology and Environmental Safety* **80**, 140–144.
- 10 Sengupta, P., (2013) The Laboratory Rat: Relating Its Age With Human's. *Int J Prev Med* **4**, 624–
11 630.
- 12 Shirai, T., Ichihara, T., Wake, K., Watanabe, S., Yamanaka, Y., Kawabe, M., Taki, M., Fujiwara, O.,
13 Wang, J., Takahashi, S. and Tamano, S., (2007) Lack of promoting effects of chronic
14 exposure to 1.95-GHz W-CDMA signals for IMT-2000 cellular system on development of N-
15 ethylnitrosourea-induced central nervous system tumors in F344 rats. *Bioelectromagnetics*
16 **28**, 562–572.
- 17 Shirai, T., Kawabe, M., Ichihara, T., Fujiwara, O., Taki, M., Watanabe, S., Wake, K., Yamanaka, Y.,
18 Imaida, K., Asamoto, M. and Tamano, S., (2005) Chronic exposure to a 1.439 GHz
19 electromagnetic field used for cellular phones does not promote N-ethylnitrosourea induced
20 central nervous system tumors in F344 rats. *Bioelectromagnetics* **26**, 59–68.
- 21 Skakkebaek, N.E., Jørgensen, N., Main, K.M., Meyts, E.R.-D., Leffers, H., Andersson, A.-M., Juul,
22 A., Carlsen, E., Mortensen, G.K., Jensen, T.K. and Toppari, J., (2006) Is human fecundity
23 declining? *International Journal of Andrology* **29**, 2–11.
- 24 Société royale du Canada (SRC), (2014) Examen de Code de sécurité 6 : Risques potentiels pour
25 la santé humaine associés aux champs de radiofréquences produits par les dispositifs de
26 télécommunications sans fil.
- 27 Soderqvist, F., Carlberg, M., Hansson Mild, K. and Hardell, L., (2011) Childhood brain tumour risk
28 and its association with wireless phones: a commentary. *Environ Health* **10**, 106.
- 29 Sommer, A.M., Bitz, A.K., Streckert, J., Hansen, V.W. and Lerchl, A., (2007) Lymphoma
30 development in mice chronically exposed to UMTS-modulated radiofrequency
31 electromagnetic fields. *Radiat. Res.* **168**, 72–80.
- 32 Sommer, A.M., Grote, K., Reinhardt, T., Streckert, J., Hansen, V. and Lerchl, A., (2009) Effects of
33 radiofrequency electromagnetic fields (UMTS) on reproduction and development of mice: a
34 multi-generation study. *Radiat. Res.* **171**, 89–95.
- 35 Sowell, E.R., Peterson, B.S., Thompson, P.M., Welcome, S.E., Henkenius, A.L. and Toga, A.W.,
36 (2003) Mapping cortical change across the human life span. *Nat. Neurosci.* **6**, 309–315.
- 37 Sowell, E.R., Thompson, P.M., Leonard, C.M., Welcome, S.E., Kan, E. and Toga, A.W., (2004)
38 Longitudinal mapping of cortical thickness and brain growth in normal children. *J. Neurosci.*
39 **24**, 8223–8231.
- 40 Sowell, E.R., Thompson, P.M. and Toga, A.W., (2004) Mapping changes in the human cortex
41 throughout the span of life. *Neuroscientist* **10**, 372–392.
- 42 Spear, L.P., (2000) The adolescent brain and age-related behavioral manifestations. *Neuroscience*
43 *& Biobehavioral Reviews* **24**, 417–463.
- 44 SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, (2014) Ninth report from SSM's Scientific
45 Council on Electromagnetic Fields, 2014. SSM.
- 46 Sudan, M., Kheifets, L., Arah, O., Olsen, J. and Zeltzer, L., (2012) Prenatal and Postnatal Cell
47 Phone Exposures and Headaches in Children. *Open Pediatr Med Journal* **6**, 46–52.

- 1 Sudan, M., Kheifets, L., Arah, O.A. and Olsen, J., (2013a) Cell Phone Exposures and Hearing Loss
2 in Children in the Danish National Birth Cohort: Cell phones and hearing loss in children.
3 *Paediatric and Perinatal Epidemiology* **27**, 247–257.
- 4 Sudan, M., Kheifets, L., Arah, O.A. and Olsen, J., (2013b) On the association of cell phone
5 exposure with childhood behaviour. *J Epidemiol Community Health* **67**, 979.
- 6 Takahashi, S., Imai, N., Nabae, K., Wake, K., Kawai, H., Wang, J., Watanabe, S., Kawabe, M.,
7 Fujiwara, O., Ogawa, K., Tamano, S. and Shirai, T., (2010) Lack of adverse effects of
8 whole-body exposure to a mobile telecommunication electromagnetic field on the rat fetus.
9 *Radiat. Res.* **173**, 362–372.
- 10 Tamnes, C.K., Walhovd, K.B., Engvig, A., Grydeland, H., Krogsrud, S.K., Østby, Y., Holland, D.,
11 Dale, A.M. and Fjell, A.M., (2014) Regional hippocampal volumes and development predict
12 learning and memory. *Dev. Neurosci.* **36**, 161–174.
- 13 Tau, G.Z. and Peterson, B.S., (2010) Normal Development of Brain Circuits.
14 *Neuropsychopharmacology* **35**, 147–168.
- 15 Thomas, S., Benke, G., Dimitriadis, C., Inyang, I., Sim, M.R., Wolfe, R., Croft, R.J. and Abramson,
16 M.J., (2010) Use of mobile phones and changes in cognitive function in adolescents. *Occup*
17 *Environ Med* **67**, 861–866.
- 18 Thomas, S., Heinrich, S., Kries, R. and Radon, K., (2010) Exposure to radio-frequency
19 electromagnetic fields and behavioural problems in Bavarian children and adolescents.
20 *European Journal of Epidemiology* **25**, 135–141.
- 21 Thomas, S., Kuhnlein, A., Heinrich, S., Praml, G., von Kries, R. and Radon, K., (2008) Exposure to
22 mobile telecommunication networks assessed using personal dosimetry and well-being in
23 children and adolescents: the German MobilEe-study. *Environ Health* **7**, 54.
- 24 Tillmann, T., Ernst, H., Ebert, S., Kuster, N., Behnke, W., Rittinghausen, S. and Dasenbrock, C.,
25 (2007) Carcinogenicity study of GSM and DCS wireless communication signals in B6C3F1
26 mice. *Bioelectromagnetics* **28**, 173–187.
- 27 Tillmann, T., Ernst, H., Streckert, J., Zhou, Y., Taugner, F., Hansen, V. and Dasenbrock, C., (2010)
28 Indication of cocarcinogenic potential of chronic UMTS-modulated radiofrequency exposure
29 in an ethylnitrosourea mouse model. *Int. J. Radiat. Biol.* **86**, 529–541.
- 30 Toga, A.W., Thompson, P.M., Mori, S., Amunts, K. and Zilles, K., (2006) Towards multimodal
31 atlases of the human brain. *Nat Rev Neurosci* **7**, 952–966.
- 32 Vecchio, F., Babiloni, C., Ferreri, F., Buffo, P., Cibelli, G., Curcio, G., Dijkman, S. van, Melgari, J.-
33 M., Giambattistelli, F. and Rossini, P.M., (2010) Mobile phone emission modulates inter-
34 hemispheric functional coupling of EEG alpha rhythms in elderly compared to young
35 subjects. *Clinical Neurophysiology* **121**, 163–171.
- 36 De Vocht, F., Burstyn, I. and Cherrie, J.W., (2011a) Time trends (1998–2007) in brain cancer
37 incidence rates in relation to mobile phone use in England. *Bioelectromagnetics* **32**, 334–
38 339.
- 39 De Vocht, F., Burstyn, I. and Cherrie, J.W., (2011b) Authors' reply to Kundi's comments on de
40 Vocht et al. "time trends (1998–2007) in brain cancer incidence rates in relation to mobile
41 phone use in England". *Bioelectromagnetics* **32**, 675–676.
- 42 Vrijheid, M., Martinez, D., Forn, J., Guxens, M., Julvez, J., Ferrer, M. and Sunyer, J., (2010)
43 Prenatal exposure to cell phone use and neurodevelopment at 14 months. *Epidemiology*
44 **21**, 259–262.
- 45 Walhovd, K.B., Tamnes, C.K. and Fjell, A.M., (2014) Brain structural maturation and the
46 foundations of cognitive behavioral development. *Curr. Opin. Neurol.* **27**, 176–184.
- 47 Wang, J. and Fujiwara, O., (2003) Comparison and evaluation of electromagnetic absorption
48 characteristics in realistic human head models of adult and children for 900-MHz mobile
49 telephones. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **51**, 966–971.

- 1 Wang, J., Fujiwara, O., Kodera, S. and Watanabe, S., (2006a) FDTD calculation of whole-body
2 average SAR in adult and child models for frequencies from 30 MHz to 3 GHz. *Phys. Med.
3 Biol.* **51**, 4119.
- 4 Wang, J., Fujiwara, O. and Watanabe, S., (2006b) Approximation of aging effect on dielectric
5 tissue properties for SAR assessment of mobile telephones. *IEEE Transactions on
6 Electromagnetic Compatibility* **48**, 408–413.
- 7 Watilliaux, A., Edeline, J.-M., Lévêque, P., Jay, T.M. and Mallat, M., (2011) Effect of exposure to
8 1,800 MHz electromagnetic fields on heat shock proteins and glial cells in the brain of
9 developing rats. *Neurotox Res* **20**, 109–119.
- 10 Welsh, M., Saunders, P.T.K., Fisker, M., Scott, H.M., Hutchison, G.R., Smith, L.B. and Sharpe,
11 R.M., (2008) Identification in rats of a programming window for reproductive tract
12 masculinization, disruption of which leads to hypospadias and cryptorchidism. *J. Clin.
13 Invest.* **118**, 1479–1490.
- 14 Wiart, J., Hadjem, A., Bloch, I. and Wong, M.-F., (2007) RF Exposure assessment in children
15 head: Present questions and future challenges, in: *International Conference on
16 Electromagnetics in Advanced Applications, 2007. ICEAA 2007. Presented at the
17 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2007. ICEAA
18 2007*, pp. 1034–1035.
- 19 Wiart, J., Hadjem, A., Varsier, N. and Conil, E., (2011) Numerical dosimetry dedicated to children
20 RF exposure. *Prog. Biophys. Mol. Biol.* **107**, 421–427.
- 21 Wiart, J., Hadjem, A., Wong, M.F. and Bloch, I., (2008) Analysis of RF exposure in the head
22 tissues of children and adults. *Phys. Med. Biol.* **53**, 3681.
- 23 Wiedemann, P., Institut für Neurowissenschaften und Medizin , Ethik in den Neurowissenschaften,
24 (2009) Children's health and RF EMF exposure. Forschungszentrum, Zentralbibliothek,
25 Jülich.
- 26 Winick, M., (1975) Effects of malnutrition on the maturing central nervous system. *Adv Neurol* **13**,
27 193–246.
- 28 Wu, D., Shamsi, S., Chen, J. and Kainz, W., (2006) Evaluations of Specific Absorption Rate and
29 Temperature Increase Within Pregnant Female Models in Magnetic Resonance Imaging
30 Birdcage Coils. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **54**, 4472–4478.
- 31 Yang, Y.-S., Yen, J.-Y., Ko, C.-H., Cheng, C.-P. and Yen, C.-F., (2010) The association between
32 problematic cellular phone use and risky behaviors and low self-esteem among Taiwanese
33 adolescents. *BMC Public Health* **10**, 217.
- 34 Yen, C.-F., Tang, T.-C., Yen, J.-Y., Lin, H.-C., Huang, C.-F., Liu, S.-C. and Ko, C.-H., (2009)
35 Symptoms of problematic cellular phone use, functional impairment and its association with
36 depression among adolescents in Southern Taiwan. *Journal of Adolescence* **32**, 863–873.
- 37 Zhou, D., Lebel, C., Treit, S., Evans, A. and Beaulieu, C., (2015) Accelerated longitudinal cortical
38 thinning in adolescence. *NeuroImage* **104**, 138–145.
- 39 Ziemann, C., Brockmeyer, H., Reddy, S.B., Vijayalaxmi, Prihoda, T.J., Kuster, N., Tillmann, T. and
40 Dasenbrock, C., (2009) Absence of genotoxic potential of 902 MHz (GSM) and 1747 MHz
41 (DCS) wireless communication signals: In vivo two-year bioassay in B6C3F1 mice. *Int. J.
42 Radiat. Biol.* **85**, 454–464.
- 43 Zubal, I.G., Harrell, C.R., Smith, E.O., Rattner, Z., Gindi, G. and Hoffer, P.B., (1994) Computerized
44 three-dimensional segmented human anatomy. *Medical Physics* **21**, 299–302.
- 45

46 6.2 Normes

- 47 NF X 50-110 (mai 2003) Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une
48 expertise. AFNOR (indice de classement X 50-110).

1 IEC 62209-2:2010 *Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted*
2 *wireless communication devices - Human models, instrumentation, and procedures Part 2:*
3 *Procedure to determine the Specific Absorption Rate (SAR) in the head and body for 30 MHz to*
4 *6 GHz Handheld and Body-Mounted Devices used in close proximity to the Body.*

5 **6.3 Législation et réglementation**

6 Circulaire du 24 juillet 1990 relative à la mise en place des périmètres de protection des points de
7 prélèvement d'eau destinée à la consommation humaine (art. L. 20 du code de la santé publique).
8 NOR: SPSP9001537C, J.O n° 212 du 13 septembre 1990.

9 Décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L.32 du code des postes
10 et télécommunication et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs
11 électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou
12 par les installations radioélectriques.

13 Recommandation du Conseil n° 1999/519/CE du 12/07/99 relative à la limitation de l'exposition du
14 public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz)

15 Directive 1999/5/CE du Parlement européen et du Conseil du 9 mars 1999 concernant les
16 équipements hertziens et les équipements terminaux de télécommunications et la reconnaissance
17 mutuelle de leur conformité.

18 Directive 2014/53/UE du Parlement européen et du Conseil du 16 avril 2014 relative à
19 l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché
20 d'équipements radioélectriques et abrogeant la directive 1999/5/CE Texte présentant de l'intérêt
21 pour l'EEE

22 Ordonnance n° 2001-670 du 25 juillet 2001 portant adaptation au droit communautaire du code de
23 la propriété intellectuelle et du code des postes et télécommunications

24 Directive 98/13/CE du Parlement européen et du Conseil du 12 février 1998 concernant les
25 équipements terminaux de télécommunications et les équipements de stations terrestres de
26 communications par satellite, incluant la reconnaissance mutuelle de leur conformité

27 Directive 2006/95/CE du Parlement européen et du Conseil du 12 décembre 2006 concernant le
28 rapprochement des législations des États membres relatives au matériel électrique destiné à être
29 employé dans certaines limites de tension

30 Directive 2004/108/CE du Parlement européen et du Conseil du 15 décembre 2004 relative au
31 rapprochement des législations des États membres concernant la compatibilité électromagnétique
32 et abrogeant la directive 89/336/CEE

33 Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement dite
34 « Grenelle 2 ».

35 Arrêté royal du 30 juillet 2013 relatif à l'interdiction de mise sur le marché de téléphones mobiles
36 spécifiquement conçus pour les jeunes enfants, Moniteur Belge, 30 août 2013, p. 60129.

37 Arrêté royal du 30 juillet 2013 relatif à la disponibilité d'informations à l'attention des
38 consommateurs concernant le débit d'absorption spécifique de téléphones mobiles et à la publicité
39 pour les téléphones mobiles, Moniteur Belge, 30 août 2013, p. 60130.

40

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

ANNEXES

DOCUMENT EN CONSULTATION

1 Annexe 1 : Lettre de saisine



Ministère du travail, de l'emploi et
de la santé

Ministère de l'écologie, du
développement durable, des
transports et du logement

Ministère de l'économie, des
finances et de l'industrie

Direction générale de la santé

Direction générale de la prévention
des risques

Direction générale de la
concurrence, de la consommation et
de la répression des fraudes

Paris le

Le Directeur général de la santé

Le Directeur général de la prévention des
risques

La Directrice générale de la concurrence,
de la consommation et de la répression
des fraudes

à

Monsieur le Directeur général de
l'Agence nationale de sécurité sanitaire de
l'alimentation, de l'environnement et du
travail

Objet : Equipements radioélectriques dont l'usage est dédié aux enfants de moins de six ans

L'article 183 de la loi Grenelle II porte création d'un article L. 5231-4 dans le code de la santé publique prévoyant la possibilité d'interdire par arrêté du ministre chargé de la santé la distribution d'objets contenant un équipement radioélectrique dont l'usage est spécifiquement dédié aux enfants de moins de 6 ans. En effet, des appareils générant des champs électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences ont été développés spécifiquement à l'intention des enfants, tels que les dispositifs de type « écoute-bébé » et des talkies-walkies utilisant la technologie DECT. Or, l'avis de l'Afsset d'octobre 2009 relatif aux radiofréquences précise que la caractérisation de l'exposition des enfants aux radiofréquences et les effets éventuels sont mal décrits.

Il convient donc notamment de caractériser l'exposition des enfants due aux équipements radioélectriques qui leur sont destinés, afin de définir les modalités de mise en œuvre de l'article L. 5231-4 du code de la santé publique. En effet, la mise en œuvre de cette disposition nécessite de pouvoir justifier de la dangerosité de ces équipements. Ces derniers relèvent du champ

d'application de la directive 1999/5/CE et les équipements comportant un marquage « CE » sont présumés conformes aux exigences essentielles en matière de santé et de sécurité. Les Etats membres ne peuvent interdire, restreindre ou entraver la libre circulation de ces équipements dès lors qu'ils sont conformes aux prescriptions de la directive précitée. Ainsi, l'interdiction d'un équipement nécessiterait une, voire plusieurs notifications européennes dûment justifiées.

Des critères techniques fixant les conditions d'interdiction doivent donc préalablement être définis et motivés.

Dans ce cadre, nous vous saurions gré :

- de réaliser une étude permettant d'identifier les équipements en cause et de caractériser le marché associé ;
- d'évaluer le niveau d'exposition des enfants résultant de l'utilisation de ces équipements et les risques éventuels qui pourraient en résulter ;
- de proposer, en fonction des résultats obtenus, des critères permettant de justifier une éventuelle interdiction de ces équipements radioélectriques.

A cet effet, une démarche expérimentale pourrait utilement être entreprise, afin d'objectiver les conclusions.

Nous vous remercions de bien vouloir nous faire parvenir le résultat de vos travaux pour le 31 décembre 2011.

Le Directeur général
de la santé



Jean-Yves GRALL

Le Directeur général de la
prévention des risques

P/0


Laurent MICHEL

La Directrice générale de la
concurrence, de la consommation et
de la répression des fraudes



Nathalie HOMOBONO

Annexe 2 : Recommandations techniques d'allocations de fréquence

Le Tableau 30, issu de la recommandation ERC 70-03 de la CEPT³⁹ fournit des spécifications techniques concernant les allocations de fréquence des dispositifs de télémétrie, de télécommande, ou de transmission de la voix. Il donne les limites de puissance et d'espacement des canaux. D'autres tableaux sont disponibles, qui concernent par exemple les détecteurs d'avalanches, les alarmes, radar de recul de voiture, etc.

Tableau 30 : Puissances maximales autorisées par fréquence

Bande de fréquence	Puissance ou champ magnétique	Espacement des canaux
6,765 - 6,795 MHz	42 dB μ A/m à 10m	Pas d'espacement
13,553 - 13,567 MHz	42 dB μ A/m à 10m	Pas d'espacement
26,957 - 27,283 MHz	42 dB μ A/m à 10m ou 10 mW PAR	Pas d'espacement
40,660 - 40,700 MHz	10 mW PAR	Pas d'espacement
138,20 - 138,45 MHz	10 mW PAR	Pas d'espacement
433,050 - 434,790 MHz	100 mW PAR	Pas d'espacement
434,040 - 434,790 MHz	100 mW PAR	Jusqu'à 25 kHz
863 - 870 MHz	\leq 25 mW PAR	\leq 100 kHz
868,000 - 868,600 MHz	\leq 25 mW PAR	Pas d'espacement
868,700 - 869,200 MHz	\leq 25 mW PAR	Pas d'espacement
869,400 - 869,650 MHz	\leq 500 mW PAR	25 kHz
2 400,0 - 2 483,5 MHz	10 mW PIRE	Pas d'espacement
5 725 - 5 875 MHz	25 mW PIRE	Pas d'espacement
24,00 - 24,25 GHz	100 mW PIRE.	Pas d'espacement
61,0-61,5 GHz	100 mW PIRE	Pas d'espacement
122-123 GHz	100 mW PIRE.	Pas d'espacement
244-246 GHz	100 mW PIRE	Pas d'espacement

La PAR est la puissance apparente rayonnée, et la PIRE la puissance isotrope rayonnée équivalente. Ces deux grandeurs sont reliées par la relation suivante :

PIRE (dB) = PAR (dB) + 2,15 dB, ou PIRE (W) = PAR (W) x 1,64.

Des niveaux spécifiques sont donnés pour les applications de modélisme en annexe 8 de la recommandation (voir Tableau 31).

³⁹ CEPT : Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications.

1

Tableau 31 : Puissances maximum autorisées spécifiquement pour le modélisme

Bande de fréquence	Puissance ou champ magnétique	Espacement des canaux
26,995, 27,045, 27,095, 27,145, 27,195 MHz	100 mW PAR	10 kHz
34,995 - 35,225 MHz	100 mW PAR	10 kHz
40,665, 40,675, 40,685, 40,695 MHz	100 mW PAR	10 kHz

2

3

Recommandation ERC DEC (01) 07 :

4

5

6

La recommandation ERC DEC (01) 07 est une extension de l'ERC 70-03. Elle concerne les appareils à courte portée (SRD) fonctionnant en Wi-Fi. Les limites de puissances maximales autorisées pour le Wi-Fi sont précisées dans le Tableau 32.

7

8

Tableau 32 : Puissances maximales autorisées pour le Wi-Fi

Bande de fréquence	Puissance ou champ magnétique	Espacement des canaux
2 400 - 2 483,5 MHz	100 mW PIRE	Pas d'espacement

9

10

1 Annexe 3 : Normes EN 300 220 et EN 50371

2 La norme EN 300 220 : limites de puissances et de fréquence par canaux

3 La norme EN 300 220 s'applique aux dispositifs de radiocommunication dans la bande 25 MHz à
4 1 GHz, dont la puissance d'émission n'excède pas 500 mW. Elle définit les limites de puissance et
5 de fréquence par canaux conformément à la recommandation ERC 70-03. Cette norme concerne
6 la majeure partie des dispositifs de courte portée (SRD). Par conséquent, elle couvre la grande
7 majorité des exigences essentielles en termes de puissance d'émission des jouets
8 radiocommandés.

9 Les dispositifs concernés par la norme sont les suivants :

- 10 – les alarmes, systèmes d'identification, radiorepérage, télécommande, télémétrie, etc. ;
- 11 – l'identification par radiofréquence (RFID) ;
- 12 – les applications de détection, de mouvement et d'alerte ;
- 13 – les *talkies-walkies* ;
- 14 – Les autres dispositifs à courte portée non spécifiques.

15

16 Ces types d'équipements hertziens peuvent fonctionner :

- 17 – soit avec une connexion de sortie radiofréquence et une antenne dédiée, soit avec une
18 antenne intégrée ;
- 19 – pour tous les types de modulation ;
- 20 – avec ou sans parole.

21

22 Les spécifications d'essais sont les suivantes :

- 23 – chaque équipement soumis à essai doit satisfaire aux exigences de la norme sur toutes les
24 fréquences auxquelles il est prévu de fonctionner ;
- 25 – les essais doivent être réalisés sur les fréquences les plus hautes et les plus basses dans
26 la plage de fonctionnement prévue de l'équipement. L'essai doit être réalisé sur toutes les
27 modulations supportées ;
- 28 – si un équipement est conçu pour fonctionner avec différentes puissances d'onde porteuse,
29 des mesurages de chaque paramètre d'émetteur doivent être effectués au niveau de
30 puissance le plus élevé auquel l'émetteur est prévu de fonctionner.

31

32 En outre, une documentation technique et des manuels d'exploitation, suffisants pour permettre
33 d'effectuer les essais, doivent être disponibles. Une installation de fixation d'essais pour
34 l'équipement, comprenant une antenne intégrée, peut être fournie, à différentes valeurs de
35 puissances.

36 Les types d'essais imposés par la norme EN 300 220 sont les suivants :

- 37 – Méthodes de mesurage et limites des paramètres de l'émetteur :
 - 38 ○ erreur de fréquence ;
 - 39 ○ puissance moyenne (par conduction) ;
 - 40 ○ puissance apparente rayonnée ou PIRE ;
 - 41 ○ modulation avec étalement du spectre ;
 - 42 ○ puissance transitoire ;
 - 43 ○ puissance dans les canaux adjacents ;
 - 44 ○ largeur de bande de modulation ;
 - 45 ○ émissions non désirées dans le domaine des rayonnements non essentiels ;

- 1 ○ stabilité de fréquence à basse tension.
- 2
- 3 – Paramètres du récepteur, essentiellement pour des problématiques de compatibilité
- 4 électromagnétique :
- 5 ○ sensibilité du récepteur ;
- 6 ○ seuil de LBT⁴⁰ du récepteur ;
- 7 ○ sélectivité des canaux adjacents ;
- 8 ○ blocage ;
- 9 ○ rejet des réponses parasites ;
- 10 ○ rayonnements parasites du récepteur.

11

12 La norme EN 50371 : limites d'exposition du public

13 Cette norme fixe les limites pour l'exposition du public aux champs électromagnétiques. Elle
14 concerne les produits électriques et électroniques de « faible » puissance incorporant des
15 émetteurs RF, avec un maximum de 20 mW de puissance moyenne et de 20 W de puissance
16 crête sur la plage de 10 MHz à 300 GHz. L'utilisation d'émetteurs radiofréquences de faible
17 puissance concerne la majeure partie des SRD, et la totalité des jouets sur le marché européen.

18 La conformité à cette norme s'obtient par la démonstration que les restrictions de base pour
19 l'exposition humaine aux champs électromagnétiques ne sont pas dépassées.

20 Les critères de conformités sont les suivants :

- 21 – pour tous les champs électromagnétiques :

22 Si la puissance moyenne émise par un appareil fonctionnant dans la gamme de fréquences
23 10 MHz – 300 GHz est inférieure ou égale à 20 mW et que la puissance crête transmise est
24 inférieure à 20 W, alors l'appareil est réputé conforme aux restrictions de base sans essai. La
25 durée d'intégration est de $68/f^{1.05}$ minutes (f en GHz) dans la bande 10 GHz – 300 GHz.

26 Si la puissance totale de l'alimentation ou la puissance d'entrée du circuit qui produit les émissions
27 les plus importantes dans le dispositif est inférieure à 20 mW, on suppose alors que la puissance
28 émise est inférieure à 20 mW.

- 29 – Pour les champs électromagnétiques dont la durée d'impulsion est inférieure à 30 µs :

30 Pour les impulsions de durée inférieure à 30 microsecondes aux fréquences comprises entre
31 300 MHz et 10 GHz, il y a aussi une restriction de base portant sur l'absorption spécifique (AS).
32 Elle est de 2 mJ/kg pour 10 g de tissus, quelle que soit la localisation du tissu correspondant dans
33 la tête. Pour la plupart des impulsions, la restriction concernant le DAS est plus sévère mais pour
34 des impulsions dont la fréquence de répétition est inférieure à 100 Hz, la restriction concernant
35 l'AS est prédominante. Pour les dispositifs qui produisent des impulsions dont la fréquence de
36 répétition est inférieure à 100 Hz, il convient que la puissance moyenne soit inférieure à $20 \cdot \text{prf}$ mW
37 (prf étant la fréquence de répétition des impulsions exprimée en Hz).

38 L'évaluation est valide seulement si l'incertitude de la mesure du champ est inférieure à 30 %. Le
39 rapport doit contenir toutes les informations nécessaires pour effectuer les évaluations
40 reproductibles, les tests, les calculs et les mesures, donnant des résultats au sein de l'étalonnage
41 requis et les limites d'incertitude.

- 42 – Analyse de la norme :

⁴⁰ LBT : *Listen Before Talk*, littéralement « écouter avant de parler », technique en radiocommunication utilisée par exemple par des appareils afin de détecter un réseau ou un canal libre de communication.

1 Cette norme établit la conformité en s'appuyant simplement sur les niveaux de puissance émis par
2 les appareils, sans référence aux niveaux de champ maximum définis par l'Icnirp et repris dans la
3 recommandation 1999/519/CE.

4 Elle s'applique aux appareils dit « de faible puissance » (ayant une puissance moyenne inférieure
5 à 20 mW). Les jouets, qui rentrent dans le champ d'application de cette norme, sont donc,
6 normalement, réglementairement conformes aux exigences essentielles de sécurité, en termes
7 d'exposition aux champs électromagnétiques.

8

DOCUMENT EN CONSULTATION

Annexe 4 : Caractéristiques diélectriques des milieux biologiques

Les éléments ci-dessous sont extraits de la thèse de doctorat de J.F. Chateaux⁴¹.

Milieu conducteur, courant de conduction

Dans les milieux contenant des charges libres (électrons dans les métaux, ions dans les électrolytes) l'application d'un champ électrique produit une force sur chacune des charges q suivant la relation :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

Sous l'action de cette force, les charges libres se déplacent suivant la direction du champ électrique. Ce mouvement se traduit à l'échelle macroscopique par l'apparition d'un courant dont la densité est liée au champ électrique par la relation :

$$\vec{J}_c = \sigma \cdot \vec{E}$$

Cette relation, la loi d'Ohm, définit la conductivité électrique σ exprimée en Siemens par mètre (S.m-1) comme étant le facteur de proportionnalité entre densité de courant et champ électrique. Le courant résultant du déplacement des charges libres est appelé courant de conduction. Les milieux ne comportant pas de charges libres ne peuvent être le siège d'aucun courant de conduction et à ce titre sont qualifiés d'isolant.

Milieu diélectrique, polarisation, courant de déplacement

Les milieux isolants, (ou diélectriques en raison des propriétés énoncées dans les lignes qui suivent) ne peuvent par définition être le siège d'un courant de conduction. Cependant, comme toute matière, ces milieux sont formés de charges positives et négatives liées à l'intérieur d'atomes et de molécules. Pour certaines de ces molécules (comme l'eau), le centre de gravité des charges positives ne coïncide pas avec celui des charges négatives. Il en résulte l'apparition d'un dipôle électrique qualifié de permanent car intrinsèque au milieu considéré.

Des dipôles induits sont par ailleurs créés au sein d'un diélectrique par l'application d'un champ électrique dont l'action développe une force, identique à celle produisant un courant dans les conducteurs, entraînant une migration des charges liées positives et négatives présents dans les molécules.

Un dipôle, qu'il soit permanent ou induit, est caractérisé par son moment dipolaire dont l'amplitude est le produit de la charge par la distance séparant ses pôles. Par nature, les dipôles induits sont alignés sur le champ \vec{E} les créant. Si un tel champ est appliqué à un milieu comportant des dipôles permanents, ces derniers s'alignent suivant les lignes de champ en raison de leur moment dipolaire (création d'un couple de forces). Cette orientation des dipôles suivant une direction privilégiée entraîne la polarisation du milieu soumis au champ électrique \vec{E} . La densité volumique de moments dipolaires observée en tout point du milieu définit le champ de polarisation \vec{P} . Le déplacement électrique \vec{D} , effet du champ électrique sur la matière, est alors défini par :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P}$$

où $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m est la permittivité diélectrique du vide.

Si le milieu est linéaire, la polarisation est proportionnelle au champ électrique et on a :

⁴¹ Conception et réalisation d'une cellule de caractérisation des tissus biologiques par spectroscopie de bioimpédance dans la gamme fréquentielle (100 Hz-1 MHz), application aux tissus osseux-prise en compte de l'anisotropie, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, 15 novembre 2000.

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}$$

1 où ε est la permittivité du matériau. Dans le vide, où la polarisation est nulle, le déplacement
2 électrique vaut donc :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E}$$

3 On définit en pratique la permittivité relative ε_r comme étant le rapport de la permittivité du
4 matériau à celle du vide :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

5 Ce terme est également appelé constante diélectrique du matériau.

6

7 Si le champ électrique \vec{E} varie dans le temps, sinusoïdalement par exemple, un mouvement
8 oscillatoire des dipôles apparaît en raison de leur tendance à s'aligner sur le champ électrique.
9 Bien que ces oscillations se fassent sur place et qu'il n'y a donc pas de réelle migration des
10 dipôles, ce mouvement local est assimilable à un courant alternatif appelé courant de
11 déplacement. Ce nom peut paraître un peu paradoxal mais a justement été choisi par Maxwell, qui
12 a introduit cette notion, pour indiquer que ce courant résulte du déplacement alternatif de charges
13 liées [INA 98].

14 De façon plus pratique, le courant de conduction est celui qui circule dans une résistance pure
15 alors que le courant de déplacement est celui qui circule au travers d'une capacité pure.

16

17 Milieu diélectrique à pertes

18 Au paragraphe précédent nous avons rappelé que les dipôles, permanents ou induits, présents
19 dans les diélectriques s'alignent suivant la direction du champ électrique \vec{E} . Cependant, cette
20 rotation des dipôles doit s'opposer à des forces de frottement, à des forces de rappel ainsi qu'à
21 l'agitation des atomes et molécules due à la température ambiante. L'existence de ces forces
22 s'opposant à l'orientation des dipôles a une double conséquence, en particulier lorsque le champ
23 électrique appliqué est variable et de haute fréquence :

24 • Le travail développé pour contrecarrer les forces de friction consomme de l'énergie
25 prélevée au champ électrique. Cette énergie se dissipe dans le matériau sous forme de
26 chaleur. C'est ainsi que fonctionnent les fours à micro-ondes. Un diélectrique absorbant de
27 l'énergie par ce mécanisme est qualifié de diélectrique à pertes.

28 • L'orientation des dipôles se fait avec un certain retard. Ce retard est négligeable lorsque le
29 champ électrique varie lentement et les champs \vec{D} et \vec{E} sont alors en phase. Cependant,
30 lorsque la fréquence augmente, le retard devient significatif et les champs \vec{D} et \vec{E} ne sont
31 plus en phase. Afin de traduire ce déphasage, la permittivité définie plus haut est
32 remplacée par une grandeur complexe dont la partie imaginaire traduit les pertes
33 énergétiques et on note :

$$\vec{D} = \varepsilon^* \cdot \vec{E}$$

$$\text{avec } \varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

34

35

1 Phénomènes de relaxation

2 En réalité, de nombreux mécanismes de polarisation coexistent et on peut distinguer ainsi :

- 3 • La polarisation d'orientation résultant de l'orientation des molécules dipolaires rigides [PER
- 4 97].
- 5 • La polarisation ionique, due au déplacement des ions positifs par rapport aux ions négatifs
- 6 dans les molécules à liaison ionique.
- 7 • La polarisation électronique due à la déformation du nuage électronique des atomes.

8 On le verra par la suite, d'autres types de polarisation interviennent dans les milieux complexes

9 que sont les tissus biologiques.

10 À chacun de ces mécanismes de polarisation peut être associée une constante de temps

11 traduisant le temps de réponse à l'alignement des dipôles. Ainsi, l'absorption d'énergie liée à un

12 mécanisme particulier de polarisation varie en fonction de la fréquence du champ électrique

13 appliqué. Autour d'une certaine fréquence spécifique au type de polarisation considéré, une

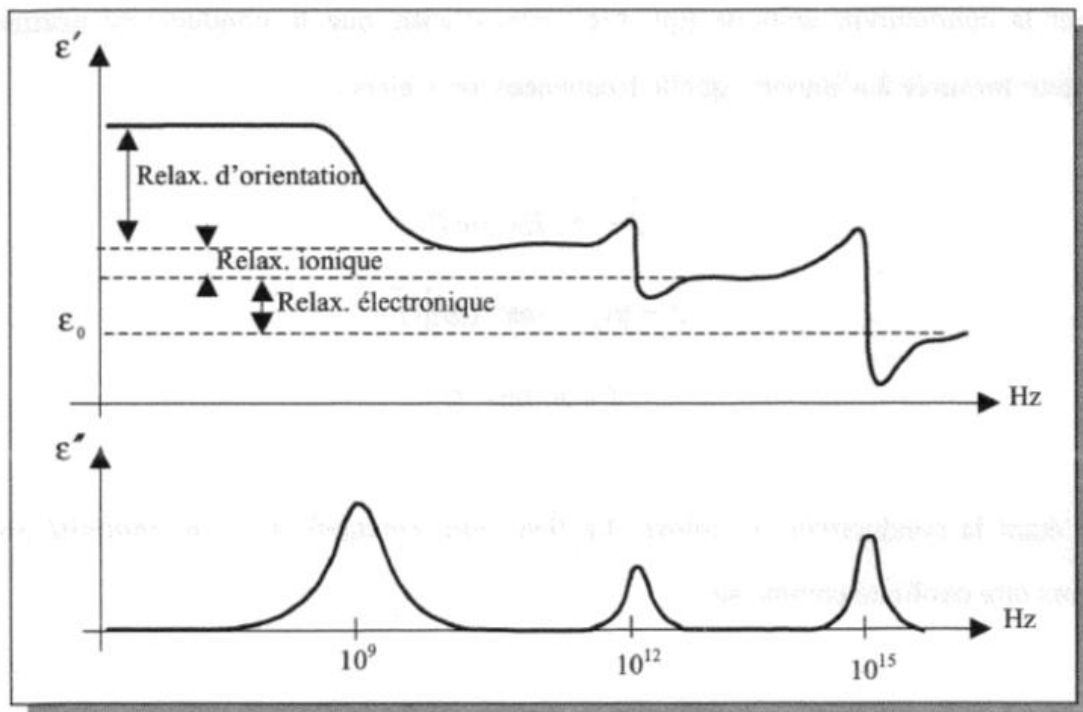
14 résonance se produit ce qui entraîne une absorption d'énergie maximale par le milieu. On parle

15 alors de phénomène de relaxation.

16 En observant le comportement de la partie réelle (ϵ') et de la partie imaginaire (ϵ'') de la

17 permittivité complexe ϵ^* en fonction de la fréquence (Figure I.6), une relaxation se traduit par :

- 18 • Une augmentation de la partie imaginaire, traduisant des pertes plus importantes.
- 19 • Une réduction de la partie réelle, traduisant une réduction de la capacité du matériau à se
- 20 polariser. Ce dernier point est tout à fait compréhensible car un des mécanismes
- 21 contribuant à la polarisation globale n'agit plus celui-ci étant incapable de suivre les
- 22 variations du champ électrique.



23

24 Figure I.6 : Phénomènes de relaxation et mécanismes de polarisation associés (d'après [PER 97])

25

1 La permittivité complexe est donc une grandeur dépendante de la fréquence qu'on peut donc
2 écrire $\varepsilon^*(\omega)$.

3

4 **Conductivité complexe**

5 Jusqu'à présent, les milieux diélectriques considérés ont été supposés parfaitement isolants, les
6 seules pertes énergétiques les affectant étant dues aux phénomènes de relaxation. De nombreux
7 matériaux cependant, dont les tissus biologiques, sont à la fois diélectriques et conducteurs : leur
8 conductivité σ n'est pas nulle.

9 L'application d'un champ électrique à un tel milieu engendre donc un courant de conduction ainsi
10 qu'un courant de déplacement dans le cas d'un champ variable. Aux pertes diélectriques évoquées
11 précédemment s'ajoutent donc des pertes ohmiques par effet Joule.

12 Dans le cadre d'un champ électrique harmonique $\vec{E} = E \cdot e^{j\omega t}$, la densité de courant résultante
13 dans le milieu s'exprime par :

$$\vec{J} = \vec{J}_c + \vec{J}_d$$

14 Avec \vec{J}_c le courant de conduction et \vec{J}_d le courant de déplacement. En introduisant la notation σ_s
15 pour la conductivité statique (qui n'est rien d'autre que la conductivité normale d'un conducteur
16 mesurée à n'importe quelle fréquence), on a alors :

$$\vec{J} = \sigma_s \vec{E} + j\omega \vec{P}$$

$$\vec{J} = [\sigma_s + j\omega \varepsilon^*(\omega)] \cdot \vec{E}$$

$$\vec{J} = \sigma^*(\omega) \cdot \vec{E}$$

17

18 $\sigma^*(\omega)$ étant la conductivité complexe. Le lien entre conductivité et permittivité complexe peut alors
19 être explicité comme suit :

20

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_s + j\omega[\varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega)]$$

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_s + \omega\varepsilon''(\omega) + j\omega\varepsilon'(\omega)$$

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_s + \sigma_d(\omega) + j\omega\varepsilon'(\omega)$$

$$\sigma^*(\omega) = \sigma'(\omega) - j\sigma''(\omega)$$

21

22 Le terme $\sigma_d(\omega)$ est appelé conductivité dynamique et permet de regrouper en un terme unique
23 $\sigma'(\omega)$ les pertes ohmiques liées à σ_s et les pertes diélectriques dues à $\varepsilon''(\omega)$. Ce regroupement
24 est possible car l'équation (1) montre que les pertes diélectriques sont en phase avec les pertes
25 ohmiques et se comportent donc comme si un nouveau courant de conduction venait se
26 superposer au courant ohmique « normal » lié à σ_s .

27 Ainsi, les parties réelles et imaginaires de la conductivité complexe s'écrivent :

28 • $\sigma'(\omega) = \sigma_s + \omega\varepsilon''(\omega)$ traduisant l'ensemble des pertes dans le milieu (ohmique +
29 diélectrique)

30 • $\sigma''(\omega) = -\omega\varepsilon'(\omega)$ traduisant la polarisation du matériau, c'est à dire son aptitude à stocker
31 de l'énergie sous forme d'un champ électrique.

32 La conductivité complexe et la permittivité complexe sont donc liées par la relation :

$$\sigma^*(\omega) = j\omega\varepsilon^*(\omega)$$

33 ce qui permet d'écrire encore : $\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\frac{\sigma'(\omega)}{\omega}$

1 Cette dernière relation est plus particulièrement utilisée pour la description des diélectriques à
 2 faibles pertes alors que la conductivité complexe est plutôt utilisée lorsque le milieu est bon
 3 conducteur.

4

5 Impédance

6 La détermination de la conductivité statique σ_s , de la conductivité dynamique $\sigma_d(\omega)$ et de la
 7 permittivité $\epsilon'(\omega)$ suffit à la complète caractérisation diélectrique des matériaux. Cependant, ces
 8 grandeurs ne sont pas mesurables directement et sont généralement déduites d'une mesure
 9 d'impédance. L'impédance Z^* traduit la relation entre la tension aux bornes d'un circuit et le
 10 courant le traversant suivant la relation bien connue (loi d'Ohm à l'échelle macroscopique) :

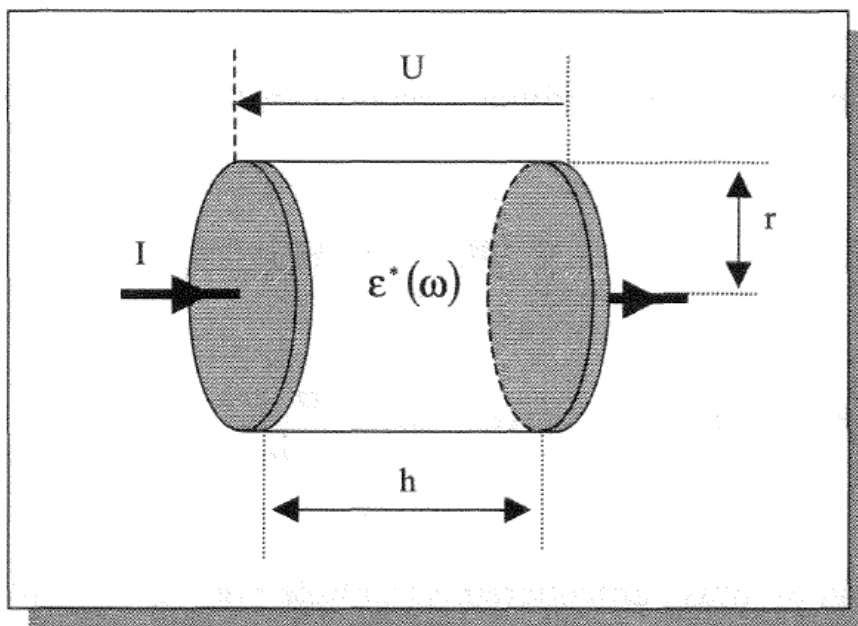
$$U^* = Z^* \cdot I^*$$

11 Toutes les grandeurs de cette relation sont complexes, ce qui traduit un éventuel déphasage entre
 12 la tension et le courant.

13 L'impédance est liée à la conductivité et à la permittivité suivant une relation dépendant de la
 14 géométrie du champ électrique baignant le milieu. Ainsi, dans le cas d'un milieu cylindrique relié à
 15 des électrodes de même diamètre (Figure I.7) et en négligeant tout effet de bord (voir la seconde
 16 partie de ce manuscrit) l'impédance (en ohms (Ω)) est donnée par l'équatio :

17

$$Z^*(\omega) = \frac{h}{\pi \cdot r^2 \cdot (\sigma'(\omega) + j\omega\epsilon'(\omega))}$$



18 *Figure I.7 : Impédance dans le cas d'une géométrie cylindrique*

19

20

21

1 Annexe 5 : Comparaison des valeurs limites d'exposition

2

3 Le Tableau 33 présente une comparaison des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques proposées ou adoptées par
4 différents organismes, pour les intensités des champs électrique et magnétique, et en densité de puissance.

5

Tableau 33 : comparaison des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques

6

Plage de fréquence (MHz)	Intensité du champ électrique (V/m)				Intensité du champ magnétique (A/m)			Densité de puissance (W/m ²)		
	HCN	ICNIRP	IEEE	SC6 2015	ICNIRP	IEEE	SC6 2015	ICNIRP	IEEE	SC6 2015
10 – 20	28	28	823,8/f	27,5	0,073	823,8/f	0,0728	2	1800/f ²	2
20 - 30	28	28	823,8/f	58,07 f ^{0,25}	0,073	823,8/f	0,1540 / f ^{0,25}	2	1800/f ²	8,944 / f ^{0,5}
30 – 48	28	28	27,5	58,07 f ^{0,25}	0,073	27,5	0,1540 / f ^{0,25}	2	2/f ^{3,336}	8,944 / f ^{0,5}
48 - 65	28	28	27,5	22,06	0,073	27,5	0,05852	2	2/f ^{3,336}	1,291
65 – 100	28	28	27,5	22,06	0,073	27,5	0,05852	2	2/f ^{3,336}	1,291
100 - 300	28	28	27,5	22,06	0,073	27,5	0,05852	2	2	1,291
300 - 400	28	28	27,5	3,142 f ^{0,3417}	0,073	27,5	0,008335 f ^{0,3417}	2	2	0,02619 f ^{0,6834}
400 - 2000	28	1,375 f ^{1/2}		3,142 f ^{0,3417}	0,0037 f ^{1/2}		0,008335 f ^{0,3417}	f/200	f/200	0,02619 f ^{0,6834}
2000 - 4000	28	61		3,142 f ^{0,3417}	0,16		0,008335 f ^{0,3417}	10	10	0,02619 f ^{0,6834}
4000 - 6000	10,53 f ^{0,705}	61		3,142 f ^{0,3417}	0,16		0,008335 f ^{0,3417}	10	10	0,02619 f ^{0,6834}
6000 – 10 000	10,53 f ^{0,705}	61		61,4	0,16		0,163	10	10	10
10 000 – 15 000	10,53 f ^{0,705}	61		61,4	0,16		0,163	10	10	10
15 000 – 20 000	10,53 f ^{0,705}	61		61,4	0,16		0,163	10	10	10
20 000 – 100 000	35,85 f ^{0,296}	61		61,4	0,16		0,163	10	10	10
100 000 – 150 000	35,85 f ^{0,296}	61		61,4	0,16		0,163	10	(90xf-7000)/200	10
150 000 – 300 000	35,85 f ^{0,296}	61		0,158 f ^{0,5}	0,16		4,21 × 10 ⁻⁴ f ^{0,5}	10	(90xf-7000)/200	6,67 × 10 ⁻⁵ f

1 **Notes**

DOCUMENT EN CONSULTATION