www.next-up.org/news/restricted/ANSES.html

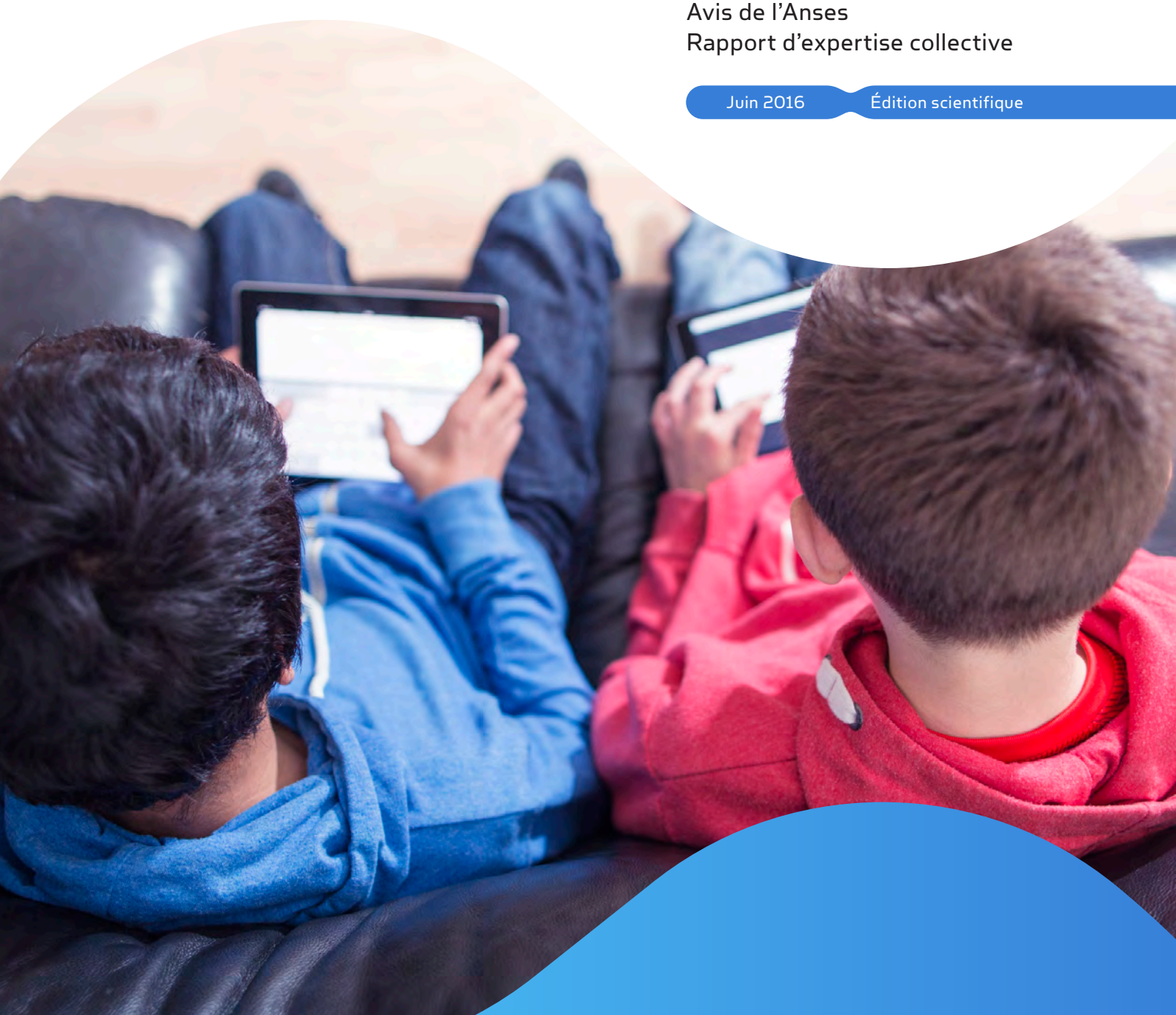
anses
agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail

Connaître, évaluer, protéger

Exposition aux radiofréquences et santé des enfants

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Juin 2016 Édition scientifique



anses
agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail

Connaître, évaluer, protéger

Exposition aux radiofréquences et santé des enfants

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Juin 2016 Édition scientifique

Avis de l'Anses
Saisine n° 2012-SA-0091
Saisine liée n°2011-SA-0150

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 20 juin 2016

AVIS
de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

relatif à l'expertise « Exposition aux radiofréquences et santé des enfants »

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont publiés sur son site internet.

L'Anses a été saisie le 12 juillet 2011 par la Direction générale de la santé (DGS), la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF) pour la réalisation de l'expertise suivante : « Exposition aux radiofréquences et santé des enfants ».

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

En 2009, dans son rapport d'expertise « Mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences » (Afsset, 2009), l'Agence précisait que la caractérisation de l'exposition des enfants aux radiofréquences et leurs effets sanitaires éventuels restaient méconnus. En 2013, l'Agence insistait à nouveau sur la nécessité de surveiller les effets éventuels des radiofréquences sur la santé des enfants (Anses, 2013).

Les enfants forment une population particulièrement sensible, en raison notamment du développement en cours de leurs organes et de leurs fonctions physiologiques. Par ailleurs, par l'usage précoce qu'ils peuvent avoir des dispositifs radioélectriques et la longue durée de leur exposition qui en résultera une fois adultes, ils doivent être considérés comme une population plus exposée aux champs électromagnétiques radiofréquences.

Il existe de nombreux appareils radioélectriques à destination des enfants. Ceux-ci peuvent être à usage récréatif, tels que les jouets radiocommandés, ou à usage de surveillance, tels que les veille-bébés. Ces appareils doivent être conformes aux directives 1999/5/CE[1] (dite « R&TTE ») et 2006/95/CE (dite « basse tension ») pour être placés sur le marché européen et doivent ainsi porter obligatoirement un marquage de conformité « CE », qui engage la responsabilité du fabricant ou de l'importateur au regard du respect des exigences essentielles en matière de sécurité et de santé, telles que définies par les directives précitées. 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.

Dans le contexte du Grenelle de l'environnement, une controverse scientifique et sociétale sur le niveau de protection qu'apportent ces directives pour les enfants exposés aux émissions de dispositifs radioélectriques a abouti à l'introduction, par la loi du 10 juillet 2010, de l'article L.5231-4 du code de la santé publique (CSP) stipulant que « la distribution à titre onéreux ou gratuit d'objets contenant un équipement radioélectrique dont l'usage est spécifiquement dédié aux enfants de moins de six ans peut être interdite par arrêté du ministre chargé de la santé, afin de limiter l'exposition excessive des enfants ».

La saisine soulève ainsi la question de savoir si les dispositions réglementaires actuelles sont suffisamment protectrices en matière de santé et de sécurité vis-à-vis des enfants de moins de six ans. Dès lors que certains équipements radioélectriques à destination des enfants présenteraient un danger pour eux, une application de l'article L.5231-4 du CSP pourrait alors être justifiée.

Afin de répondre aux questions posées par la saisine, l'Agence a engagé une expertise dont les objectifs étaient les suivants :

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

[1] La Directive européenne 1999/5/CE est abrogée le 13 juin 2016, elle est remplacée par la « Directive 2014/53/UE du Parlement européen et du Conseil du 16 avril 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché d'équipements radioélectriques et abrogeant la directive 1999/5/CE », appelée aussi « RED », pour *Radio Equipement Directive*.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

2.1. Expertise collective

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». Des experts rapporteurs, membres du groupe de travail « Radiofréquences et santé » et du CES « Agents physiques » ont été mandatés pour apporter leur contribution à ce travail d'expertise collective. Les travaux ont été présentés au CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques, entre le 16 septembre 2011 et le 3 mai 2016. Ils ont été adoptés par le CES « Agents physiques » réuni le 7 avril 2016.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise. Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

Les travaux d'expertise concernant l'évaluation des risques sanitaires liés à l'exposition des enfants aux radiofréquences s'appuient sur les analyses formulées dans les rapports « Mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences » (Afsset, 2009) et « radiofréquences et santé, mise à jour de l'expertise » (Anses, 2013). Les experts rapporteurs ont utilisé ce matériau comme socle de cette expertise, objet du rapport « Exposition aux radiofréquences et santé des enfants » et ont intégré à leurs analyses de nouvelles publications scientifiques.

2.2. Contributions extérieures

Une convention de recherche et développement a été contractée avec le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), afin notamment de produire un inventaire, le plus complet possible, des différents dispositifs radioélectriques commercialisés à destination des enfants de moins de six ans (jouets, objets communicants ou de surveillance) et procéder à un état des lieux des réglementations en vigueur et des textes normatifs applicables concernant l'exposition des enfants aux champs émis par les dispositifs radioélectriques. Les éléments d'information du rapport d'expertise, relatifs à l'état du marché et de la réglementation, s'appuient en partie sur le rapport réalisé par le LNE en 2012. Des mesures de l'exposition à un *talkie-walkie*, dont les niveaux de champs électrique émis mesurés par le LNE étaient particulièrement élevés, ont conduit l'Anses à faire réaliser, par un laboratoire accrédité par le Cofrac[2], des mesures de débit d'absorption spécifique (DAS) engendré par cet appareil dans la configuration d'utilisation telle que prévue par le constructeur (à 5 cm de distance), et aussi dans des configurations raisonnablement prévisibles d'utilisation, au contact du corps. Pour toutes les configurations testées, les résultats ont mis en évidence un DAS maximum inférieur à la valeur limite d'exposition de 2 W/kg.

Enfin, l'Agence nationale des fréquences (ANFR) a transmis à l'Anses, par courrier du 15 juillet 2015, des résultats de mesures de DAS de téléphones mobiles en situation d'utilisation au contact du corps, qui ont permis d'alimenter la discussion sur les niveaux d'exposition des

[2] Comité français d'accréditation.

enfants aux dispositifs radioélectriques. Ces données, fournies par l'ANFR, concernent aussi bien les enfants que les adultes.

2.3. Consultation publique

L'Agence a porté le rapport d'expertise dans un état pré-définitif, c'est-à-dire sans conclusion ni recommandation, à la connaissance des membres de la communauté scientifique et des parties prenantes intéressées, afin de recueillir leurs commentaires et les prendre en compte dans la phase d'élaboration du rapport d'expertise final. Cette consultation a été ouverte du 9 juin au 21 août 2015.

Tous les commentaires reçus ont été analysés par l'Agence : quatre réunions ont été organisées avec les experts rapporteurs, qui ont permis de contribuer à la rédaction des réponses à apporter aux commentaires, de discuter les nouvelles études à intégrer au rapport, et d'élaborer les conclusions et recommandations.

Les commentaires et les réponses apportées sont disponibles sous forme de tableau annexe à télécharger en complément du rapport d'expertise sur le site internet de l'Agence.

2.4. Description de la méthode : de la veille bibliographique à l'évaluation du niveau de preuve

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 (Anses, 2013) concernant le recensement des articles de la littérature scientifique et l'analyse des publications.

2.4.1. Revue bibliographique

La période de recherche bibliographique s'est étendue, dans un premier temps, du 1er janvier 2005 au 31 décembre 2013. Les articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture et les produits d'expertise collective d'organismes internationaux ont été recensés et examinés. Les études publiées avant le 28 février 2014 mentionnées lors de la consultation publique ont été prises en compte dans le rapport d'expertise final.

Une recherche bibliographique a été menée, afin d'identifier les études portant sur les effets des rayonnements électromagnétiques sur le corps humain, en ciblant l'exposition des enfants de moins de six ans, en particulier par des jouets émettant des champs électromagnétiques (par exemple voitures télécommandées et *talkies-walkies,* utilisant des fréquences de 27 MHz, 40 MHz et autour de 433 MHz), et pour des appareils de radiocommunication dédiés aux enfants émettant aux fréquences des principaux protocoles de communication sans-fil (GSM, DECT, Wi-Fi, c'est-à-dire la bande de fréquences allant de 800 MHz à 2,5 GHz).

La plupart des articles publiés identifiés s'intéresse aux expositions à des signaux GSM ou UMTS caractéristiques de la téléphonie mobile, raison pour laquelle le rapport s'appuie essentiellement sur des données liées à l'exposition à la téléphonie mobile.

Il existe peu d'études portant sur les enfants de moins de six ans. Comme la plupart des articles répertoriés considèrent que l'âge de la première utilisation du téléphone mobile se situe rarement avant sept ans, les études portant sur les enfants plus âgés (jusqu'à 16 ans) ont été prises en compte pour étudier les effets d'une exposition aux radiofréquences. De plus, dans l'objectif d'appréhender toutes les phases de leur développement, qui constitue une période de

sensibilité accrue, les études disponibles qui ont été examinées ont couvert l'exposition depuis la période *in utero* jusqu'à celle du jeune adulte.

2.4.2. Analyse des articles

Certaines études scientifiques examinées par le groupe de travail « Radiofréquences et santé » et analysées dans le précédent rapport de l'Anses sur les effets des radiofréquences (Anses, 2013) ont fait l'objet dans le rapport « Exposition aux radiofréquences et santé des enfants » d'un nouvel examen.

Chaque étude a été analysée *a minima* par deux experts, la partie de l'étude concernant le protocole d'exposition a été analysée par un expert physicien, et la partie sur les effets sanitaires par des experts épidémiologistes ou biologistes, en fonction de la nature de l'étude. Chaque expert relecteur a renseigné une grille de lecture, avec l'appui du coordinateur scientifique de l'Anses. Un tableau d'analyse des études a été construit, recensant notamment les différents critères d'analyse pertinents, les commentaires des experts rapporteurs sur les méthodologies (exposition et expérimentation notamment), les conclusions avancées par les auteurs et les sources de financement de chaque étude. Dans tous les cas, c'est la qualité de l'étude, c'est-à-dire la pertinence et la rigueur de son protocole et de l'analyse des résultats par les auteurs (analyses statistiques notamment), qui a motivé son inclusion dans l'évaluation du niveau de preuve pour chaque effet étudié, indépendamment de son résultat.

2.4.3. Méthode d'évaluation du niveau de preuve

La méthode d'évaluation des niveaux de preuve mobilisée pour l'expertise s'appuie sur les travaux antérieurs de l'Agence réalisés en particulier pour le rapport publié en 2013 ; la méthode a été revue et adaptée par les experts pour les besoins de la présente expertise, notamment pour ce qui concerne les matrices de classification du niveau de preuve des effets sanitaires.

Les études portant sur les effets biologiques sont incluses dans la procédure d'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires observés, par exemple en tant qu'explication mécanistique, et sont décrites dans un paragraphe indépendant. Les études utilisant des modèles *in vitro*, réalisées dans une finalité de recherche de mécanismes biologiques explicatifs d'effets sanitaires éventuels, ont été examinées en détail dans le rapport de l'Anses publié en 2013. Si elles n'ont pas été rappelées dans ce rapport, leurs conclusions ont été *de facto* prises en compte par l'expertise.

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

Le classement d'un effet résulte d'un processus d'évaluation collective et s'appuie sur les éléments d'appréciation extraits d'études épidémiologiques, cliniques et toxicologiques sur l'Homme et l'animal de laboratoire. Le rapport d'expertise présente en détail le processus de détermination du niveau de preuve adapté au cas spécifique de l'évaluation des effets des radiofréquences sur la santé des enfants.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

3.1. Résultats et conclusions de l'expertise

3.1.1. Caractérisation des expositions

Les données disponibles sur l'exposition montrent une forte expansion de l'usage des nouvelles technologies, et notamment chez les très jeunes enfants. Les sources d'exposition sont très nombreuses, diverses en nature, en intensité et par la fréquence des rayonnements émis. 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. De nombreux jouets émetteurs de champs électromagnétiques, comme les jouets connectés, arrivent sur le marché. Les enfants possèdent leur propre téléphone mobile de plus en plus précocement, même si la première utilisation se situe actuellement rarement avant l'âge de sept ans.

Des mesures de DAS local du téléphone mobile au contact du corps réalisées en 2015 par l'ANFR ont montré, à partir d'un échantillon de téléphones mobiles, que l'exposition résultante peut parfois être élevée : parmi les 95 téléphones mobiles prélevés par l'ANFR, 89 % d'entre eux mesurés au contact du corps présentaient un DAS supérieur à 2 W/kg et 25 % un DAS supérieur à 4 W/kg. Par ailleurs, la notice d'utilisation de 25 % des téléphones contrôlés présentant un DAS corps au contact supérieur à 2 W/kg n'indiquait pas de distance minimale d'utilisation.

Des modélisations numériques de l'exposition de la tête montrent que, pour des raisons anatomiques (taille, poids) ou liées aux propriétés diélectriques des tissus jeunes ou immatures, les enfants peuvent être plus exposés que les adultes, en particulier au niveau des aires cérébrales les plus proches de la boîte crânienne.

De plus, les études ayant évalué le DAS « corps entier » rapportent des niveaux d'exposition plus élevés chez les enfants que chez les adultes, en particulier dans deux gammes de fréquence : vers 100 MHz et autour de 1 à 4 GHz. Le DAS peut alors dépasser les restrictions de base de 40 % lorsque l'exposition est égale au niveau maximal autorisé pour les adultes (niveaux de référence). Ceci signifie que pour toute personne de taille inférieure à 1,30 m, les valeurs limites d'exposition réglementaires sont moins adaptées.

3.1.2. Évaluation du niveau de preuve pour les effets des radiofréquences sur la santé des enfants

La méthodologie précédemment décrite a été utilisée pour classer les différents effets potentiels des radiofréquences sur la santé des enfants. La synthèse des éléments de preuve et les niveaux de preuve de l'existence de chaque effet étudié sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Parmi les études épidémiologiques analysées, un certain nombre d'entre elles utilise, comme mesure de l'exposition aux radiofréquences, le recueil de données d'usage du téléphone mobile. Cependant, en pratique, chez les enfants de 8 à 12 ans et les adolescents (13 – 17 ans), la corrélation entre l'exposition aux radiofréquences et la durée d'utilisation du téléphone auto-rapportée par questionnaire est faible. De plus, les durées d'utilisation du téléphone mobile fournies par les opérateurs et estimées par les usagers diffèrent.

Par ailleurs, certains effets sanitaires observés pourraient résulter de l'exposition aux radiofréquences, de l'exposition à d'autres agents physiques (lumière bleue, *etc.*) émis par des dispositifs de communication sans fil, ou encore de l'utilisation qui est faite de ces appareils. Ainsi, l'usage du téléphone mobile (modalités, durée, fréquence d'utilisation, *etc.*) peut être considéré comme pouvant introduire un biais de confusion majeur dès lors que l'on cherche à caractériser l'association entre certains effets sanitaires et l'exposition aux radiofréquences. Par exemple, l'hypothèse d'un lien entre l'usage du téléphone mobile et l'apparition de troubles relevant de la santé mentale tels que décrits dans des études (altération du bien-être, dépression, troubles du sommeil, *etc.*) est plus plausible que l'hypothèse d'un lien entre l'usage du téléphone mobile et l'apparition d'effets sanitaires d'une autre nature, par exemple le cancer.

Par conséquent, la prise en compte de facteurs de confusion de nature psychosociale dans l'analyse du risque associé à l'usage des outils mobiles de communication représente un critère important pour déterminer le crédit devant être accordé aux résultats des études et à leur interprétation.

Ainsi, d'après les études disponibles analysées portant sur les effets sanitaires des radiofréquences, les travaux d'expertise collective permettent de conclure à un effet possible des radiofréquences sur :

- les fonctions cognitives : les résultats montrant des effets aigus se basent sur des études expérimentales dont la méthodologie est bien maîtrisée ;
- le bien-être : ces effets pourraient cependant être liés à l'usage du téléphone mobile plutôt qu'aux radiofréquences qu'ils émettent.

En revanche, les données actuelles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des radiofréquences chez l'enfant sur :

- le comportement ;
- les fonctions auditives ;
- les effets tératogènes et le développement ;
- le système reproducteur mâle et femelle ;
- les effets cancérogènes ;
- le système immunitaire ;
- la toxicité systémique.

Tableau : Classement des éléments de preuves et du niveau de preuve pour chaque effet étudié chez l'enfant

Effet étudié	Éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié **dans les études humaines cliniques et épidémiologiques**	Éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié **sur des modèles animaux**	Classement du **niveau de preuve de l'effet chez l'enfant**
Comportement	Les éléments de preuves disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences.	**-** les éléments de preuves disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences. **-** concernant l'activité locomotrice lors d'une exposition en période de développement chez l'animal, les éléments de preuve disponibles sont **en faveur d'une absence d'effet** des radiofréquences.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le comportement de l'enfant.
Fonctions cognitives	Les éléments de preuve sont **limités** pour conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives.	Les éléments de preuve sont **limités** pour conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives.	Les données disponibles permettent de conclure à **un effet possible** des radiofréquences sur les fonctions cognitives de l'enfant.
Fonctions auditives	Les éléments de preuves disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences.	Les éléments de preuves disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur les fonctions auditives de l'enfant.
Sommeil	Les éléments de preuves disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences.	Les éléments de preuves disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le sommeil chez l'enfant.

Effet étudié		Éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié **dans les études humaines cliniques et épidémiologiques**	Éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié **sur des modèles animaux**	Classement du **niveau de preuve de l'effet chez l'enfant**
Bien-être		Les éléments de preuve sont **limités** pour conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur le bien-être.	Absence de donnée.	Les données disponibles permettent de conclure à un effet **possible** des radiofréquences sur le bien-être des enfants.
Reproduction et développement	**effets tératogènes et sur le développement**	Absence de donnée.	Les éléments de preuve **disponibles ne montrent pas d'effet** des radiofréquences sur les effets tératogènes et le développement.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet tératogène des radiofréquences ou sur le développement de l'enfant.
	système reproducteur femelle	Absence de donnée.	Les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le système reproducteur femelle.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet sur le système reproducteur femelle de l'enfant.
	système reproducteur mâle	Absence de donnée.	Les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le système reproducteur mâle.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le système reproducteur mâle de l'enfant.

Effet étudié	Éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié **dans les études humaines cliniques et épidémiologiques**	Éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié **sur des modèles animaux**	Classement du **niveau de preuve de l'effet chez l'enfant**
Cancérogénèse	Les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet cancérogène des radiofréquences.	les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet cancérogène ou co-cancérogène.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet cancérogène des radiofréquences chez l'enfant. Dans la mesure où les tumeurs de l'enfant ne sont pas comparables aux tumeurs de l'adulte, les conclusions du rapport de 2013 montrant un effet limité des radiofréquences chez l'adulte sont difficilement extrapolables à l'enfant. Ceci ne permet cependant pas d'exclure que les enfants exposés ne développeront pas de tumeurs ultérieurement.
Système immunitaire	Absence de donnée.	Les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet sur le système immunitaire.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le système immunitaire de l'enfant.
Toxicité systémique	Absence de donnée.	Les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'une toxicité systémique des radiofréquences.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'une toxicité systémique des radiofréquences chez l'enfant.

3.2. Recommandations du CES

3.2.1. Recommandations en matière de réduction des niveaux d'exposition aux radiofréquences

Considérant

- l'augmentation de l'exposition de la moelle osseuse ou du cerveau des enfants par rapport aux adultes mise en évidence par certaines études dosimétriques ;
- l'augmentation du DAS « corps entier » chez les plus jeunes enfants par rapport aux adultes, liée aux différences morphologiques et anatomiques, pouvant conduire à dépasser les restrictions de base (DAS) de 40 % dans des conditions de type pire-cas (exposition environnementale élevée égale aux valeurs limites réglementaires) ;
- les niveaux d'exposition élevés engendrés par les téléphones mobiles au contact du corps ;
- les résultats d'études épidémiologiques mettant en évidence des effets possibles des radiofréquences sur la fonction cognitive et le bien-être des enfants ;
- la recommandation de diminution des valeurs limites d'exposition (niveaux de référence) dans certaines bandes de fréquences par le Conseil de santé des Pays-Bas, et leur révision adoptée par Santé Canada[3], afin de tenir compte des spécificités des enfants en matière d'exposition aux radiofréquences ;

Le CES recommande, en matière réglementaire :

- d'adapter les valeurs limites d'exposition réglementaires afin de prendre en compte les spécificités des enfants relatives à leur exposition aux radiofréquences ;
- que soient réalisées, avant leur mise sur le marché, des mesures de DAS de terminaux autres que les téléphones mobiles (tablettes, jouets, *etc.*) dans des conditions réelles d'utilisation, dont les résultat figureraient dans la notice de l'appareil, et que ce DAS soit soumis à des valeurs limites réglementaires en fonction de l'utilisation probable de l'appareil ;
- que les dispositions réglementaires limitant la publicité pour les téléphones mobiles ciblant les enfants soient étendues aux autres appareils communicants destinés aux enfants.

Le CES recommande, notamment aux parents, en matière de réduction de l'exposition :

- de limiter l'utilisation par les enfants des dispositifs électroniques émetteurs (tablettes, téléphone, *etc.*) ;
- que le téléphone ne soit pas laissé en communication au contact du corps pour éviter les éventuels effets thermiques.

[3] Voir les paragraphes 3.1.2 Avis du Conseil de santé des Pays-Bas (2011) et 3.1.3 Révision du code de sécurité 6 relatif aux dispositifs émettant des rayonnements (Santé Canada – 2014).

3.2.2. Recommandations en matière de réduction de l'usage du téléphone mobile :

Considérant :

- les résultats des études épidémiologiques mettant en évidence une santé mentale affectée chez les adolescents ayant « un usage problématique du téléphone mobile » ;
- la forte expansion de l'usage des nouvelles technologies, notamment chez les très jeunes enfants ;

Le CES recommande que les parents incitent les enfants à un usage raisonnable du téléphone mobile (éviter les communications nocturnes, limiter la fréquence et la durée des appels, *etc.*).

3.2.3. Recommandations en matière d'études et de recherche

<u>Études visant à améliorer la caractérisation des expositions, notamment à d'autres signaux que ceux de la téléphonie mobile</u>

Considérant en particulier :

- l'apparition de nouvelles technologies de communication mobile, qui utilisent de nouveaux types de signaux (5G, objets connectés, *etc.*) ;
- que les données actuelles disponibles concernent essentiellement des signaux de type 2G et 3G et le Wi-Fi ;
- qu'une étude de provocation chez l'adolescent met en évidence des résultats différents (modification de paramètres de l'électroencéphalogramme) en fonction du signal utilisé (2G *versus* 3G) ;

Le CES recommande d'engager des études, afin notamment :

- de mieux caractériser les usages des différents dispositifs radioélectriques par les enfants (quels types de dispositifs, quelles fréquence et durée d'usage, à partir de quel âge, *etc.*) ;
- de connaître l'exposition réelle des enfants aux radiofréquences en situation d'usage de l'ensemble des dispositifs radioélectriques ;

Par ailleurs, le CES souligne l'importance de rechercher les effets sanitaires éventuels liés à une exposition à des nouveaux signaux radiofréquences.

<u>Études expérimentales chez l'Homme et l'animal</u>

Considérant,

- la mise en évidence dans deux études cliniques de différences légères à modérées dans le tracé électro-encéphalographique dans les bandes de fréquence thêta (4-8 Hz) et béta (12-15 Hz) entre les enfants exposés et non exposés ;
- les effets relatifs à une exposition aux radiofréquences sur l'excitabilité cérébrale chez l'adulte sain ou plus généralement sur l'activité électrique cérébrale (EEG, potentiels évoqués, *etc.*) (voir rapport Anses 2013) ;
- que l'épilepsie est une pathologie neurologique qui relève d'une hyper-excitabilité neuronale et/ou d'une anomalie de la synchronisation de populations de neurones et que l'incidence de cette maladie varie considérablement en fonction de l'âge ;

le CES recommande :

- de réaliser des études sur les effets des radiofréquences en lien avec les fonctions cérébrales étudiées soit en imagerie cérébrale chez l'enfant soit par l'enregistrement de l'activité électrique cérébrale (EEG), en condition basale ou de stimulation (tâches cognitives), chez l'enfant ou l'animal, à divers âges du développement ;
- d'étudier l'impact des radiofréquences sur le tracé électroencéphalographique ou sur la survenue de crises d'épilepsie chez l'enfant.

Considérant par ailleurs,

- la divergence des résultats des études épidémiologiques et expérimentales sur les fonctions cognitives, concluant soit à une absence d'effet soit à une amélioration des performances ;
- la divergence entre les résultats de diverses études chez l'animal, avec des effets qui pourraient dépendre du type de tâche ;

Le CES recommande :

- de réaliser chez l'enfant des études de provocation explorant diverses fonctions cognitives (mémoire, raisonnement, fonctions exécutives, attention) à différents âges, en situation d'exposition ou non à des radiofréquences ;
- d'entreprendre chez l'animal des études explorant les effets d'une exposition aux radiofréquences sur les fonctions cognitives (mémoire, fonctions exécutives, attention) associées à l'étude de la morphologie et de la plasticité cérébrale (approches électrophysiologiques, marqueurs immunohistochimiques, *etc.*) ;
- d'étudier les effets potentiels sur le développement cérébral d'une exposition aux radiofréquences en fonction de l'âge, en engageant des études longitudinales chez l'animal juvénile de plusieurs âges, et en comparant avec l'adulte, afin d'identifier des périodes de sensibilité/vulnérabilité éventuelles.

<u>Études épidémiologiques</u>

Considérant, en particulier,

- que les enfants sont exposés de façon de plus en plus précoce à des appareils émettant des champs électromagnétiques radiofréquences ;
- l'importance du facteur de confusion introduit par l'usage du téléphone mobile pour estimer l'exposition aux radiofréquences ;

le CES recommande :

- de réaliser une mise à jour de l'évaluation du risque cancérogène des radiofréquences chez l'enfant lorsque les résultats de l'étude MOBi-Kids seront publiés ;
- de prendre en compte les facteurs de confusion en lien avec l'usage des appareils radioélectriques et les effets sur la santé, notamment lorsque les effets sanitaires étudiés concernent la santé perçue, les troubles du comportement, l'altération du bien-être, la dépression, *etc.* Ces facteurs de confusion peuvent être dans le champ de la santé mentale, de la construction psychologique, des modes de relations familiales, *etc.*

Effets psycho-sociaux des usages des nouvelles technologies

Considérant

- la forte expansion de l'usage des nouvelles technologies, notamment chez les très jeunes enfants ;
- les études épidémiologiques mettant en évidence une santé mentale affectée chez les adolescents ayant « un usage problématique du téléphone mobile » ;

Le CES recommande d'étudier l'impact des usages des technologies de communication sur :

- les troubles relevant de la santé mentale (stress, addiction, dépression, *etc.*) ;
- les relations familiales, l'apprentissage scolaire, *etc.*

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

Les enfants sont, tout comme les adultes, exposés aux diverses sources de rayonnement électromagnétiques présentes dans l'environnement : champs basses fréquences provenant du transport et de la distribution d'électricité, et champs radiofréquences issus des sources de radio et télédiffusion, de communication mobile et notamment de l'ensemble des appareils domestiques qui émettent des rayonnements. Parmi ces dispositifs émetteurs, certains leurs sont spécifiquement destinés : jouets radiocommandés, veille-bébés, dispositifs de surveillance, *talkies-walkies* ou encore robots communicants. D'autres, d'abord destinés aux adultes, sont dorénavant parfois spécifiquement conçus pour eux (tablettes sans fil par exemple), ou utilisés à partir d'un âge de plus en plus précoce (téléphone mobile).

En raison du développement extrêmement rapide des technologies de communication mobile, qui placent ces sources radiofréquences à proximité, et parfois au contact du corps, les enfants d'aujourd'hui, à la différence des générations précédentes, sont exposés pour la plupart dès leur plus jeune âge, et dès la phase de développement *in utero*, à des sources émettrices et multiples de radiofréquences.

L'expertise conduite par l'Agence a rassemblé les connaissances récentes et disponibles sur les spécificités de l'exposition des enfants aux radiofréquences et leurs effets biologiques et sanitaires éventuels, explorés par la recherche. Afin d'évaluer le niveau de preuve des effets sanitaires potentiels rapportés dans la littérature, l'expertise réalisée a repris et adapté les principes méthodologiques exposés dans le rapport de l'Anses sur les effets des radiofréquences (Anses, 2013) concernant le recensement des articles de la littérature scientifique, l'analyse des publications, ainsi que la détermination des éléments de preuve.

En 2015, l'Agence a soumis à la consultation publique le rapport d'expertise *via* son site internet, afin de recueillir les informations et données qui permettraient de compléter, le cas échéant, le recensement effectué par les experts. Les commentaires reçus de la part des parties prenantes intéressées, au nombre d'une centaine, ont été analysés dans le cadre de l'expertise, et une réponse pour chacun y a été apportée, disponible sous forme d'annexe à télécharger en complément du rapport d'expertise et du présent avis sur le site internet de l'Agence.

L'Anses reprend l'ensemble des conclusions et recommandations, rappelées au paragraphe 3 du présent avis, de son comité d'experts spécialisés « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». Elle précise et complète ci-dessous les recommandations visant à adapter les valeurs limites réglementaires, limiter l'exposition des enfants et inciter à un usage raisonnable des technologies de communication sans-fil.

- *Reconsidérer les valeurs limites d'exposition réglementaires et les indicateurs d'exposition*

Au-delà de l'importante diversité des sources d'émission qui exposent les enfants aux champs électromagnétiques radiofréquences, les travaux d'expertise ont mis en évidence le fait que les enfants pouvaient être, dans certaines bandes de fréquences, plus exposés que les adultes. En effet, dans le cas des expositions « environnementales », c'est-à-dire liées à des sources lointaines (telles que les antennes relais de téléphonie mobile ou les émetteurs de radio et télédiffusion), la petite taille des enfants peut, par effet de résonance, engendrer des expositions moyennes sur le corps entier plus élevées que pour les adultes.

Ces observations ont déjà amené le Conseil de santé des Pays-Bas, en 2011, à considérer que les niveaux de référence définis par l'Icnirp[4] *(International Commission on Non Ionizing Radiation Protection)* et adoptés par la Recommandation européenne n° 1999/519/CE[5], autour de 2 GHz, devaient être ajustés. De même, Santé-Canada, le 13 mars 2015, a publié une nouvelle version de son « Code de sécurité 6 », qui définit des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques, dans laquelle les niveaux de référence ont été légèrement diminués, afin d'accroitre les marges de sécurité, notamment pour les enfants[6].

L'Agence recommande, dans ce contexte, que les niveaux de référence visant à limiter l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques radiofréquences (liée aux sources lointaines) soient reconsidérés, afin d'assurer des marges de sécurité suffisamment grandes pour protéger la santé et la sécurité de la population générale, et tout particulièrement celles des enfants.

Dans le cas d'expositions localisées, par exemple de la tête, avec des sources d'émission telles que le téléphone mobile, les études analysées montrent que, là encore, les enfants peuvent être plus exposés que les adultes, en raison de leurs spécificités morphologiques et anatomiques et de la nature de leurs tissus, avec toutefois une variabilité des résultats très importante. S'agissant des expositions en champ proche induites par l'usage des dispositifs de communication mobile, l'Agence considère qu'il est nécessaire ;

- de réévaluer la pertinence du débit d'absorption spécifique (DAS) utilisé pour l'établissement des valeurs limites d'exposition des personnes, à des fins de protection contre les effets sanitaires connus et avérés (effets thermiques) des radiofréquences ;
- et de développer un indicateur représentatif de l'exposition réelle des utilisateurs de téléphones mobiles, quelles que soient les conditions d'utilisation : signal utilisé, bonne ou mauvaise réception, mode d'usage (appel, chargement de données, *etc.*).

- *Limiter l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques*

Les résultats de l'expertise incitent l'Anses à rappeler la recommandation formulée dans ses avis publiés en octobre 2009 (*Les radiofréquences - mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences*) et en octobre 2013 (*radiofréquences et santé – mise à jour de l'expertise*), invitant à réduire l'exposition des enfants aux radiofréquences émises par les téléphones

[4] Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants.

[5] Ces valeurs limites ont été intégrées dans la réglementation nationale par le décret n° 2002-775 du3 mai 2002.

[6] Santé Canada a ainsi abaissé, en mars 2015, les valeurs limites d'exposition environnementale en champ électrique (niveaux de référence) par exemple à 32 V/m à 900 MHz et à 41 V/m à 1 800 MHz (actuellement les valeurs sont respectivement de 41 V/m et 58 V/m en France).

mobiles, en incitant à un usage modéré de ces dispositifs et en privilégiant le recours au kit main-libre.

En complément, l'Agence recommande :

- que la réglementation actuelle visant à réguler l'exposition de la population générale aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunications ou par les installations radioélectriques (décret n° 2002-775 du 3 mai 2002) soit étendue aux autres sources d'émissions artificielles de rayonnements radiofréquences, pour lesquelles la conformité aux valeurs limites d'exposition ne peut être établie *a priori* ;
- que l'ensemble des dispositifs émetteurs de champs électromagnétiques destinés à être utilisés à proximité ou par les enfants (tablettes tactiles, veille-bébés, *etc.*), dont l'exposition maximale doit être conforme aux valeurs limites réglementaires, satisfassent aux obligations d'information du public (Article 184.-I de la loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 modifié par la loi n° 2015-136 du 9 février 2015)
- d'assurer en toutes circonstances le respect des valeurs limites d'exposition réglementaires, quels que soient les dispositifs émetteurs mobiles utilisés et leurs conditions d'utilisation (positionnement au contact du corps).

▪ *Inciter à un usage raisonné des technologies de communication mobile*

Au-delà, et sans lien avec l'exposition aux radiofréquences, plusieurs études ont mis en évidence une association entre un « usage problématique » (intensif et inadéquat) du téléphone mobile par des jeunes et une santé mentale affectée (dépression, idées suicidaires, comportement à risque, *etc.*). Ces études ne permettent cependant pas d'explorer la causalité des associations observées.

En conséquence, l'Agence recommande :

- que des études complémentaires évaluent l'impact sanitaire et psychosocial (apprentissage scolaire, relations sociales et familiales, *etc.*) chez les enfants lié à l'usage des technologies de communication mobile, en raison notamment de phénomènes addictifs, de troubles des rythmes circadiens, *etc.* ;
- que, dans l'attente, les parents incitent les enfants à un usage raisonné du téléphone mobile, par exemple en évitant les communications nocturnes, en limitant la fréquence et la durée des appels, *etc. ;*
- et, de façon plus générale, de dissuader l'usage par les enfants de l'ensemble des dispositifs de communication mobile, par exemple en étendant à ces dispositifs les dispositions réglementaires interdisant la publicité ayant pour but direct de promouvoir la vente, la mise à disposition, l'utilisation ou l'usage d'un téléphone mobile par des enfants de moins de quatorze ans.

Le Directeur général

Roger GENET

MOTS-CLES

Radiofréquences, enfant, dispositifs radioélectriques, exposition, évaluation des risques, santé, téléphonie mobile, Wi-Fi, 3G, 4G, DAS.

Radiofrequencies, child, radioelectric devices, exposure, risk assessment, health, mobile phone, Wi-Fi, 3G, 4G, SAR.

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

Comité d'experts spécialisés :

« Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements »

Avril 2016

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de environnement et du travail,
14 rue Pierre et Marie Curie, 94701 Maisons-Alfort Cedex
Téléphone : + 33 (0)1 49 77 13 50 – Télécopie : + 33 (0)1 49 77 26 26 – www.anses.fr

Mots clés

Radiofréquences, enfants, dispositifs radioélectriques, exposition, évaluation des risques, santé, téléphonie mobile, Wi-Fi, 3G, 4G, DAS.

Présentation des intervenants

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

RAPPORTEURS

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

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

Thierry LETERTRE – Enseignant-chercheur à Supélec.

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

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

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

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

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

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

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

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

- **Mandat 2011-2013**

Présidente

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

Membres

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

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

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

Frédéric COUTURIER – Ingénieur, Responsable du département « Études » à l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR).

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

Pierre DUCIMETIÈRE – Directeur de recherche honoraire à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

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

Nicolas FELTIN – Responsable de mission au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).

Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Éric GAFFET – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Murielle LAFAYE – Ingénieur, Coordinatrice applications au Centre national d'études spatiales (CNES).

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

Christophe MARTINSONS – Docteur en physique, Chef de pôle au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB).

Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'ouest (UCO).

Alain MUZET – Retraité CNRS, médecin, spécialiste du sommeil et de la vigilance.

Yves SICARD – Maitre de conférences à l'Université Josef Fourrier, Conseiller Scientifique au Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies alternatives (CEA).

Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de santé au travail Nord Picardie.

Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.

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

- **Mandat 2014-2016**

Présidente

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

Membres

Laurent BEUGNET – Médecin du travail, RATP.

Alexandre BOUNOUH – Chef de projet / Ingénieur de recherche au Laboratoire national d'essais (LNE).

Brigitte DEBUIRE – Professeur des universités émérite.

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

Thierry DOUKI – Chef de laboratoire / Ingénieur docteur en chimie, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Pierre DUCIMETIÈRE – Directeur de recherche honoraire à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Nicolas FELTIN – Responsable de mission au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).

Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Éric GAFFET – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Murielle LAFAYE – Ingénieur, Coordinatrice applications au Centre national d'études spatiales (Cnes).

Joël LELONG – Directeur adjoint de laboratoire / Docteur en physique, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Christophe MARTINSONS – Docteur en physique, Chef de pôle au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB).

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

Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'ouest (UCO).

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

Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de santé au travail Nord Picardie.

Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.

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

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

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

Contribution scientifique

Johanna FITE – Chef de projets scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

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

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

Secrétariat administratif

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

CONTRIBUTIONS EXTÉRIEURES AU(X) COLLECTIF(S)

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

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

SOMMAIRE

Présentation des intervenants 3
Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions 11
Sigles et abréviations 23
Glossaire 24
Liste des tableaux 26
Liste des figures 27

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine 30
1.1 Contexte 30
1.2 Objet de la saisine 31
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre 32
1.3.1 Expertise collective 32
1.3.2 Conventions de recherche et développement 32
1.3.3 Revue bibliographique 33
1.3.4 Consultation publique 33
1.3.4.1 Objectif 33
1.3.4.2 Procédure 33
1.3.4.3 Calendrier 33
1.3.4.4 Prise en compte des remarques reçues 33
1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts. 34
1.5 Les limites du champ d'expertise 34
1.5.1 Bandes de fréquences considérées 34
1.5.2 Les appareils étudiés 34
1.5.3 Les populations étudiées 35

2 Avis des instances internationales et de l'Anses 36
2.1 Avis des instances internationales concernant les risques d'une exposition aux radiofréquences pour les enfants 36
2.1.1 Rapport Jülich (2009) 36
2.1.2 Conseil de santé des Pays-Bas (2011) 36
2.1.3 Centre international de recherche sur le Cancer (2013) 36
2.1.4 Santé publique Angleterre (2012) 36
2.1.5 Scenihr 2007, 2009 et 2013 37
2.1.6 Société royale du Canada (Demers, 2014) 37
2.1.7 Neuvième rapport du Conseil scientifique du SSM sur les champs électromagnétiques (2014) 38
2.1.8 Pré-rapport de l'OMS sur les effets des champs électromagnétiques radiofréquences (2014) 38
2.2 Rapports Anses de 2001 à 2013 38

3 État des lieux de la réglementation sur les expositions aux champs électromagnétiques 39
3.1 Valeurs limites d'exposition : prise en compte de la spécificité des enfants 39
3.1.1 Travaux de l'Icnirp 39
3.1.2 Avis du Conseil de santé des Pays-Bas (2011) 41

3.1.3 Révision du code de sécurité 6 relatif aux dispositifs émettant des rayonnements (Santé Canada – 2015) 42
3.2 Le cadre réglementaire européen relatif à l'exposition du public aux champs électromagnétiques 43
3.2.1 La recommandation 1999/519/CE du Conseil européen : 43
3.2.2 La directive européenne 1999/5/CE dite « R&TTE » 44
3.2.2.1 Principe et domaine d'application de la directive « R&TTE » 44
3.2.2.2 Exigences essentielles et conformité des appareils 45
3.2.2.3 Les recommandations de la directive 45
3.2.2.4 Les normes harmonisées de la directive 46
3.2.3 Évolutions réglementaires 46
3.3 Panorama international des dispositions prenant en compte spécifiquement les enfants 47
3.3.1 En France 47
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 47
3.3.1.2 La loi n° 2015-136 du 9 février 2015 relative à la sobriété, à la transparence, à l'information et à la concertation en matière d'exposition aux ondes électromagnétiques 47
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 48
3.3.3 Autres dispositions nationales 48
3.4 Synthèse sur la réglementation et la normalisation des appareils radioélectriques pour enfants 50

4 Caractérisation des expositions 51
4.1 Identification des sources d'exposition spécifiques aux enfants 51
4.1.1 Les veille-bébés (ou *babyphone*) 52
4.1.2 Les jouets radiocommandés 53
4.1.3 Les *talkies-walkies* 54
4.1.4 Les robots communicants 54
4.1.5 Les téléphones mobiles pour enfants 55
4.1.6 Les tablettes tactiles pour enfants 56
4.1.7 Les jouets connectés 57
4.1.8 Les modules anti-éloignement et applications de géolocalisation 57
4.2 Taux d'équipement en téléphone mobile et habitudes téléphoniques des enfants et adolescents 58
4.2.1 Taux d'équipement 58
4.2.2 Habitudes téléphoniques 59
4.2.3 Commentaires sur la méthodologie des études d'exposition 60
4.3 Mesures de l'exposition au champ électromagnétique émis par des appareils destinés à être utilisés par des enfants de moins de 6 ans 61
4.3.1 Données d'exposition issues de la littérature 61
4.3.1.1 Veille-bébés 62
4.3.1.2 Tablettes tactiles 63
4.3.1.3 Exposition aux signaux Wi-Fi dans les écoles 63
4.3.2 Caractérisation de l'exposition induite par certains dispositifs radioélectriques 64
4.3.2.1 Considérations sur les champs électriques mesurés 68
4.3.2.2 Extrapolation des champs aux distances d'utilisation 68
4.3.2.3 Détermination des valeurs de champ électrique pour les distances considérées. 68
4.3.3 Données d'expositions spécifiques aux téléphones mobiles portés près du corps 71

4.4 Spécificités de l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques 74
4.4.1 Influence des propriétés diélectriques (permittivité et conductivité) 76
4.4.1.1 Variations des propriétés diélectriques avec l'âge 77
4.4.1.2 Impact des variations des propriétés diélectriques sur le DAS 79
4.4.2 Influence des différences morphologiques sur l'exposition 82
4.4.2.1 Exposition des fœtus 82
4.4.2.2 Exposition du crâne 83
4.4.2.3 Exposition de type « corps entier » 88
4.4.3 Influence de la résonance sur l'exposition 92

5 Étude des effets potentiels des radiofréquences sur la santé des enfants 94

5.1 Usage des outils de télécommunications mobiles et exposition aux radiofréquences 94

5.2 Méthodologie d'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires 99
5.2.1 Étude des effets des radiofréquences sur des modèles animaux (Figure 21) 100
5.2.2 Étude des effets des radiofréquences chez l'enfant (Figure 22) 101
5.2.3 Évaluation globale (Figure 23) 102

5.3 Rappels physiologiques sur le développement de l'enfant 105
5.3.1 Le développement cérébral chez l'Homme 105
5.3.1.1 Généralités 105
5.3.1.2 Les principales étapes du développement cérébral (Figure 24) 105
5.3.1.3 Le développement structural 106
5.3.1.4 Le développement de la barrière hématoencéphalique (BHE) 109
5.3.1.5 Développement de l'activité fonctionnelle cérébrale (consommation cérébrale de glucose et d'O_2 et débit sanguin cérébral) 112
5.3.1.6 Corrélats cognitifs 114
5.3.1.7 Les techniques d'imagerie non invasive pour l'étude du développement du cerveau humain 115
5.3.2 Développement de la fonction de reproduction 115
5.3.3 Développement de la moelle osseuse 116
5.3.3.1 Particularités physiologiques chez l'enfant 117
5.3.3.2 Particularités en pathologie 117

5.4 Transposition des résultats obtenus sur des animaux à l'Homme 117
5.4.1 Éléments de comparaison entre le développement cérébral chez les animaux de laboratoire et chez l'Homme 118
5.4.2 Éléments de comparaison entre le développement de la fonction de reproduction chez les animaux de laboratoire et chez l'Homme 120

5.5 Études sur le système nerveux 122
5.5.1 Effets biologiques et mécanistiques 122
5.5.1.1 Effets sur la barrière hémato encéphalique 122
5.5.1.2 Effets sur la réponse cellulaire – le stress oxydant et la neuroinflammation 125
5.5.1.2.1 Études in utero 125
5.5.1.2.2 Études combinées pré- et post- natales ou postnatales seules 125
5.5.1.3 Effets sur la morphologie cérébrale 135
5.5.1.4 Effets sur l'activité électrique cérébrale 137
5.5.2 Effets sur les fonctions cognitives et le comportement 145
5.5.2.1 Études chez l'homme 145
5.5.2.1.1 Études de type expérimental 145
5.5.2.1.2 Études épidémiologiques 148
5.5.2.2 Études chez l'animal 157
5.5.2.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le comportement et les fonctions cognitives 163
5.5.3 Effets sur les fonctions auditives 169

5.5.3.1 Études chez l'Homme 169
5.5.3.2 Études chez l'animal 169
5.5.3.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur les fonctions auditives 173
5.5.4 Effets sur le sommeil 176
5.5.4.1 Chez l'Homme 176
5.5.4.2 Chez l'animal 176
5.5.4.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le sommeil. 180
5.6 Études sur le bien-être 182
5.6.1 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le bien-être. 190
5.7 Études sur le système reproducteur et le développement 192
5.7.1 Chez l'Homme 192
5.7.2 Chez l'animal 192
5.7.2.1 Exposition *in utero* 192
5.7.2.2 Exposition prénatale, postnatale ou combinée pré- et post- natale 193
5.7.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le système reproducteur mâle et femelle chez l'Homme et l'animal 202
5.8 Études sur la cancérogenèse 209
5.8.1 Chez l'Homme 209
5.8.1.1 Exposition aux tours d'émissions de radio et télédiffusion et stations de base de téléphonie mobile 209
5.8.1.2 Exposition *via* le téléphone mobile 211
5.8.1.2.1 Analyse des tendances temporelles 211
5.8.1.2.2 Études cas-témoins 212
5.8.1.3 Autres expositions des enfants aux radiofréquences 214
5.8.2 Chez l'animal 217
5.8.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet cancérigène des radiofréquences 222
5.9 Autres effets 225
5.9.1 Système immunitaire 225
5.9.1.1 Exposition *in utero* 225
5.9.1.2 Exposition pré- et post- natale 225
5.9.1.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le système immunitaire 227
5.9.2 Toxicité systémique 229
5.9.2.1 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur la toxicité systémique 229

6 Conclusions 233

7 Bibliographie 234
7.1 Publications 234
7.2 Normes 251
7.3 Législation et réglementation 251

ANNEXES 253

Annexe 1 : lettre de saisine 254
Annexe 2 : recommandations techniques d'allocations de fréquence 256
Annexe 3 : normes EN 300 220 et EN 50371 258
Annexe 4 : caractéristiques diélectriques des milieux biologiques 261
Annexe 5 : comparaison des valeurs limites d'exposition 266

Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions

EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

relatives à l'expertise « Exposition aux radiofréquences et santé des enfants »

Ce document synthétise les travaux du comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ».

Présentation de la question posée

La Direction générale de la santé (DGS), la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF) ont saisi l'Anses le 12 juillet 2011 afin d'identifier les risques sanitaires potentiels liés à l'utilisation d'appareils radioélectriques générant des champs électromagnétiques radiofréquences par ou à proximité des enfants de moins de 6 ans, et justifier ainsi, le cas échéant, le retrait du marché des équipements en question.

Contexte scientifique

En 2009, dans son rapport d'expertise « Mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences » (Afsset, 2009), l'Agence précisait que la caractérisation de l'exposition des enfants aux radiofréquences et les effets sanitaires éventuels restaient méconnus. En 2013, l'Agence insistait à nouveau sur la nécessité de surveiller les effets éventuels des radiofréquences sur la santé des enfants (Anses, 2013).

Il existe de nombreux appareils radioélectriques à destination des enfants. Ceux-ci peuvent être à usage récréatif, tels que les jouets radiocommandés, ou à usage de surveillance, tels que les veille-bébés. Ces appareils doivent être conformes aux directives 1999/5/CE[1] (dite « R&TTE ») et 2006/95/CE[2] (dite « basse tension ») pour être placés sur le marché européen et ainsi porter obligatoirement un marquage de conformité « CE [3]». 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

[1] Directive 1999/5/CE du Parlement européen et du Conseil, du 9 mars 1999, concernant les équipements hertziens et les équipements terminaux de télécommunications et la reconnaissance mutuelle de leur conformité, dite « R&TTE » (*Radio and Terminal Telecommunication Equipement*).

[2] Directive 2006/95/CE du Parlement européen et du Conseil, du 12 décembre 2006, concernant le rapprochement des législations des États membres relatives au matériel électrique destiné à être employé dans certaines limites de tension

[3] 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.

leur dangerosité. Dans le contexte du Grenelle de l'environnement, une controverse scientifique et sociétale sur le niveau de protection qu'apportent ces directives eu égard à l'exposition des enfants a abouti à l'introduction, par la loi du 10 juillet 2010, de l'article L.5231-4 du code de la santé publique (CSP) stipulant que « la distribution à titre onéreux ou gratuit d'objets contenant un équipement radioélectrique dont l'usage est spécifiquement dédié aux enfants de moins de six ans peut être interdite par arrêté du ministre chargé de la santé, afin de limiter l'exposition excessive des enfants ».

La saisine soulève ainsi la question de savoir si les directives « R&TTE » et « basse tension » sont suffisamment protectrices en matière de santé et de sécurité vis-à-vis des enfants de moins de six ans. Dès lors que certains équipements radioélectriques à destination des enfants présenteraient un danger pour eux, une application de l'article L.5231-4 du CSP pourrait alors être justifiée.

Organisation de l'expertise

Afin de répondre aux questions posées par la saisine, l'Agence a engagé une expertise dont les objectifs étaient les suivants :

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

Expertise collective

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

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

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

Les travaux d'expertise concernant l'évaluation du risque sanitaire lié à l'exposition des enfants aux radiofréquences s'appuient sur les analyses formulées dans les rapports « Mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences » (Afsset, 2009) et « radiofréquences et santé, mise à jour de l'expertise » (Anses, 2013). Les experts rapporteurs ont utilisé ce matériau comme socle de cette expertise, objet du rapport « exposition aux radiofréquences et santé des enfants » et ont intégré à leurs analyses de nouvelles publications scientifiques.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise ».

Contributions extérieures

Une convention de recherche et développement a été contractée avec le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) afin notamment de produire un inventaire, le plus complet possible, des différents produits radioélectriques commercialisés à destination des enfants de moins de six ans (jouets, objets communicants ou de surveillance) et procéder à un état des lieux des réglementations en vigueur et des textes normatifs applicables concernant l'exposition des enfants aux champs émis par les dispositifs radioélectriques. Les éléments d'information du rapport d'expertise, relatifs à l'état du marché et de la réglementation, s'appuient en partie sur le rapport réalisé par le LNE en 2012. Des mesures de l'exposition à un *talkie-walkie*, dont les niveaux de champs électrique émis mesurés par le LNE étaient particulièrement élevés, ont conduit l'Anses à faire réaliser par un laboratoire accrédité Cofrac des mesures de débit d'absorption spécifique (DAS) engendré par cet appareil, dans la configuration d'utilisation telle que prévue par le constructeur (à 5 cm de distance), et aussi dans des configurations raisonnablement prévisibles d'utilisation. Pour toutes les configurations testées, les résultats ont mis en évidence un DAS maximum inférieur à la valeur limite d'exposition de 2 W/kg.

Enfin, l'Anses a eu communication, le 15 juillet 2015, par l'Agence nationale des fréquences (ANFR), de résultats de mesures de DAS de téléphones mobiles en situation d'utilisation au contact du corps, qui ont permis d'alimenter la discussion sur les niveaux d'exposition des enfants aux dispositifs radioélectriques.

Consultation publique

L'Agence a porté le rapport d'expertise dans un état pré-définitif, c'est-à-dire sans conclusion ni recommandation, à la connaissance des membres de la communauté scientifique et des parties prenantes intéressées, afin de recueillir leurs commentaires et de les prendre en compte dans la phase d'élaboration finale du rapport d'expertise. Cette consultation a été ouverte du 9 juin au 21 août 2015.

Tous les commentaires reçus ont été analysés par l'Agence. Quatre réunions ont été organisées par l'Agence avec les experts rapporteurs qui ont permis de contribuer à la rédaction des réponses à apporter aux commentaires, de discuter les études à intégrer au rapport, et d'élaborer les conclusions et recommandations.

Les commentaires et les réponses apportées sont disponibles sous forme de tableau annexe à télécharger en complément du rapport d'expertise sur le site internet de l'Agence.

Description de la méthode : de la veille bibliographique à l'évaluation du niveau de preuve

<u>Revue bibliographique</u>

La période de recherche bibliographique s'est étendue dans un premier temps du 1er janvier 2005 au 31 décembre 2013. Les articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture et les produits d'expertise collective d'organismes internationaux ont été recueillis et examinés. Les études publiées avant le 28 février 2014 mentionnées lors de la consultation publique ont été prises en compte dans le rapport d'expertise final.

Une recherche bibliographique a été menée afin d'identifier les études portant sur les effets des rayonnements électromagnétiques sur le corps humain, en ciblant l'exposition des enfants de moins de six ans, en particulier par des jouets émettant des champs électromagnétiques (par exemple voitures télécommandées et *talkies-walkies,* utilisant des fréquences de 27 MHz, 40 MHz et autour de 433 MHz), et pour des appareils de radiocommunication dédiés aux enfants émettant aux fréquences des principaux protocoles de communication sans-fil (GSM, DECT, Wi-Fi, c'est-à-dire la bande de fréquences allant de 800 MHz à 2,5 GHz).

La plupart des articles publiés identifiés s'intéressent aux expositions à des signaux GSM ou UMTS caractéristiques de la téléphonie mobile, raison pour laquelle le rapport s'appuie essentiellement sur des données liées à l'exposition à la téléphonie mobile.

Il existe peu d'études portant sur les enfants de moins de six ans. De plus, la plupart des articles répertoriés considèrent que l'âge de la première utilisation du téléphone mobile se situe rarement avant sept ans. Les études portant sur les enfants plus âgés ont donc été prises en compte pour étudier les effets d'une exposition aux radiofréquences.

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) doivent être considérés comme une population potentiellement plus exposée aux champs électromagnétiques radiofréquences. Ils forment par ailleurs une population particulièrement sensible, en raison notamment du développement en cours de leurs organes et de leurs fonctions physiologiques.

Par conséquent, pour pallier le faible nombre d'études portant sur les enfants de moins de six ans et dans l'objectif d'appréhender toutes les phases de la croissance des enfants, les études disponibles qui ont été examinées ont couvert l'exposition depuis le développement *in utero* jusqu'à celle du jeune adulte.

Analyse des articles

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 (Anses, 2013) concernant le recensement des articles de la littérature scientifique et l'analyse des publications.

Chaque étude a été analysée *a minima* par deux experts, la partie de l'étude concernant le protocole d'exposition a été analysée par un expert physicien, et la partie sur les effets sanitaires par des experts épidémiologistes ou biologistes, en fonction de la nature de l'étude. Chaque expert relecteur a renseigné une grille de lecture, avec l'appui du coordinateur scientifique de l'Anses. Un tableau d'analyse des études a été construit, recensant notamment les différents critères d'analyse pertinents, les commentaires des experts rapporteurs sur les méthodologies (exposition et expérimentation notamment), les conclusions avancées par les auteurs et les sources de financement de chaque étude. Dans tous les cas, c'est la qualité de l'étude, c'est-à-dire la pertinence et la rigueur de son protocole et de l'analyse des résultats par les auteurs (analyses statistiques notamment), qui a motivé son inclusion dans l'évaluation du niveau de preuve pour chaque effet étudié, indépendamment de son résultat.

Certaines études scientifiques examinées par le groupe de travail « Radiofréquences et santé » et analysées dans le précédent rapport de l'Anses sur les effets des radiofréquences (Anses, 2013) ont fait l'objet dans le présent rapport d'un nouvel examen. En effet, en l'absence de données spécifiques concernant 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 (13 à 17 ans). Ces études épidémiologiques transversales ont été intégrées dans le *corpus* d'études examiné.

Les études portant sur les effets biologiques sont incluses dans la procédure d'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires observés, par exemple en tant qu'explication mécanistique et sont décrites dans un paragraphe indépendant. Les études utilisant des modèles *in vitro*, réalisées dans une finalité de recherche de mécanismes biologiques explicatifs d'effets sanitaires éventuels, ont déjà été examinées en détail dans le rapport de l'Anses publié en 2013 et n'ont, de fait, pas été rappelées dans ce rapport.

Méthode d'évaluation du niveau de preuve

La méthode d'évaluation des niveaux de preuve mobilisée pour l'expertise prend appui sur les travaux antérieurs de l'Agence réalisés pour le rapport publié en 2013 ; la méthode a été revue

et adaptée par les experts pour les besoins de la présente expertise, notamment pour ce qui concerne les matrices de classification du niveau de preuve des effets sanitaires.

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

Le classement d'un effet résulte d'un processus d'évaluation collective et s'appuie sur les éléments d'appréciation extraits d'études épidémiologiques, cliniques et toxicologiques sur l'Homme et l'animal de laboratoire. Le rapport d'expertise présente en détail le processus de détermination du niveau de preuve adapté au cas spécifique de l'évaluation des effets des radiofréquences sur la santé des enfants.

Résultats et conclusions de l'expertise collective

Le comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » a adopté les travaux d'expertise collective lors de sa séance du 07 avril 2016 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Anses.

Caractérisation des expositions

Les données disponibles sur l'exposition montrent une forte expansion de l'usage des nouvelles technologies, et notamment chez les très jeunes enfants. Les sources d'exposition sont très nombreuses, diverses en nature, en intensité et par la fréquence des rayonnements émis. 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. De nombreux jouets émetteurs de champs électromagnétiques, comme les jouets connectés, arrivent sur le marché. Les enfants possèdent leur propre téléphone mobile de plus en plus précocement, même si la première utilisation se situe actuellement rarement avant l'âge de sept ans.

Des mesures de DAS local du téléphone mobile au contact du corps réalisées en 2015 par l'ANFR ont montré, à partir d'un échantillon de téléphones mobiles, que l'exposition résultante peut parfois être élevée : parmi les 95 téléphones mobiles prélevés par l'ANFR, 89 % d'entre eux mesurés au contact du corps présentaient un DAS supérieur à 2 W/kg et 25 % un DAS supérieur à 4 W/kg. Par ailleurs, la notice d'utilisation de 25 % des téléphones contrôlés présentant un DAS corps au contact supérieur à 2 W/kg n'indiquait pas de distance minimale de séparation.

Des modélisations numériques de l'exposition de la tête montrent que, pour des raisons anatomiques ou liées aux propriétés diélectriques des tissus jeunes ou immatures, les enfants peuvent être plus exposés que les adultes, en particulier au niveau des aires cérébrales les plus proches de la boîte crânienne.

De plus, les études ayant évalué le DAS « corps entier » rapportent des niveaux d'exposition plus élevés chez les enfants que chez les adultes, en particulier dans deux gammes de fréquence : vers 100 MHz et autour de 1 à 4 GHz. Le DAS peut alors dépasser les restrictions de base de 40 % lorsque l'exposition est égale au niveau maximal autorisé pour les adultes (niveaux de référence). Ceci signifie que pour toute personne de taille inférieure à 1,30 m, les valeurs limites d'exposition réglementaires sont moins adaptées.

Évaluation du niveau de preuve pour les effets des radiofréquences sur la santé des enfants

La méthodologie précédemment décrite a été utilisée pour classer les différents effets potentiels des radiofréquences sur la santé des enfants. La synthèse des éléments de preuve et les

niveaux de preuve de l'existence de chaque effet étudié sont présentés dans le tableau 1 ci-dessous.

Parmi les études épidémiologiques analysées, un certain nombre d'entre elles utilise, comme mesure de l'exposition aux radiofréquences, le recueil de données d'usage du téléphone mobile. Cependant, en pratique, chez les enfants (8 – 12 ans) et les adolescents (13 – 17 ans), la corrélation entre l'exposition aux radiofréquences et la durée d'utilisation du téléphone auto-rapporté par questionnaire est faible. De plus, les durées d'utilisation du téléphone mobile fournies par les opérateurs et estimées par les usagers diffèrent.

Par ailleurs, certains effets sanitaires observés pourraient résulter aussi bien de l'exposition aux radiofréquences que de l'exposition aux dispositifs sources de radiofréquences, c'est-à-dire être liés à leur usage ou à d'autres agents physiques (lumière bleue, *etc.*). Ainsi, l'usage du téléphone mobile (modalités, durée fréquence d'utilisation, *etc.*) peut être considéré comme pouvant introduire un biais de confusion majeur dès lors que l'on cherche à caractériser l'association entre un effet sanitaire donné et l'exposition aux radiofréquences.

Par exemple, l'hypothèse d'un lien entre l'usage du téléphone mobile et l'apparition de troubles relevant de la santé mentale tels que décrits dans des études (altération du bien-être, dépression, troubles du sommeil, *etc.*) est plus plausible que l'hypothèse d'un lien entre l'usage du téléphone mobile et l'apparition d'effets sanitaires d'une autre nature, par exemple le cancer.

Par conséquent, la prise en compte de facteurs de confusion de nature psychosociale dans l'analyse du risque associé à l'usage des outils mobiles de communication représente un critère important pour déterminer le crédit devant être accordé aux résultats des études et à leur interprétation.

Ainsi, d'après les études disponibles analysées portant sur les effets sanitaires des radiofréquences, les travaux d'expertise collective permettent de conclure à un effet possible des radiofréquences sur :

- les fonctions cognitives ; les résultats montrant des effets aigus se basent sur des études expérimentales dont la méthodologie est bien maîtrisée ;
- le bien-être ; ces effets pourraient cependant être liés à l'usage du téléphone mobile plutôt qu'aux radiofréquences qu'ils émettent.

En revanche, les données actuelles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des radiofréquences chez l'enfant sur :

- le comportement ;
- les fonctions auditives ;
- les effets tératogènes et le développement ;
- le système reproducteur mâle et femelle ;
- les effets cancérogènes ;
- le système immunitaire ;
- la toxicité systémique.

Tableau 1 : classement des éléments de preuves et du niveau de preuve pour chaque effet étudié chez l'enfant

Effet étudié	Éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié **dans les études humaines cliniques et épidémiologiques**	Éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié **sur des modèles animaux**	Classement du **niveau de preuve de l'effet chez l'enfant**
Comportement	Les éléments de preuves disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences.	**-** les éléments de preuves disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences. **-** concernant l'activité locomotrice lors d'une exposition en période de développement chez l'animal, les éléments de preuve disponibles sont **en faveur d'une absence d'effet** des radiofréquences.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le comportement de l'enfant.
Fonctions cognitives	Les éléments de preuve sont **limités** pour conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives.	Les éléments de preuve sont **limités** pour conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives.	Les données disponibles permettent de conclure à **un effet possible** des radiofréquences sur les fonctions cognitives de l'enfant.
Fonctions auditives	Les éléments de preuves disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur les fonctions auditives.	Les éléments de preuves disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences radiofréquences sur les fonctions auditives.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur les fonctions auditives de l'enfant.
Sommeil	Les éléments de preuves disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le sommeil.	Les éléments de preuves disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le sommeil.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le sommeil chez l'enfant.

Effet étudié		Éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié **dans les études humaines cliniques et épidémiologiques**	Éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié **sur des modèles animaux**	Classement du **niveau de preuve de l'effet chez l'enfant**
Bien-être		Les éléments de preuve sont **limités** pour conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur le bien-être.	Absence de donnée.	Les données disponibles permettent de conclure à un effet **possible** des radiofréquences sur le bien-être des enfants.
Reproduction et développement	**effets tératogènes et sur le développement**	Absence de donnée.	Les éléments de preuve **disponibles ne montrent pas d'effet** des radiofréquences sur les effets tératogènes et le développement.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet tératogène des radiofréquences ou sur le développement de l'enfant.
	système reproducteur femelle	Absence de donnée.	Les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le système reproducteur femelle.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le système reproducteur femelle de l'enfant.
	système reproducteur mâle	Absence de donnée.	Les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le système reproducteur mâle.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le système reproducteur mâle de l'enfant.

Effet étudié	Éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié **dans les études humaines cliniques et épidémiologiques**	Éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié **sur des modèles animaux**	Classement du **niveau de preuve de l'effet chez l'enfant**
Cancérogénèse	Les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet cancérogène des radiofréquences.	les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet cancérogène ou co-cancérogène.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet cancérogène des radiofréquences chez l'enfant. Dans la mesure où les tumeurs de l'enfant ne sont pas comparables aux tumeurs de l'adulte, les conclusions du rapport de 2013 montrant un effet limité des radiofréquences chez l'adulte sont difficilement extrapolables à l'enfant. Ceci ne permet cependant pas d'exclure que les enfants exposés ne développeront pas de tumeurs ultérieurement.
Système immunitaire	Absence de donnée.	Les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet sur le système immunitaire.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le système immunitaire de l'enfant.
Toxicité systémique	Absence de donnée.	Les éléments de preuve disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'une toxicité systémique des radiofréquences.	Les données disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'une toxicité systémique des radiofréquences chez l'enfant.

Recommandations de l'expertise collective

Recommandations en matière de réduction des niveaux d'exposition aux radiofréquences

Considérant :

- l'augmentation de l'exposition de la moelle osseuse ou du cerveau des enfants par rapport aux adultes mise en évidence par certaines études dosimétriques ;
- l'augmentation du DAS « corps entier » chez les plus jeunes enfants par rapport aux adultes, liée aux différences morphologiques et anatomiques, pouvant conduire à dépasser les restrictions de base (DAS) de 40 % dans des conditions de type pire-cas (exposition environnementale élevée égale aux valeurs limites réglementaires) ;
- les niveaux d'exposition élevés engendrés par les téléphones mobiles au contact du corps ;
- les résultats d'études épidémiologiques mettant en évidence des effets possibles des radiofréquences sur la fonction cognitive et le bien-être des enfants ;
- la recommandation de diminution des valeurs limites d'exposition (niveaux de référence) dans certaines bandes de fréquences par le Conseil de santé des Pays-Bas, et leur révision adoptée par Santé Canada[4], afin de tenir compte des spécificités des enfants en matière d'exposition aux radiofréquences ;

le CES recommande, en matière réglementaire :

- d'adapter les valeurs limites d'exposition réglementaires afin de prendre en compte les spécificités des enfants relatives à leur exposition aux radiofréquences ;
- que soient réalisées, avant leur mise sur le marché, des mesures de DAS de terminaux autres que les téléphones mobiles (tablettes, jouets, *etc.*) dans des conditions réelles d'utilisation, dont les résultat figureraient dans la notice de l'appareil, et que ce DAS soit soumis à des valeurs limites réglementaires en fonction de l'utilisation probable de l'appareil ;
- que les dispositions réglementaires limitant la publicité pour les téléphones mobiles ciblant les enfants soient étendues aux autres appareils communicants destinés aux enfants.

Le CES recommande, notamment aux parents, en matière de réduction de l'exposition :

- de limiter l'utilisation par les enfants des dispositifs électroniques émetteurs (tablettes, téléphone, *etc.*) ;
- que le téléphone ne soit pas laissé en communication au contact du corps pour éviter les éventuels effets thermiques.

Recommandations en matière de réduction de l'usage du téléphone mobile :

Considérant :

- les résultats des études épidémiologiques mettant en évidence une santé mentale affectée chez les adolescents ayant « un usage problématique du téléphone mobile » ;
- la forte expansion de l'usage des nouvelles technologies, notamment chez les très jeunes enfants ;

[4] Voir les paragraphes 3.1.2 Avis du Conseil de santé des Pays-Bas (2011) et 3.1.3 Révision du code de sécurité 6 relatif aux dispositifs émettant des rayonnements (Santé Canada – 2014).

le CES recommande que les parents incitent les enfants à un usage raisonnable du téléphone mobile (éviter les communications nocturnes, limiter la fréquence et la durée des appels, *etc.*).

Recommandations en matière d'études et de recherche

Études visant à améliorer la caractérisation des expositions, notamment à d'autres signaux que ceux de la téléphonie mobile

Considérant en particulier :

- l'apparition de nouvelles technologies de communication mobile, qui utilisent de nouveaux types de signaux ;
- que les données actuelles disponibles concernent essentiellement des signaux de type 2G et 3G et le Wi-Fi ;
- qu'une étude de provocation chez l'adolescent met en évidence des résultats différents (modification de paramètres de l'électroencéphalogramme) en fonction du signal utilisé (2G *versus* 3G) ;

le CES recommande d'engager des études afin notamment :

- de mieux caractériser les usages des différents dispositifs radioélectriques par les enfants (quels types de dispositifs, quelles fréquence et durée d'usage, à partir de quel âge, *etc.*) ;
- de connaître l'exposition réelle des enfants aux radiofréquences en situation d'usage de l'ensemble des dispositifs radioélectriques.

Par ailleurs, le CES souligne l'importance de rechercher les effets sanitaires éventuels liés à une exposition à des nouveaux signaux radiofréquences.

Etudes expérimentales chez l'Homme et l'animal

Considérant :

- la mise en évidence dans deux études cliniques de différences légères à modérées dans le tracé électro-encéphalographique dans les bandes de fréquence thêta (4-8 Hz) et béta (12-15 Hz) entre les enfants exposés et non exposés ;
- les effets relatifs à une exposition aux radiofréquences sur l'excitabilité cérébrale chez l'adulte sain ou plus généralement sur l'activité électrique cérébrale (EEG, potentiels évoqués, *etc.*) (voir Rapport Anses 2013) ;
- que l'épilepsie est une pathologie neurologique qui relève d'une hyper-excitabilité neuronale et/ou d'une anomalie de la synchronisation de populations de neurones et que l'incidence de cette maladie varie considérablement en fonction de l'âge ;

le CES recommande :

- de réaliser des études sur les effets des radiofréquences en lien avec les fonctions cérébrales étudiées soit en imagerie cérébrale chez l'enfant soit par l'enregistrement de l'activité électrique cérébrale (EEG), en condition basale ou de stimulation (tâches cognitives), chez l'enfant ou l'animal, à divers âges du développement ;
- d'étudier l'impact des radiofréquences sur le tracé électro-encéphalographique ou sur la survenue de crises d'épilepsie chez l'enfant.

Considérant par ailleurs :

- la divergence des résultats des études épidémiologiques et expérimentales sur les fonctions cognitives, concluant soit à une absence d'effet soit à une amélioration des performances ;

- la divergence entre les résultats de diverses études chez l'animal, avec des effets qui pourraient dépendre du type de tâche ;

le CES recommande :

- de réaliser chez l'enfant des études de provocation explorant diverses fonctions cognitives (mémoire, raisonnement, fonctions exécutives, attention) à différents âges, en situation d'exposition ou non à des radiofréquences ;
- d'entreprendre chez l'animal des études explorant les effets d'une exposition aux radiofréquences sur les fonctions cognitives (mémoire, fonctions exécutives, attention) associées à l'étude de la morphologie et de la plasticité cérébrale (approches électrophysiologiques, marqueurs immunohistochimiques, *etc.*) ;
- d'étudier les effets potentiels sur le développement cérébral d'une exposition aux radiofréquences en fonction de l'âge, en engageant des études longitudinales chez l'animal juvénile de plusieurs âges, et en comparant avec l'adulte, afin d'identifier des périodes de sensibilité/vulnérabilité éventuelles.

<u>Études épidémiologiques</u>

Considérant, en particulier,

- que les enfants sont exposés de façon de plus en plus précoce à des appareils émettant des champs électromagnétiques radiofréquences ;
- l'importance du facteur de confusion introduit par l'usage du téléphone mobile pour estimer l'exposition aux radiofréquences ;

le CES recommande :

- de mettre à jour l'évaluation du risque cancérogène des radiofréquences chez l'enfant lorsque les résultats de l'étude MOBi-Kids seront publiés ;
- de prendre en compte les facteurs de confusion en lien avec l'usage des appareils radioélectriques et les effets sur la santé, notamment lorsque les effets sanitaires étudiés concernent la santé perçue, les troubles du comportement, l'altération du bien-être, la dépression, *etc.* Ces facteurs de confusion peuvent être dans le champ de la santé mentale, de la construction psychologique, des modes de relations familiales, *etc.*

<u>Effets psycho-sociaux des usages des nouvelles technologies</u>

Considérant :

- la forte expansion de l'usage des nouvelles technologies, notamment chez les très jeunes enfants ;
- les études épidémiologiques mettant en évidence une santé mentale affectée chez les adolescents ayant « un usage problématique du téléphone mobile » ;

le CES recommande d'étudier l'impact des usages des technologies de communication sur :

- les troubles relevant de la santé mentale (stress, addiction, dépression, etc.) ;
- les relations familiales, l'apprentissage scolaire, etc.

Date de validation de la synthèse par le Comité d'experts spécialisé : 3 mai 2016

Sigles et abréviations

2G : voir GSM.

ANFR : Agence nationale des fréquences.

BHE : barrière hématoencéphalique.

CEPT : Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications.

CREDOC : Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie.

DAS : Débit d'absorption spécifique (voir SAR en anglais).

DCS : *Digital Cellular System (*système cellulaire numérique*).*

DECT : *Digital Enhanced Cordless Telephone* (Téléphone sans-fil numérique amélioré).

DGE : Direction générale des entreprises.

EIRP : *Equivalent Isotropically Radiated Power* (voir PIRE en français).

ERP : *Effective Radiated Power or Equivalent Radiated Power* (voir PAR en français).

Etsi : *European Telecommunications Standards Institute* (Institut européen des normes de télécommunication).

FCC : *Federal Communications Commission* (commission fédérale des communications).

FDTD : *Finite-Difference Time Domain* (différences finies dans le domaine temporel).

GD : *Gestational Day* (jour de gestation).

GSM (ou 2G) : *Global System for Mobile Communications* (système généralisé de communications mobiles).

HMP : *Hardware Modified Phones* (téléphones modifiés matériellement).

HPA : *Health Protection Agency* (Agence de sécurité sanitaire anglaise).

Icnirp : *International Commission on Non Ionizing Radiation Protection* (Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants).

LTE : *Long Term Evolution (*système de télécommunication 4G*).*

OMS : Organisation mondiale de la santé.

PAR : puissance apparente rayonnée (voir ERP en anglais).

PCM : *Pulse Code Modulation* (modulation par impulsion de code).

PIRE : Puissance isotrope rayonnée équivalente (voir EIRP en anglais).

PMR : *Professional Mobile Radio* (radio mobile professionnelle).

PND : *Postnatal Day* (jour post-natal).

R&TTE : *Radio And Terminal Telecommunication Equipement* (équipement terminal de telecommunication et radioélectrique).

RFID : *Radio Frequency Identification* (identification par radiofréquence).

SAM : *Specific Anthropomorphic Mannequin* (mannequin anthropomorphique spécifique).

SAR : *Specific Absorption Rate* (voir DAS en français).

SRD : *Short Range Device* (Dispositif à courte portée).

UWB : *Ultra Wide Band* (Ultra large bande).

UMTS : *Universal Mobile Telecommunications System* (Système de télécommunications mobile universel).

Wi-Fi : *Wireless Fidelity*.

Glossaire

Basse tension : la Directive européenne 2006/95/CE, dite « Basse tension », concerne le rapprochement des législations des États membres relatives au matériel électrique destiné à être employé dans certaines limites de tension.

CEPT : la Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications est une entité de coordination entre les organismes des postes et de télécommunications de 48 états européens. Elle a été à l'origine de la création de l'ETSI en 1988, qui a depuis assuré les fonctions de normalisation.

DAS : le Débit d'absorption spécifique représente le débit d'absorption spécifique par unité de masse de tissu biologique, il est exprimé en Watts par kg (W/kg). Le DAS (*n* g) correspond au débit d'absorption spécifique évalué sur *n* grammes de tissus contigus.

Émissions ou perturbations : signaux dont la propagation est de nature à nuire au bon fonctionnement des équipements ou à la santé des êtres vivants situés au voisinage.

Etsi (*European telecommunications standards institute*) : l'Institut européen des normes de télécommunication est l'organisme de normalisation européen du domaine des télécommunications. Celui-ci travaille en coopération avec le CEN et le Cenelec qui sont les instances européennes représentées à l'ISO et à la CEI.

FDTD : *Finite-difference time domain* – différences finies dans le domaine temporel. Technique de simulation numérique utilisée pour la résolution des équations de Maxwell et la propagation des ondes électromagnétiques notamment.

GSM (2G) : *Global System for Mobile Communications*, norme numérique pour la téléphonie mobile de deuxième génération.

HMP (*Hardware Modified Phone*) : Les téléphones HMP sont des téléphones modifiés matériellement pour pouvoir accéder à des paramètres de configuration spécifiques aux études d'exposition.

Icnirp *(International Commission on Non Ionizing Radiation Protection)* : l'Icnirp (ou Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants) est un organisme indépendant (organisation non gouvernementale) reconnu par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) créé en 1977 pour examiner les problèmes relatifs aux rayonnements non ionisants. L'Icnirp a formulé, dans des lignes directrices, des valeurs limites d'exposition pour différentes parties du spectre électromagnétique, reprises par différentes réglementations internationales et nationales.

PAR : La puissance apparente rayonnée (PAR) est une mesure théorique de l'énergie transportée par les ondes radioélectriques émises par une antenne, exprimée en décibels. La PAR est estimée en référence à une émission produite par une antenne dipôle idéale, contrairement à la PIRE qui est estimée en référence à une antenne isotrope idéale. Il est communément admis que PAR = PIRE + 2,15 dB, du fait de l'écart de gain entre l'antenne dipôle idéale et l'antenne isotrope idéale.

PIRE : La puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) correspond à la puissance émettrice d'un appareil électrique sans fil mesurée en sortie d'antenne (prise en compte du facteur de l'antenne).

Puissance crête : Puissance instantanée maximale.

RFID (*Radio Frequency Identification*) : système généralement composé d'une borne d'interrogation et d'étiquettes constituées d'une puce électronique contenant des données associée à une antenne. Cette technologie peut être utilisée pour identifier des objets, des animaux ou des personnes (étiquettes pour applications logistiques, passeports, contrôles d'accès, cartes de transports urbains, cartes de paiement, *etc.*).

R&TTE : directive européenne 1999/5/CE concernant les équipements hertziens et les équipements terminaux de télécommunications et la reconnaissance mutuelle de leur conformité, dite directive R&TTE (*Radio And Terminal Telecommunication Equipement).*

SA : absorption spécifique d'énergie c'est-à-dire énergie absorbée par unité de masse de tissu biologique, exprimée en joules par kg (J/kg).

SAM (*Specific Anthropomorphic Mannequin) :* mannequin anthropomorphique spécifique, utilisé notamment pour les tests de conformité aux valeurs limites d'exposition aux ondes électromagnétiques émises par des téléphones mobiles.

SRD : un dispositif à courte portée (SRD) est un appareil radiofréquence utilisé dans les télécommunications pour la transmission d'information à très courte distance. Les SRD ont une puissance d'émission inférieure à 100 mW.

Wi-Fi : Protocole de communication sans fil régi par les normes du groupe IEEE 802.11x fonctionnant généralement autour de 2,4 et 5,6 GHz.

Liste des tableaux

Tableau 1 : classement des éléments de preuves et du niveau de preuve pour chaque effet étudié chez l'enfant 17
Tableau 2 : niveaux de référence pour l'intensité du champ électrique : valeurs proposées par le Conseil de santé des Pays-Bas en 1997 et en 2011. 42
Tableau 3 : évolution des niveaux de référence proposés par Santé Canada. 43
Tableau 4 : fréquences et puissances d'émission des dispositifs veille-bébé. 53
Tableau 5 : données relatives au taux d'équipement des enfants et adolescents en téléphone mobile. 58
Tableau 6 : caractéristiques physiques des veille-bébés Vivanco BM 800 et Vivanco BM 900. 62
Tableau 7 : résultats des mesures de DAS pour différentes tablettes 3G. 63
Tableau 8 : liste et descriptif des appareils sélectionnés pour la campagne de mesures. 65
Tableau 9 : mesure du champ électrique émis par des dispositifs radioélectriques destinés aux enfants, à 1 mètre et 3 mètres de distance. 67
Tableau 10 : valeurs de champs électriques mesurés et calculés émis par des appareils radioélectriques destinés aux enfants. 69
Tableau 11 : études investiguant les propriétés diélectriques des tissus et les conséquences de leurs variations sur le DAS. 81
Tableau 12 : études investiguant l'impact de la morphologie des enfants sur DAS dans la tête. 87
Tableau 13 : études investiguant l'impact de la morphologie des enfants sur DAS « corps entier ». 91
Tableau 14 : corrélation entre l'âge des rats et de l'Homme en fonction des différentes phases de la vie d'après (Quinn 2005, Sengupta 2013). 118
Tableau 15 : études investiguant l'altération de la barrière hémato encéphalique. 124
Tableau 16 : études investiguant les effets sur la réponse cellulaire et le stress oxydant chez l'animal. 130
Tableau 17 : études investiguant les effets sur la morphologie cérébrale. 142
Tableau 18 : études de provocation sur des enfants investiguant les effets d'une exposition aiguë aux RF sur le tracé électroencéphalographique. 143
Tableau 19 : études de provocation sur des enfants investiguant les effets d'une exposition aiguë aux radiofréquences. 147
Tableau 20 : études épidémiologiques sur le développement psychomoteur, les troubles du comportement et les troubles mentaux. 153
Tableau 21 : études de l'effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives et le comportement chez l'animal. 161
Tableau 22 : étude investiguant les effets sur la fonction auditive chez l'Homme. 171
Tableau 23 : études investiguant les effets sur la fonction auditive chez l'animal. 172
Tableau 24 : études investiguant les effets des radiofréquences sur le sommeil des enfants. 178
Tableau 25 : études investiguant les effets des radiofréquences sur le sommeil chez l'animal. 179
Tableau 26 : études investiguant les effets sur le bien-être chez l'Homme. 186
Tableau 27 : études investiguant les effets sur la fertilité et le système reproducteur. 197
Tableau 28 : études portant sur l'association entre exposition aux radiofréquences et cancers. 215
Tableau 29 : études investiguant les effets cancérogènes chez l'animal. 220
Tableau 30 : études investiguant les effets sur le système immunitaire. 226
Tableau 31 : études investiguant la toxicité systémique. 232
Tableau 32 : puissances maximales autorisées par fréquence. 256
Tableau 33 : puissances maximum autorisées spécifiquement pour le modélisme 257
Tableau 34 : puissances maximales autorisées pour le Wi-Fi 257
Tableau 35 : comparaison des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques. 266
Tableau 36 : études épidémiologiques descriptives transversales sur la relation entre l'usage « problématique » du téléphone mobile et la santé mentale chez les enfants ou adolescents. 272

Liste des figures

Figure 1 : le spectre des ondes électromagnétiques (« d'après une illustration © SOLEIL »). 34
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)). 40
Figure 3 : niveaux de référence pour l'exposition aux champs électriques variables dans le temps (Icnirp, 2010). 40
Figure 4 : pays intégrant des limitations volontaires ou des informations sur l'usage des téléphones mobiles par les enfants. 49
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). 51
Figure 6 : voiture radiocommandée. 54
Figure 7 : lapin Karotz. 55
Figure 8 : téléphones MO1 (à gauche) et BabyM (à droite). 55
Figure 9 : téléphones mobiles pour enfants. 56
Figure 10 : fonctionnement d'un module anti-éloignement. 57
Figure 11 : installation de l'équipement en chambre anéchoïque. 66
Figure 12 : nombre de mesures au contact supérieures à 2 W/kg par classe de DAS (2012 - 2015). 73
Figure 13 : la famille virtuelle : Duke, Ella, Billie, Thelonious (Christ *et al*. 2007). 76
Figure 14 : propriétés diélectriques des tissus de la peau et du cerveau en fonction de la fréquence. 77
Figure 15 : permittivité relative des tissus en fonction de l'âge de l'enfant et de la fréquence d'émission. 78
Figure 16 : résonance en fonction de la fréquence et de l'âge (Wiart *et al*. 2011). 92
Figure 17 : schéma de causalité élémentaire illustrant un effet de confusion dans la relation entre l'exposition d'intérêt et l'état de santé. 95
Figure 18 : schéma de causalité impliquant un biais de causalité inverse. 96
Figure 19 : schéma de causalité général étudié dans les études épidémiologiques. 97
Figure 20 : schéma de causalité étudiée dans les études de Divan *et al*., 2008, 2010 et 2011. 97
Figure 21 : logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études sur les modèles animaux. 100
Figure 22 : logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études épidémiologiques. 101
Figure 23 : évaluation du niveau de preuve pour un effet donné en fonction des éléments de preuve en faveur de l'existence d'un effet. 103
Figure 24 : décours temporel des évènements majeurs du développement cérébral. Image de Giedd (1999) dans la revue de Tau *and* Peterson 2010. 106
Figure 25 : maturation régionale de l'épaisseur du cortex : âge 4 -21 ans. 107
Figure 26 : volumes de matières grise et blanche et densité synaptique en fonction de l'âge. 108
Figure 27 : myélinisation au cours du développement. 109
Figure 28 : (A) les différents composants cellulaires de la barrière hématoencéphalique et leurs associations (B) les voies de transport au travers de la BHE. À partir d'Abbott *et al*. (2010). 111
Figure 29 : décours temporel des variations de l'utilisation cérébrale locale de glucose (LCMRglc, *local cerebral metabolic rate for glucose*) au cours du développement humain. 112
Figure 30 : $glucose_{rmr\%}$ et croissance corporelle exprimés en score SD afin de permettre la comparaison. 113
Figure 31 : métabolisme cérébral au cours de la vie, normalisé par rapport aux valeurs moyennes de l'adulte. 114
Figure 32 : méthodes d'IRM couramment utilisées pour l'étude du développement cérébral chez l'Homme. 115
Figure 33 : développement cérébral chez le rat et l'Homme (graphe modifié à partir d'Alling (1985)). 120

Figure 34 : diagramme représentant les principales périodes du développement du tractus génital mâle chez l'humain et le rat en relation avec la production de testostérone. 121

Figure 35 : comparaison des périodes de différenciation ovarienne chez différents mammifères (jpc : jours post conception). 121

Figure 36 : évaluation des éléments de preuve relatifs au comportement dans les études cliniques et épidémiologiques. 164

Figure 37 : évaluation des éléments de preuve relatifs au comportement dans les études sur les modèles animaux. 165

Figure 38 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le comportement chez l'enfant. 165

Figure 39 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions cognitives dans les études cliniques et épidémiologiques. 167

Figure 40 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions cognitives dans les études sur les modèles animaux 168

Figure 41 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives chez l'enfant. 168

Figure 42 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions auditives dans les études épidémiologiques. 174

Figure 43 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions auditives dans les études sur les modèles animaux. 175

Figure 44 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur les fonctions auditives chez l'enfant. 175

Figure 45 : évaluation des éléments de preuve relatifs au sommeil dans les études épidémiologiques. 180

Figure 46 : évaluation des éléments de preuve relatifs au sommeil dans les études sur les modèles animaux. 181

Figure 47 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le sommeil chez l'enfant. 181

Figure 48 : évaluation des éléments de preuve relatifs au bien-être dans les études épidémiologiques. 191

Figure 49 : évaluation des éléments de preuve relatifs au bien-être dans les études sur les modèles animaux. 191

Figure 50 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le bien-être chez l'enfant 192

Figure 51 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets tératogènes dans les études épidémiologiques. 202

Figure 52 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets tératogènes dans les études sur les modèles animaux. 203

Figure 53 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur la tératogénicité et le développement chez enfant. 203

Figure 54 : évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur femelle dans les études épidémiologiques. 204

Figure 55 : évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur femelle dans les études sur les modèles animaux. 205

Figure 56 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le système reproducteur femelle chez l'enfant. 205

Figure 57 : évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur mâle dans les études épidémiologiques. 207

Figure 58 : évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur mâle dans les études sur les modèles animaux. 208

Figure 59 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le système reproducteur mâle chez l'enfant 208

Figure 60 : taux de gliomes standardisés sur l'âge et le sexe parmi les enfants et adolescents suédois âgés de 5 à 19 ans entre 1990 et 2008 (d'après Aydin *et al.,* 2011). 212

Figure 61 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets cancérogènes dans les études épidémiologiques. 223

Figure 62 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets cancérogènes dans les études sur les modèles animaux. 224

Figure 63 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur la cancérogénèse chez l'enfant. _____ 224
Figure 64 : évaluation des éléments de preuve relatifs au système immunitaire dans les études épidémiologiques. _____ 227
Figure 65 : évaluation des éléments de preuve relatifs au système immunitaire dans les études sur les modèles animaux. _____ 228
Figure 66 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le système immunitaire chez l'enfant. __ 228
Figure 67 : évaluation des éléments de preuve relatifs à la toxicité systémique dans les études épidémiologiques. _____ 230
Figure 68 : évaluation des éléments de preuve relatifs à la toxicité systémique dans les études sur les modèles animaux. _____ 230
Figure 69 : évaluation globale de l'effet systémique des radiofréquences chez l'enfant. _____ 231

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte

Les radiofréquences[5] constituent un objet de préoccupations sanitaires et environnementales depuis plusieurs années en France et à l'étranger, ce qui a conduit l'Agence[6], 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*

---

[5] Les rapports d'expertise consacrés aux effets des radiofréquences sur la santé publiés par l'Agence en 2009 et 2013 ont utilisé le terme « radiofréquences » pour désigner les champs électromagnétiques de fréquences comprises entre une dizaine de kHz et quelques centaines de GHz. En 2013, l'Agence précisait ainsi au chapitre 1.3.1 de son rapport « radiofréquences et santé – mise à jour de l'expertise », que la limite basse des radiofréquences (8,3 kHz) est issue de la classification de l'Union internationale des télécommunications (UIT), article 5, section 4 (*Radio regulations*, *Articles*, 2012). Le terme « ondes radio » est utilisé par l'UIT pour désigner « les ondes électromagnétiques de fréquences arbitrairement inférieures à 3 000 GHz qui se propagent dans l'espace sans guide artificiel ». Il est cependant d'usage de considérer la valeur de 300 GHz comme limite haute des radiofréquences, les bandes de fréquences au-delà de 275 GHz étant sans attribution de service à l'heure actuelle.

Le terme « fréquence(s) radio » est utilisé par l'UIT pour désigner, de façon générique, les fréquences correspondant aux ondes radio (*radio-frequency spectrum*), c'est-à-dire littéralement celles qui « rayonnent » dans l'environnement. Les appellations des nombreuses subdivisions du spectre électromagnétique correspondent à des besoins de classification, de dénomination particulière, et sont souvent spécifiques des domaines techniques dans lesquelles elles sont utilisées. Si ces appellations se révèlent pratiques pour des communautés particulières d'utilisateurs professionnels, par exemple, elles ne portent en elles-mêmes pas de signification supplémentaire, sur le plan de la physique des rayonnements électromagnétiques et de leurs interactions avec le vivant -qui intéressent l'Anses-, à celle de termes génériques comme « ondes radioélectriques » ou « radiofréquences ». Les interactions des ondes électromagnétiques avec le vivant dépendent des fréquences associées, mais aussi des caractéristiques des signaux (intensité, répartitions temporelles, rapports cycliques, modulations, etc.). La terminologie employée pour nommer les divisions arbitraires du spectre électromagnétique n'ont donc pas de sens au regard des effets potentiels des champs électromagnétiques sur la santé.

Les rapports d'expertise de l'Agence ont mis en évidence que les situations d'exposition aux fréquences radio les plus répandues pour la population générale concernent principalement les technologies de radio et télé-diffusion ainsi que de communication sans fil, dans des bandes de fréquences situées généralement entre environ 100 MHz et quelques GHz. Il semble que le terme générique « radiofréquences » soit ainsi approprié pour désigner la plupart de ces applications. Les fréquences radio, ou « radiofréquences », désignent donc, pour l'Agence qui en a repris l'usage, l'ensemble des fréquences des ondes radioélectriques qui rayonnent dans l'environnement entre 8,3 kHz et environ 300 GHz, quelles que soient les applications concernées, et qui participent potentiellement à l'exposition humaine.

[6] 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 1er juillet 2010 pour créer l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses).

> *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 (taille, poids) doivent donc être considérés comme une population potentiellement plus exposée aux champs électromagnétiques radiofréquences. Les enfants, en plein développement physique et physiologique, constituent par ailleurs une population sensible à leur environnement.

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 »[7]. 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. Dans le contexte du grenelle 2 de l'environnement, une controverse scientifique et sociétale sur le niveau de protection qu'apportent ces directives eu égard à l'exposition des enfants a abouti à l'introduction, par la loi du 10 juillet 2010, de l'article L.5231-4 du code de la santé publique (CSP) stipulant que :

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

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

1.2 Objet de la saisine

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

Les objectifs de cette expertise sont multiples :

- réaliser un inventaire, le plus complet possible, des différents produits radioélectriques à destination des enfants de moins de six ans (jouets, objets communicants ou de surveillance) ;

[7] 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.

- fournir un état des lieux des réglementations en vigueur et des textes normatifs applicables concernant l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques émis par les dispositifs radioélectriques ;
- analyser les publications scientifiques relatives à l'influence du champ électromagnétique sur les personnes, et plus spécifiquement sur les enfants ;
- caractériser l'exposition des enfants à certains dispositifs radioélectriques ;
- évaluer si possible les risques sanitaires potentiels pour les enfants liés à leur exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences émis par des dispositifs radioélectriques qui leur sont destinés.

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre

1.3.1 Expertise collective

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

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

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

Les travaux d'expertise concernant l'évaluation du risque lié à l'exposition des enfants aux radiofréquences s'appuient sur les analyses formulées par le groupe de travail « Radiofréquences et santé » à l'occasion de son travail sur la mise à jour des connaissances concernant les effets sanitaires des radiofréquences, publié le 15 octobre 2013. Les études du rapport de l'Afsset sur la mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences publié en 2009 ont également été prises en compte. Les experts rapporteurs ont utilisé ce matériau pour réaliser, dans la mesure du possible, une évaluation des risques sanitaires potentiels pour les enfants liés à leur exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise ».

1.3.2 Conventions de recherche et développement

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

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

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

1.3.3 Revue bibliographique

Une recherche bibliographique, sur une période qui s'est étendue dans un premier temps du 1er janvier 2005 au 31 décembre 2013, a été menée afin d'identifier les études portant sur les effets des rayonnements électromagnétiques sur le corps humain, en ciblant l'exposition des enfants de moins de 6 ans, en particulier par des jouets émettant des champs électromagnétiques (par exemple voitures télécommandées et *talkie-walkies* utilisant des fréquences de 27 MHz et 40 MHz), et pour des appareils de radiocommunication dédiés aux enfants émettant aux fréquences des principaux protocoles de communication sans-fil (GSM, DECT, Wi-Fi, c'est à dire la bande de fréquences allant de 800 MHz à 2,5 GHz).

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

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

Les études s'intéressant au développement *in utero* ont également été prises en compte.

Les données de la littérature scientifique ainsi collectées ont été analysées en tenant compte par ailleurs des éléments fournis par les travaux d'expertise publiés par l'Agence dans le rapport « radiofréquences et santé – mise à jour de l'expertise » en octobre 2013 (Anses, 2013).

1.3.4 Consultation publique

1.3.4.1 Objectif

Considérant l'importance, la complexité et la sensibilité du sujet, l'Agence a souhaité porter le rapport d'expertise dans un état pré-définitif, c'est-à-dire sans conclusion ni recommandation, à la connaissance des membres de la communauté scientifique et des parties prenantes intéressées, afin de recueillir leurs commentaires éventuels. La consultation publique visait à recueillir des données et commentaires scientifiques susceptibles d'être pris en compte dans l'élaboration finale du rapport d'expertise.

1.3.4.2 Procédure

L'information de la mise en place de la consultation publique a été diffusée auprès des directions générales des ministères demandeurs (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), de personnalités scientifiques et de parties prenantes, ainsi que sur le site internet de l'Agence. Le recueil des commentaires s'est effectué par l'intermédiaire d'un formulaire en ligne disponible sur le site internet de l'Agence.

1.3.4.3 Calendrier

La consultation publique du rapport pré-définitif « Exposition aux radiofréquences et santé des enfants » a été ouverte du 9 juin au 21 août 2015.

1.3.4.4 Prise en compte des remarques reçues

Tous les commentaires reçus ont été analysés par l'Agence et ont fait l'objet d'une réponse, rédigée pour certains avec l'appui d'experts rapporteurs ayant participé à l'élaboration de l'expertise.

Quatre réunions organisées par l'Agence avec les experts rapporteurs ont permis de contribuer à la rédaction des réponses à apporter aux commentaires, de discuter les études à intégrer au rapport, et d'élaborer les conclusions et recommandations.

Les commentaires et les réponses apportées sont disponibles sous forme d'annexe à télécharger en complément du rapport d'expertise sur le site internet de l'Agence.

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.

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

Un expert du CES qui présentait un lien d'intérêt susceptible de mener à un conflit n'a été invité à participer aux réunions au cours desquelles le rapport a été examiné.

Les déclarations d'intérêts des experts concernés sont rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

1.5 Les limites du champ d'expertise

1.5.1 Bandes de fréquences considérées

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

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

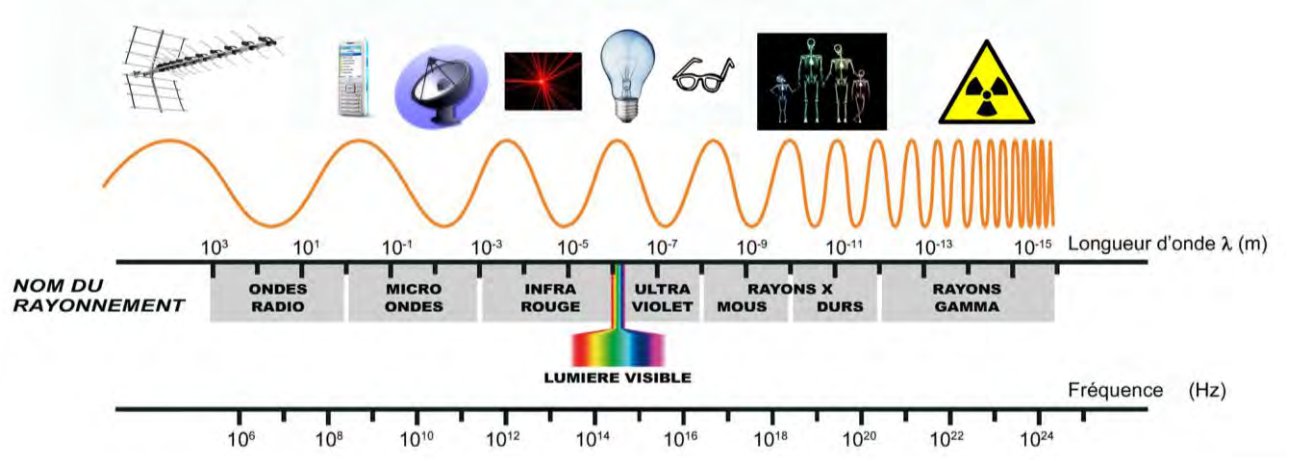


Figure 1 : le spectre des ondes électromagnétiques (« d'après une illustration © SOLEIL »).

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

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

1.5.2 Les appareils étudiés

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

Les appareils étudiés sont les dispositifs radioélectriques à destination des enfants et mettant en œuvre des radiofréquences. Il s'agit notamment de dispositifs « veille-bébé » (ou *babyphone*),

jouets radiocommandés, *talkies-walkies*, robots communicants, téléphones mobiles pour enfants, tablettes tactiles ou encore modules anti-éloignement.

1.5.3 Les populations étudiées

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) doivent être considérés comme une population potentiellement plus exposée aux champs électromagnétiques radiofréquences. Ils forment par ailleurs une population particulièrement sensible, en raison notamment du fait qu'ils sont en cours de développement de leurs organes et de leurs fonctions physiologiques. L'exposition des personnes aux champs électromagnétiques est en effet influencée par la taille des structures exposées (corps, membres, organes), à travers des phénomènes de résonance en fonction des fréquences mises en jeu, mais aussi en fonction des caractéristiques anatomiques du corps qui changent avec l'âge. Les rapports de proportionnalité entre la tête et le corps, ou encore l'épaisseur de l'oreille, sont modifiés au cours du développement. L'absorption de l'énergie électromagnétique dépend par ailleurs fortement des caractéristiques diélectriques des tissus, il convient donc d'étudier avec soin l'évolution de ces paramètres avec l'âge.

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

2 Avis des instances internationales et de l'Anses

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

2.1.1 Rapport Jülich (2009)

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

2.1.2 Conseil de santé des Pays-Bas (2011)

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

2.1.3 Centre international de recherche sur le Cancer (2013)

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

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

2.1.4 Santé publique Angleterre (2012)

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

---

[8] 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.

[9] *Cf.* glossaire pour la définition du DAS et la section 3.3 pour l'équation reliant le DAS au champ électrique.

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

2.1.5 Scenihr 2007, 2009 et 2013

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

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

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

2.1.6 Société royale du Canada (Demers, 2014)

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

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

Concernant les effets sur le système reproducteur, les experts concluent que l'exposition aux radiofréquences à des niveaux inférieurs à ceux établis dans les lignes directrices du code de

sécurité 6 (2013) (*cf.* paragraphe 3.1.3) n'a pas d'effet négatif sur les appareils et les fonctions de reproduction, mais recommandent que des études soient menées sur quelques points précis.

2.1.7 Neuvième rapport du Conseil scientifique du SSM sur les champs électromagnétiques (2014)

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

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

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

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

L'OMS réalise une évaluation des risques sanitaires des champs électromagnétiques radiofréquences, en vue de publier une monographie qui actualisera celle de 1993 (*Environmental health criteria*)[10].

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

2.2 Rapports Anses de 2001 à 2013

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

[10] 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'Icnirp[11] (*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)

[11] Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants.

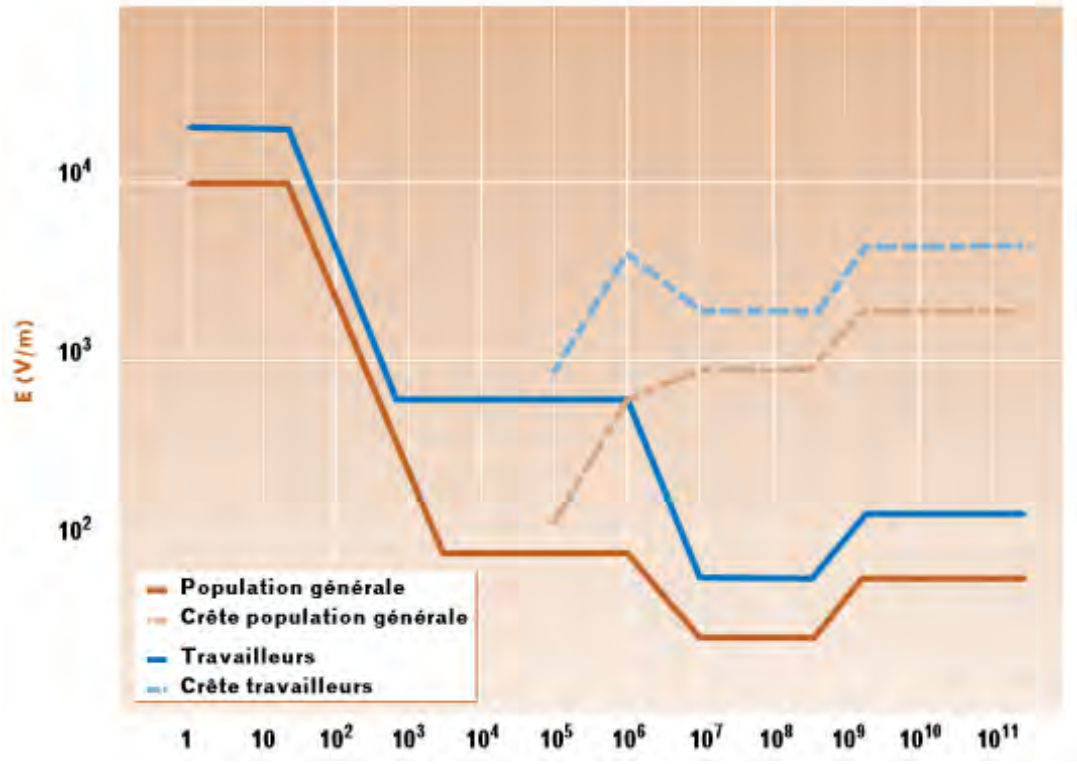


Figure 2 : niveaux de référence pour des champs électriques variables dans le temps préconisés par l'Icnirp (Source : Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS) 2001), traduction de Icnirp (1998)[12]).

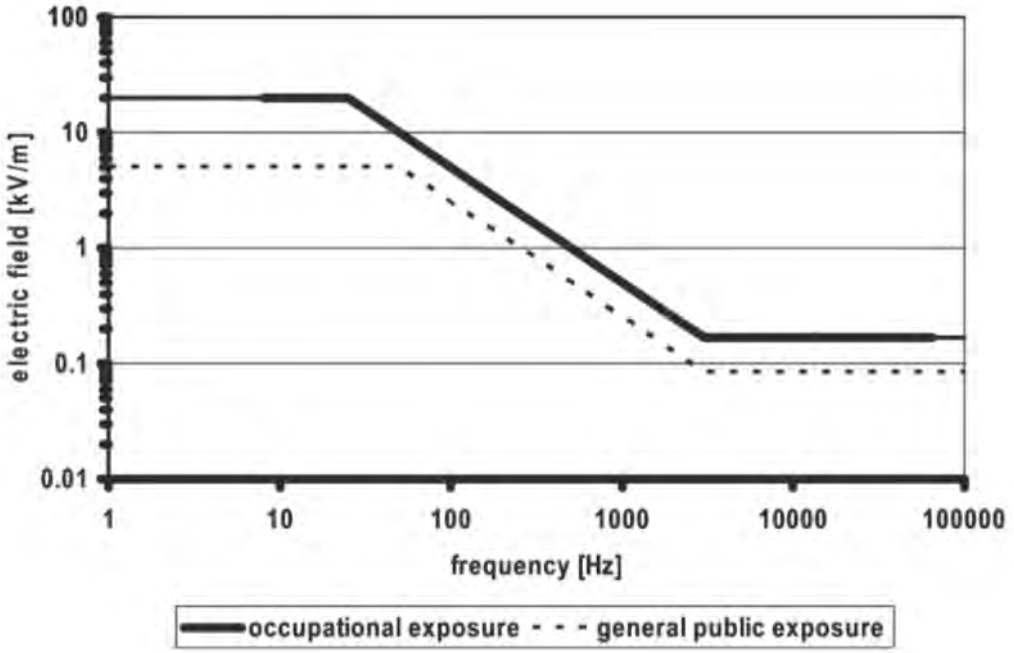


Figure 3 : niveaux de référence pour l'exposition aux champs électriques variables dans le temps (Icnirp, 2010[13]).

[12] Health Physics, April 1998, Volume 74, Number 4.

[13] Health Physics, December 2010, Volume 99, Number 6.

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

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

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

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

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

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

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

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

Tableau 2 : niveaux de référence pour l'intensité du champ électrique : valeurs proposées par le Conseil de santé des Pays-Bas en 1997 et en 2011.

Fréquence	***Health council* 1997**	***Health Council* 2011**
10 - 400 MHz	28	28
400 MHz – 2 GHz	53 x $f^{0,72}$ (f en GHz)	28
2 – 4 GHz	87	28
4 – 10 GHz	87	10,53 x $f^{0,705}$ (f en GHz)
10 – 20 GHz	78 x $f^{0,16}$ (f en GHz)	10,53 x $f^{0,705}$ (f en GHz)
20 – 300 GHz	78 x $f^{0,16}$ (f en GHz)	35,85 x $f^{0,296}$ (f en GHz)

3.1.3 Révision du code de sécurité 6 relatif aux dispositifs émettant des rayonnements (Santé Canada – 2015)

Le code de sécurité 6 (CS6), rédigé par le Bureau de la protection contre les rayonnements des produits cliniques et de consommation de Santé Canada propose des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques. La révision proposée en 2014, et adoptée en 2015, remplace la version de 2009. La bande de fréquences considérée est celle des radiofréquences, définie par Santé Canada comme la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz. Ces lignes directrices, qui s'appliquent aussi bien aux professionnels qu'au grand public, peuvent être adoptées par les provinces, l'industrie ou d'autres parties prenantes. Santé Canada précise que « bien que le fondement biologique des restrictions de base spécifiées dans le présent code de sécurité […] n'ait pas changé depuis la version antérieure (2009), les niveaux de référence ont été mis à jour, soit pour prendre en compte les améliorations avancées des dernières années en dosimétrie soit, lorsque possible, pour les harmoniser avec ceux de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants. »

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

Dans le rapport du groupe d'experts de la Société royale du Canada rendu au printemps 2014[14], qui a servi de base à la révision des valeurs limites du code de sécurité 6 par Santé Canada, l'argumentation suivante est développée :

« Dans la gamme de fréquences de 100 kHz à 6 GHz, des études récentes de dosimétrie fondées sur le DAS démontrent que les niveaux de référence du CS6 (2013) ne donnent pas toujours une protection suffisante contre le dépassement des restrictions de base du CS6 (2013). Un certain nombre d'études faisant autorité qui ont utilisé des modèles de corps humain d'adultes et d'enfants anatomiquement réalistes, dans des conditions d'exposition avec mise à la terre et avec isolation, montrent que le respect des niveaux de référence du CS6 (2013), pour certaines fréquences, n'assurera pas la conformité avec les restrictions de base du CS6 (2013) portant sur le DAS. Il est important de noter que, dans ces cas mis en relief où un niveau de référence conforme produit une valeur correspondant à un niveau non conforme avec la restriction de base visant le DAS, il est très peu probable que le DAS sera à un niveau suffisant pour atteindre les niveaux qui auront un effet nocif sur la santé des humains. Cela s'explique par le fait que les écarts ont tendance à être relativement mineurs et que les restrictions de base proposées pour le DAS intègrent des marges de sécurité. Cependant, pour que la définition du niveau de référence énoncée dans la section 2

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

du CS6 (2013), à savoir que le respect des niveaux de référence assurera la conformité avec les restrictions de base dans ce code de sécurité soit correcte, il est nécessaire de changer les niveaux de référence proposés dans le CS6 (2013). Le Comité recommande que Santé Canada examine le grand nombre d'études de dosimétrie, en plus de celles mentionnées dans le présent rapport, qui ont été produites depuis la dernière révision majeure du CS6 en 1999 et modifie les niveaux de référence proposés dans le CS6 (2013) en conséquence. »

Tableau 3 : évolution des niveaux de référence proposés par Santé Canada.

	Champ électrique (V/m)			
Fréquence	**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

Le nouveau code de sécurité 6 élaboré en 2014 a été soumis à consultation publique, et Santé Canada en a publié une nouvelle version, le 13 mars 2015[15]. Les niveaux de référence pour le champ électrique sont légèrement revus à la baisse, notamment pour les raisons suivantes : *« On a révisé le Code de sécurité 6 en 2013 afin de veiller à ce qu'il tienne compte des études scientifiques les plus à jour et les plus crédibles portant sur les effets possibles de l'énergie des RF sur la santé humaine. (…) Ces changements ont été proposés pour veiller à ce que de vastes marges de sécurité soient maintenues pour protéger la santé et la sécurité de tous, y compris celles des enfants. » […]*

« Parmi les recommandations formulées par la SRC, il était suggéré de restreindre légèrement les niveaux de référence proposés dans le projet de Code de sécurité 6 pour certaines gammes de fréquences afin d'assurer des marges de sécurité plus vastes pour tous les Canadiens, y compris les nouveau-nés et les enfants. »[16]

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- le champ électrique E (en V/m) (*cf.* Figure 2) ;
- le champ d'induction magnétique B[17] (en Tesla, plus souvent exprimé en µT) ou le champ magnétique (en Ampère / m).
- la densité de puissance équivalente pour une onde plane à partir de 10 GHz.

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

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

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

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

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

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

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

La directive R&TTE établit un cadre réglementaire pour la mise sur le marché, la libre circulation et la mise en service dans les pays de l'Union européenne des équipements hertziens et des

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

équipements terminaux de télécommunications. Elle modifie les procédures d'évaluation de la conformité (suppression de l'homologation obligatoire et application élargie de la procédure de contrôle interne de la fabrication par exemple) et accroit la responsabilité des fabricants ainsi que la surveillance du marché.

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

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

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

3.2.2.2 Exigences essentielles et conformité des appareils

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

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

3.2.2.3 Les recommandations de la directive

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

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

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

La recommandation stipule que :

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

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

Des informations complémentaires concernant ces deux recommandations sont présentées en Annexe 2.

3.2.2.4 Les normes harmonisées de la directive

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

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

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

3.2.3 Évolutions réglementaires

Le nouveau cadre législatif européen, qui s'appliquera à tous les produits vendus sur le marché européen, implique de nombreuses évolutions dans les directives européennes. Ainsi, la directive « R&TTE », qui expire le 13 juin 2016, sera remplacée par la directive 2014/53/UE sur les équipements radioélectriques (*Radio Equipment Directive*). Cette nouvelle directive définit un équipement radioélectrique comme « un produit électrique ou électronique qui émet et/ou reçoit intentionnellement des ondes radioélectriques à des fins de radiocommunication et/ou radiorepérage, ou un produit électrique ou électronique qui doit être complété d'un accessoire, tel qu'une antenne, pour émettre et/ou recevoir intentionnellement des ondes radioélectriques à des fins de radiocommunication et/ou radiorepérage ». La radiocommunication est quant à elle définie comme la communication au moyen d'ondes radioélectriques.

Les changements principaux introduits par la directive sont les suivants :

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

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

3.3 Panorama international des dispositions prenant en compte spécifiquement les enfants

3.3.1 En France

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

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

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

- « *Art. L. 5231-3.* − Toute publicité, quel qu'en soit le moyen ou le support, ayant pour but direct de promouvoir la vente, la mise à disposition, l'utilisation ou l'usage d'un téléphone mobile par des enfants de moins de quatorze ans est interdite. »
- « *Art. L. 5231-4.* − La distribution à titre onéreux ou gratuit d'objets contenant un équipement radioélectrique dont l'usage est spécifiquement dédié aux enfants de moins de six ans peut être interdite par arrêté du ministre chargé de la santé, afin de limiter l'exposition excessive des enfants. »

3.3.1.2 La loi n° 2015-136 du 9 février 2015 relative à la sobriété, à la transparence, à l'information et à la concertation en matière d'exposition aux ondes électromagnétiques

Déposée à l'Assemblée nationale le 11 décembre 2013, la proposition de loi avait pour objet de répondre aux inquiétudes suscitées par l'exposition aux ondes électromagnétiques, dans le cadre du développement des nouvelles technologies, en cherchant à concilier les enjeux économiques, environnementaux et sociaux.

La loi est composée de deux titres. Le titre Ier (articles 1 et 2) est relatif à la sobriété de l'exposition aux champs électromagnétiques, à l'information et à la concertation lors de l'implantation d'installations radioélectriques.

Le titre II (articles 3 à 8) porte sur l'information et la sensibilisation du public et des utilisateurs en cohérence avec les objectifs d'aménagement numérique du territoire, de qualité de service et de développement de l'innovation dans l'économie numérique.

L'article 5 décrit ainsi, entre autres, une mesure visant à limiter l'exposition des enfants :

Après l'article L. 5232-1 du code de la santé publique, sont insérés des articles L. 5232-1-1 à L. 5232-1-3 ainsi rédigés :

[…]

« Art. L. 5232-1-3[18].-A la demande de l'acheteur, pour la vente de tout appareil de téléphonie mobile, l'opérateur fournit un accessoire permettant de limiter l'exposition de la tête aux émissions radioélectriques adapté aux enfants de moins de quatorze ans. ».

L'article 7 regroupe les dispositions suivantes :

I. - Dans les établissements mentionnés au chapitre IV du titre II du livre III de la deuxième partie du code de la santé publique, l'installation d'un équipement terminal fixe équipé d'un accès sans fil à internet est interdite dans les espaces dédiés à l'accueil, au repos et aux activités des enfants de moins de trois ans.

II. - Dans les classes des écoles primaires, les accès sans fil des équipements mentionnés à l'article 184 de la loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement installés après la publication de la présente loi sont désactivés lorsqu'ils ne sont pas utilisés pour les activités numériques pédagogiques.

III. - Dans les écoles primaires, toute nouvelle installation d'un réseau radioélectrique fait l'objet d'une information préalable du conseil d'école.

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

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

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

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

3.3.3 Autres dispositions nationales

Afin de préparer la rédaction du chapitre 14 de la future monographie de l'OMS sur les risques sanitaires liés à l'exposition aux radiofréquences consacré aux pratiques de gestion des risques, une enquête a été réalisée dans le but de recueillir auprès des différents correspondants régionaux de l'OMS dans le monde des données sur les dispositions réglementaires, normatives ou d'applications volontaires liées à la gestion des risques potentiels de l'exposition aux radiofréquences. Les résultats de cette enquête, regroupés dans un « *background paper* », ont été discutés lors d'un colloque organisé par l'OMS à Paris en mai 2013. Les éléments présentés ci-après sont extraits de ce document[19] et de la publication associée (Dhungel et al. 2014).

Parmi les pays ayant répondu à l'enquête, 33 % ont formulé des recommandations ou encouragé à prendre des mesures volontaires pour limiter l'usage des téléphones mobiles par les enfants. Parmi ceux-ci, 52 % visent à limiter l'usage du téléphone mobile par les enfants en fournissant des informations aux parents, et 4 (Russie, France, Zambie, Belgique) déclarent avoir émis des limites d'âge pour leur utilisation. La Figure 4 présente les pays qui intègrent au moins une forme de recommandation concernant l'usage des téléphones mobiles par les enfants. Douze pays (48 %) ont restreint l'usage des téléphones mobiles à l'école. Dans 75 % de ces cas, les raisons

[18] L'article L. 5232-1-3 du Code de la santé publique a été transféré à l'article L. 5231-3-1 par la loi n°2016-41 du 26 janvier 2016 - art. 61.

[19] http://www.who.int/peh-emf/meetings/seminar_radiofrequency_june2013/en/.

invoquées sont uniquement de nature éducative : éviter la perturbation dans l'école, maintenir la discipline, etc. Dans 3 pays (France, Oman, Espagne), il existe des limitations de la publicité ciblant les enfants.

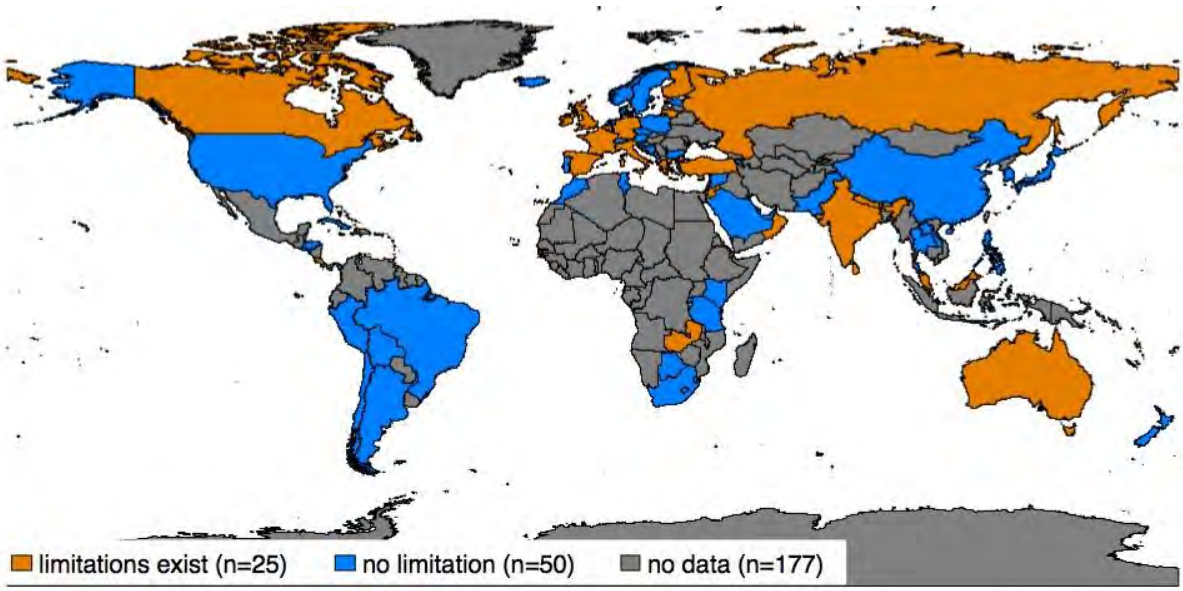


Figure 4 : pays intégrant des limitations volontaires ou des informations sur l'usage des téléphones mobiles par les enfants.

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 1998[20]) 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 population générale, en matière par exemple de sensibilité thermique (personnes âgées, nourrissons, enfants, personnes malades, *etc.*), mais aussi les dernières connaissances scientifiques en matière de dosimétrie, notamment au regard des spécificités des enfants.

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

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

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

.

[20] À noter que l'Icnirp a organisé 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.

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 :

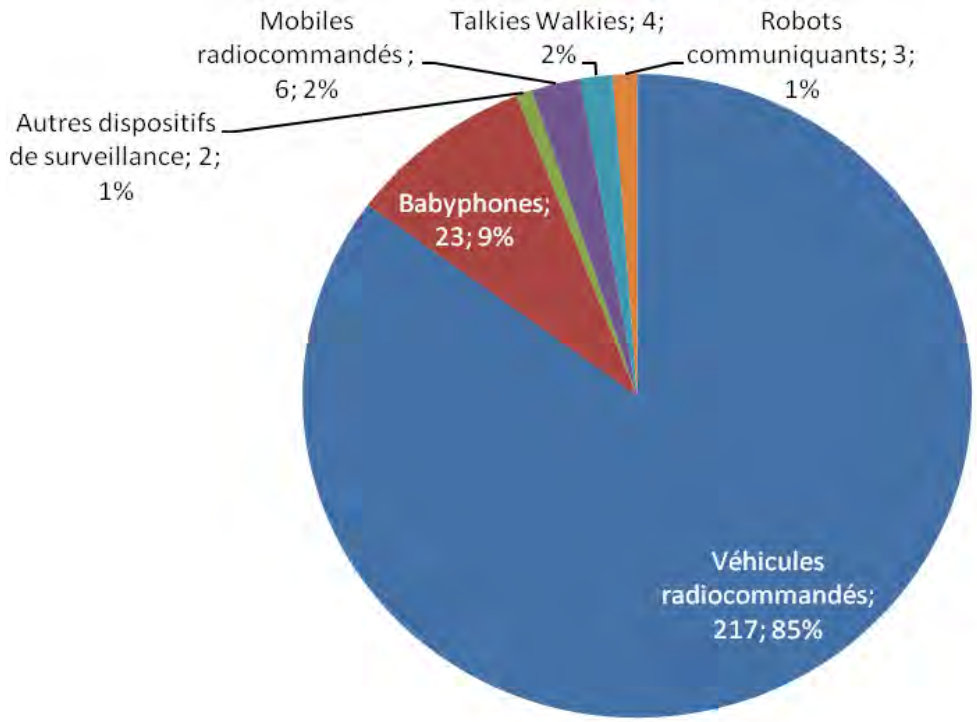


Figure 5 : types de produits radioélectriques à destination des enfants de moins de 6 ans existants sur le marché français, en nombre et pourcentage du marché (LNE, 2012).

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

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

4.1.1 Les veille-bébés (ou *babyphone*)

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

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

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

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

En fonction de leurs technologies, les veille-bébés peuvent fonctionner à des fréquences très différentes, de 27 MHz à 2,4 GHz (voir Tableau 4). Le mode de transmission dépend de la fréquence (modulation d'amplitude ou de fréquence à 27 ou 40 MHz, DECT à 1,9 GHz, ou impulsionnel à 2,4 GHz). La puissance d'émission des appareils varie entre 10 et 500 mW ERP[21] pour les plus puissants (*talkie-walkies* avec fonction veille-bébé), de même que leur portée peut varier de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. Les veille-bébés fonctionnent avec des piles ou un adaptateur secteur.

Le Tableau 4 présente les puissances maximales autorisées en fonction de la fréquence d'émission. Ces données proviennent des normes de l'Institut européen des normes de télécommunication (ETSI[22]) et des recommandations présentées précédemment (*cf*. 3.2.2.3 et Annexe 2).

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

[22] *European Telecommunications Standards Institute*.

Tableau 4 : 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 *Baby monitoring*	28
40,7	6,5	10	150	Application à courte portée non spécifique	28
446	0,7	500	5 000[23]	Radiocommunication (*talkie-walkie*)	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

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

4.1.2 Les jouets radiocommandés

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

Avec celui des veille-bébés, le marché des jouets radiocommandés est l'un des plus importants en ce qui concerne les appareils radioélectriques à destination des enfants. De nombreux jouets peuvent être radiocommandés, tels que des véhicules (voitures, bateaux, avions, hélicoptères, locomotives, Figure 6), des peluches, ou encore des robots (Figure 7).

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

L'ensemble du jouet radiocommandé est composé :

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

[23] 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.

- d'un ensemble de batteries ou de piles.

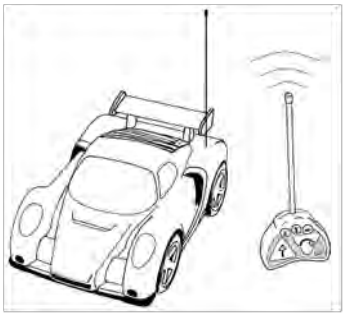


Figure 6 : voiture radiocommandée.

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

4.1.3 Les *talkies-walkies*

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

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

4.1.4 Les robots communicants

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

[24] PMR : réseau *Professional Mobile Radio*.

Figure 7 : lapin Karotz.

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

4.1.5 Les téléphones mobiles pour enfants

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

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

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

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

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

A

B

Figure 8 : téléphones MO1 (à gauche) et BabyM (à droite).

Figure 9 : téléphones mobiles pour enfants.

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

4.1.6 Les tablettes tactiles pour enfants

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

À l'heure actuelle, le marché des tablettes est en constante progression. En effet, d'après l'entreprise *NPD group*[25], la tablette *Storio 2*, qui s'était déjà hissée en tête des ventes sur l'ensemble de l'Europe en 2012, est devenue le jouet le plus vendu en France en 2013 toutes catégories confondues. D'après les derniers résultats hebdomadaires de NPD Group (jusqu'à fin novembre 2013) les ventes de tablettes pré-scolaires (à partir de 18 mois et jusqu'à 6 ans) et de leurs jeux respectifs ont presque doublé comparées aux chiffres à la même période en 2012. Au 1er décembre 2013, près de 440 000 tablettes pour enfants ont été vendues en France depuis le début de l'année[26].

Cependant, compte tenu du prix de ces tablettes, certains guides d'achat[27] recommandent aux parents d'acheter à leurs enfants des tablettes adultes, plus abordables, plus évolutives et qui possèdent en outre une option de contrôle parental. Or, l'usage par les enfants de tablettes pour adulte peut engendrer une exposition à des signaux 3G/4G, en plus des connexions Wi-Fi classiques.

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

---

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

[26] https://www.npdgroup.fr/wps/portal/npd/fr/actu/communiques-de-presse/grace-a-une-croissance-retrouvee-depuis-le-debut-de-lannee-noel-sannonce-prometteur-pour-le-marche-du-jouet ;

[27] 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

[28] http://eduscol.education.fr/cid71927/tablettes-tactiles-retours-d-experimentations-et-potentialites-pedagogiques.html.

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

4.1.7 Les jouets connectés

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

4.1.8 Les modules anti-éloignement et applications de géolocalisation

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

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

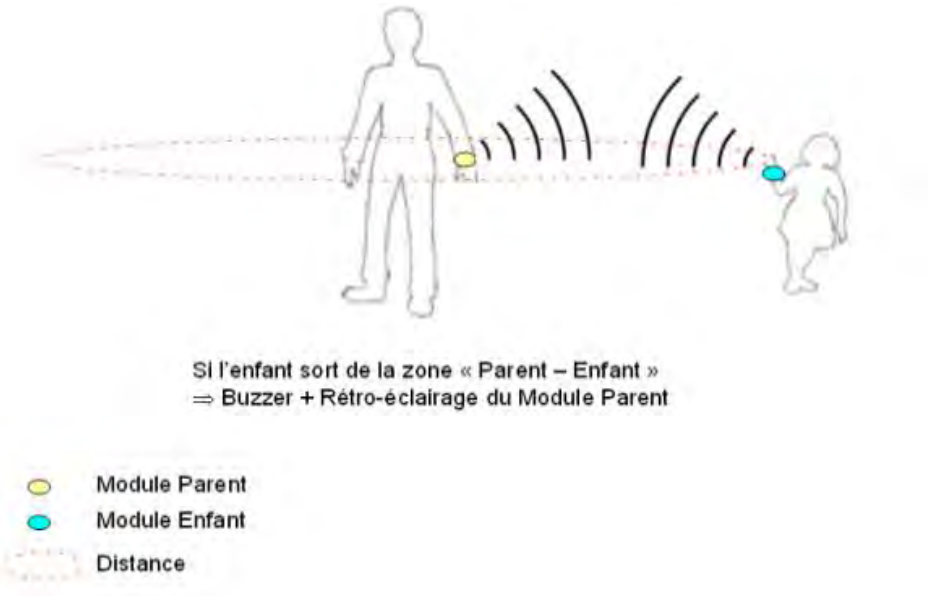


Figure 10 : fonctionnement d'un module anti-éloignement.

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

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

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

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

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

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

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

4.2.1 Taux d'équipement

Depuis moins de 10 ans, l'usage du téléphone mobile s'est beaucoup répandu chez les enfants et les adolescents, avec une importante progression du taux d'équipement en France, passant de 72 % en 2003 à 90 % en 2013 (Credoc 2013) (*cf.* Tableau 5). Le taux d'équipement en *smartphone* chez les 12 - 17 ans est passé de 22 % en 2011 à 55 % en 2013 (Credoc, 2013). Aucune donnée n'est disponible pour les plus jeunes enfants. Si le taux d'équipement des jeunes enfants (d'âge inférieur à 6 ans) n'est pas connu, leur usage des téléphones mobiles n'est pas non plus précisément quantifié, notamment en France.

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

.

Tableau 5 : 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

Référence de l'étude	Ville ou état Pays	Nombre d'enfants	Âges des enfants	Taux d'équipement	Usage	Date de l'étude
Söderqvist *et al*., 2007	Suède	1423	7 – 14 ans	79,1 %	26,7 % des enfants utilisent le téléphone mobile 2 min ou plus par jour. 57,7 % possèdent leur propre téléphone mobile. 73,3 % utilisent leur téléphone moins de 2 min par jour.	Oct 2005 – Mai 2006
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	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 *smartphone*)	-	2011
				90 % (55 % de *smartphone*)	-	2013

4.2.2 Habitudes téléphoniques

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

Âge de la première utilisation

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

Redmayne *et al*. (2010) ont réalisé une enquête transversale explorant les habitudes téléphoniques des adolescents néozélandais entre mi-juin et octobre 2009 (Redmayne et al. 2010). Trois cent dix-sept adolescents, âgés en moyenne de 12,3 ans (10,3 - 13,7 ans), ont été tirés au sort dans des écoles autour de Wellington, fournissant un échantillon représentatif de la région du point de vue du niveau socioéconomique de l'école, du type d'école et de la ruralité. Les participants ont rempli un questionnaire inspiré de celui de l'étude MoRPhEUS, complété par des mesures de la distance entre le téléphone et le corps pendant une utilisation type. Une estimation du temps passé près d'un téléphone mobile allumé a été réalisée, ainsi que le temps et le nombre d'appels avec différents types de téléphones sans fil (mobile ou DECT), et le type d'utilisation (appel, envoi de messages texte, fonctions utilisées, utilisation à l'école, etc.). L'étude révèle que 87 % des adolescents ont un téléphone sans fil à la maison et 77 % possèdent leur propre téléphone mobile. Une relation statistiquement significative a été retrouvée entre l'utilisation du téléphone sans fil et du téléphone mobile.

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

Consommation téléphonique

En 2007, Söderqvist *et al.,* ont estimé le taux d'équipement et l'usage du téléphone mobile et du téléphone sans fil parmi les enfants de 7 à 14 ans. Un questionnaire de 24 questions a été envoyé à 2000 personnes sélectionnées à partir du registre de population suedoise, selon un mode d'échantillonage stratifié. Environ 79 % des répondants ont accès à un téléphone mobile et 26,7 % l'utilisent 2 minutes ou plus par jour. (Söderqvist *et al.,* 2007).

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

Les utilisations principales du téléphone mobile sont :

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

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

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

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

Dans une étude analysant l'association entre l'utilisation du téléphone mobile et la perte d'audition chez les enfants de 7 ans (voir paragraphe 5.5.3.1), Sudan *et al.*, révèlent que 36 % des enfants (n = 18 935, cohorte danoise nationale des naissances) utilisent un téléphone mobile à l'âge de 7 ans, mais moins de 1 % l'utilisent plus d'une heure par semaine (Sudan *et al*. 2013a)

4.2.3 Commentaires sur la méthodologie des études d'exposition

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

En 2009, une étude incluant 59 enfants âgés entre 11 et 12 ans en Australie a testé la corrélation entre les données d'exposition auto-rapportées par questionnaire et celles obtenues en utilisant des téléphones GSM dont le logiciel a été modifié pour enregistrer certaines données d'exposition (par exemple durée et fréquence des appels…) (Inyang et al. 2009). Les résultats sont illustrés par une corrélation médiocre ($r^2_{\text{fréquence des appels}} = 0,3$ et $r^2_{\text{durée des appels}} = 0,1$). Selon les auteurs, la véracité et la précision des données fournies par les adolescents sont compromises par leur

difficulté à se remémorer des évènements. De plus, les adolescents ont tendance à détourner leurs réponses en fonction de leur volonté d'acceptation sociale.

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

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

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

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

Les données d'exposition aux champs électromagnétiques induits par les dispositifs radioélectriques destinés aux enfants sont peu nombreuses. Quelques éléments ont pu être recueillis dans la littérature, à travers des tests réalisés sur des veille-bébés principalement et des jouets de type *talkie-walkie*. Dans le cadre d'une convention particulière, le LNE a ainsi été sollicité par l'Anses afin de réaliser des mesures de l'exposition aux dispositifs radioélectriques destinés aux enfants repérés au préalable par une étude de marché (*cf.* section 4.3.2).

Même si, grâce à un accord tacite entre autorités et opérateurs de téléphonie mobile, aucun téléphone spécifiquement destiné aux enfants de moins de 6 ans n'est proposé dans le cadre des offres des opérateurs mobiles français, il est tout à fait possible pour un jeune enfant d'utiliser un téléphone mobile. Ainsi, la section 4.4 de ce chapitre est consacrée à l'étude des spécificités de l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques, à travers leurs caractéristiques morphologiques mais aussi biologiques particulières. Depuis quelques années, les progrès de la modélisation et de la simulation numérique ont autorisé en effet l'étude des interactions entre les champs électromagnétiques et le vivant, depuis le fœtus jusqu'à l'âge adulte.

4.3.1 Données d'exposition issues de la littérature

Hormis les spécifications des appareils, lorsque celles-ci sont disponibles, qui peuvent renseigner sur les puissances émises et donner un ordre de grandeur de l'exposition résultante, il existe peu de publications consacrées à l'étude de l'exposition liée aux appareils radioélectriques à destination des enfants. Les fréquences utilisées par ces appareils se répartissent sur une grande

partie du spectre électromagnétique, ce qui rend les études extrêmement complexes. Ainsi, dans le cas des veille-bébés par exemple, les fréquences utilisées vont de 27 MHZ à 2,4 GHz. Les techniques de mesure de l'exposition ne sont pas les mêmes pour ces fréquences extrêmes, et si les communications mobiles dans la bande 800 MHz – 3 GHz ont considérablement aidé au développement des outils de mesure dans cette bande, les mesures restent beaucoup plus délicates à réaliser autour de 30 – 40 MHz.

4.3.1.1 Veille-bébés

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

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

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

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

Le Vivanco BM 800 et le Vivanco BM 900 ont été testés selon le même protocole. Un signal audio de fréquence 800 Hz est émis par 2 haut-parleurs situés à 1 m du veille-bébé. Même si le veille-bébé ne doit pas être placé près du corps en utilisation normale, les valeurs de DAS des deux appareils ont été déterminées. Pour effectuer ces mesures, les appareils ont été réglés sur un signal continu en régime permanent, créant le rayonnement le plus important possible. Les résultats sont reportés dans le Tableau 6. Pour une analyse de la variation du DAS à différentes orientations, le veille-bébé Vivanco BM 800 a été tourné de 90° par rapport à l'axe de son antenne.

Tableau 6 : 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	0,010	0,012
Vivanco BM 800 (rotation de 90°)	863	10	0,018	0,012
Vivanco BM 900	446	500	0,077	0,115

Source : Kramer *et al.* (2005)

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

4.3.1.2 Tablettes tactiles

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

Tableau 7 : 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

Source : http://www.experip.com

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

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

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

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

4.3.1.3 Exposition aux signaux Wi-Fi dans les écoles

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

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

de DAS pour des cartes Wi-Fi de l'ordre de 10 à 200 mW/kg. L'intégration des émetteurs Wi-Fi dans les ordinateurs portables, en lieu et place des cartes Wi-Fi dont les antennes étaient proéminentes, pourrait expliquer la différence observée entre ces deux études.

Parmi les 146 ordinateurs portables investigués, la densité de puissance moyennée serait de 220 µW/m² à une distance de 50 cm. Le pic de DAS dans la région thoracique à 34 cm de l'antenne serait de 80 µW/kg.

Pour un scenario pire-cas prenant en compte une classe avec 30 ordinateurs portables et un point d'accès Wi-Fi émettant une densité de puissance maximale à 50 cm, l'exposition des élèves de la classe pourrait atteindre 16,6 mW/m², ce qui est nettement inférieur aux niveaux de référence recommandés par l'Icnirp de 10 W/m².

4.3.2 Caractérisation de l'exposition induite par certains dispositifs radioélectriques

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

- 4 véhicules radiocommandés (jouets) ;
- 3 veille-bébés (à différentes fréquences, comme indiqué dans le Tableau 8) ;
- 3 *talkies-walkies* ;
- 1 module anti-éloignement à fixer sur la chaussure ou la ceinture de l'enfant ;
- 1 robot communicant.

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

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

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

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

Le Tableau 8 décrit les caractéristiques techniques des appareils sélectionnés.

Tableau 8 : 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 Speeder	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

Pour obtenir des mesures comparables entre elles, l'exposition aux champs électromagnétiques a été mesurée à deux distances des objets : 1 m et 3 m. Il n'était pas possible de se rapprocher plus dans le cadre de cette étude. En effet, les dispositifs fonctionnant aux fréquences les plus basses de la sélection, de l'ordre de 27 MHz, émettent en zone de champ proche sur une distance relativement grande, au sein de laquelle il est techniquement difficile de réaliser des mesures.

Afin d'être isolées des perturbations électromagnétiques extérieures (radio AM, FM, Wi-Fi, GSM, *etc*.), les mesures ont été effectuées en chambre faradisée[29]. La mesure du champ électrique a été réalisée à l'aide d'une antenne de mesure large bande couvrant les fréquences de 20 MHz à 3 GHz, installée avec l'appareil à tester dans une chambre faradisée semi-anéchoïque (pour éviter les réflexions parasites). L'antenne a été placée successivement à 3 mètres et 1 mètre de distance des jouets, et connectée à un récepteur de mesure, lequel est destiné à afficher les différentes fréquences et l'amplitude du signal. Par conséquent, il permet la mesure de la puissance des signaux électriques dans le domaine fréquentiel. La Figure 11 illustre le protocole de mesure.

Les mesures ont été effectuées successivement à 1 et 3 mètres en polarisation verticale et horizontale aux fréquences des différents émetteurs.

Pour chaque mesure, les appareils ont été disposés de telle sorte que leur antenne d'émission soit en face de l'antenne de mesure, afin d'obtenir un champ électromagnétique maximum.

[29] 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.

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

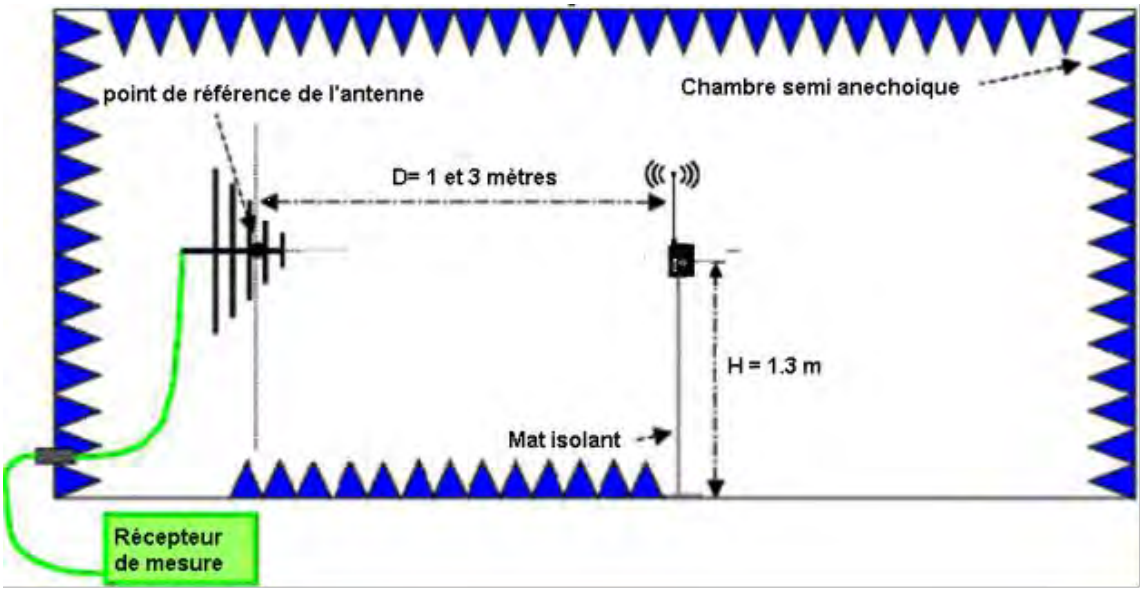


Figure 11 : installation de l'équipement en chambre anéchoïque.

Les valeurs mesurées à l'analyseur de spectre sont données en échelle logarithmique, l'unité est le décibel microvolt (dBµV).

Afin d'obtenir la valeur réelle du champ électrique (E), il convient de prendre en compte le facteur d'antenne[30], ainsi que les pertes en ligne du câble (plus la fréquence est élevée, plus les pertes sont importantes), entre l'antenne et le récepteur.

Les résultats des mesures en polarisation horizontale et verticale sont donnés pour 1 et 3 m, ainsi que la valeur totale du champ électrique (somme quadratique des deux polarisations) (*cf*. Tableau 9).

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

Tableau 9 : mesure du champ électrique émis par des dispositifs radioélectriques destinés aux enfants, à 1 mètre et 3 mètres de distance.

Catégorie	Marque	Référence	Fréquence	Champ électrique à 1 mètre (V/m)			Champ électrique à 3 mètres (V/m)		
				Horizontal	Vertical	Total	Horizontal	Vertical	Total
Veille-bébé	Babymoov	A014401 / VBC-36	864,81 MHz	0,052	0,088	0,103	0,009	0,055	0,055
			2,4166 à 2,45 GHz	0,023	0,087	0,090	0,004	0,034	0,034
	Badabulle	BC20 / B014000	plusieurs canaux 40,66 et 40,69 MHz	0,076	0,375	0,382	0,018	0,125	0,127
	Chicco	02500	DECT 1,889 GHz	0,693	0,358	0,780	0,303	0,217	0,373
Talkie-Walkie	IMC Toys	550124	40,685 MHz	0,015	0,107	0,108	0,04	0,055	0,056
	Vtech	Kiditalkie 1153	446,022 MHz	0,736	1,489	1,661	0,610	0,788	0,996
	Der echte Scout	19270	40,71 MHz	0,225	0,025	0,227	0,02	0,116	0,116
Module anti-éloignement	Parameo	CL103	433,94 MHz	0,220	0,196	0,294	0,092	0,061	0,110
Robot communicant	VIOLET	Karotz	2,4166 à 2,45 GHz	0,039	0,171	0,175	0,012	0,087	0,088
Véhicule radio commandé	CHICCO	Carolina Cabriolina	40,66 MHz	0,006	0,042	0,042	0,004	0,018	0,019
	Smoby	BAO	27,146 MHz	0,009	0,050	0,051	0,004	0,034	0,034
	Chicco	Billy big Wheels	40,67 MHz	0,014	0,027	0,031	0,002	0,013	0,014
	Carrera RC	8348	27,094 MHz	0,037	0,273	0,275	0,014	0,149	0,150

4.3.2.1 Considérations sur les champs électriques mesurés

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

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

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

4.3.2.2 Extrapolation des champs aux distances d'utilisation

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

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

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

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

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

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

Tableau 10 : valeurs de champs électriques mesurés et calculés émis par des 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 *D* (cm)	Champ électrique calculé à la distance *D* (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
Talkies-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

Dans le Tableau 10, les niveaux de champ « crête » (instantanés) relevés pour les différents appareils testés représentent des pire cas de l'exposition, à comparer aux valeurs limites de l'Icnirp qui ont été pour leur part établies pour une valeur moyenne des champs dans le temps. La modulation du signal des appareils peut donc apporter un facteur de modération aux résultats présentés ci-dessus. Par ailleurs, les valeurs limites de l'Icnirp exprimées en champ électrique (appelées dans ce cas « niveaux de référence »), correspondent aux valeurs maximales d'exposition au champ électrique pour le corps entier, déduites des restrictions de bases exprimées par exemple en DAS. Par conséquent, la comparaison entre les valeurs de champ électrique mesurées ou extrapolées à proximité des sources et les valeurs limites de l'Icnirp doit être interprétée avec précaution, *a priori* comme une situation d'exposition maximale et en tout cas sans valeur réglementaire. En réalité, pour les sources très proches du corps, l'interaction entre le champ électromagnétique et les tissus est complexe, il faudrait donc utiliser des grandeurs « internes » (DAS, courant et champ induits) pour représenter l'exposition, malheureusement très difficiles voire impossibles d'accès à l'heure actuelle, autrement que par des simulations numériques. Dans le cas de l'usage de dispositifs radioélectriques près du corps, les mains, une partie du tronc ou encore la tête, par exemple, sont beaucoup plus exposées que le reste du corps, et l'exposition de ces parties ne peut pas être extrapolée à celle du corps entier. Les extrapolations des valeurs de champ électrique proposées ici, à différentes distances en fonction du type de dispositif, doivent de plus être considérées avec réserves. En effet, à proximité des sources, il faudrait théoriquement connaître à la fois les champs électrique et magnétique pour obtenir une description complète de l'environnement électromagnétique. Les valeurs du champ électrique données ici permettent néanmoins d'en fournir une bonne approximation.

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

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

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

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

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

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

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

Il semble qu'un certain flou entoure les mesures normatives de l'exposition à ce type de dispositifs. La commission fédérale des communications (FCC[31]), organisation nord-américaine qui édite notamment des normes de test pour l'exposition humaine aux champs électromagnétiques, prévoit

[31] *Federal Communications Commission*

qu'un rapport cyclique de 50 % soit appliqué lors des tests de ces *talkies-walkie*s, pour tenir compte du fait qu'ils sont *a priori* utilisés en moyenne la moitié du temps lors d'une conversation entre deux personnes. Cette disposition ne se retrouve pas dans d'autres normes de tests, notamment en Europe. Le 31 mai 2015, la modification des normes EN 300296-1 et EN 300296-2 devrait rendre obligatoire l'intégration dans les *talkies-walkies* d'un système « anti-bavard », qui coupera l'émission après 180s, pour redonner la parole à l'autre correspondant…

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

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

Mesure de DAS selon la norme EN 62209-2

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

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

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

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

4.3.3 Données d'expositions spécifiques aux téléphones mobiles portés près du corps

Avec la modification des services associés aux *smartphones*, les conditions d'usage des téléphones mobiles ont fortement évolué depuis quelques années. Les téléphones ne sont plus

seulement portés à la joue, entre la bouche et l'oreille, pour tenir une conversation. Ils sont désormais utilisés notamment comme objets de divertissement pour écouter de la musique, visionner des films ou encore jouer à des jeux vidéo. Dans ces conditions, les téléphones ne sont plus positionnés près de la tête, mais dans les mains, face au visage, près du corps (tronc) ou dans des poches de vêtement (jambes, poitrine). Les valeurs limites d'exposition (en DAS) sont définies en fonction de la partie du corps exposée : la tête et le tronc d'une part, les membres d'autre part. Par ailleurs, les normes de mesure qui définissent les conditions de test des téléphones mobiles pour vérifier leur conformité par rapport aux valeurs limites distinguent l'usage à la tête de l'usage « corps ». Dans ce dernier cas, c'est la norme NF EN 62209-2 qui s'applique, et qui laisse au constructeur du dispositif rayonnant la liberté de définir les conditions prévues d'utilisation, imposant ainsi une distance minimale de test du DAS entre le téléphone et le mannequin représentant le corps. Cette distance minimale ne peut cependant excéder 25 mm. En pratique, il parait peu probable que les personnes, et surtout les enfants, utilisant des téléphones mobiles prennent réellement connaissance des conditions d'utilisation à proximité du corps définies par les constructeurs, citées en principe dans la notice d'utilisation. Dans la plupart des cas, celles-ci demandent d'éloigner le téléphone du corps en général de 15 mm. La distance de séparation entre le corps et un téléphone placé dans une poche de chemise, par exemple, peut n'être en réalité que de quelques mm, quand dans certaines situations celui-ci n'est pas placé directement au contact…

L'agence nationale des fréquences (ANFR), établissement public de l'État à caractère administratif, est notamment chargée de la surveillance du marché des équipements radioélectriques et des équipements terminaux, en application de l'article R.20-44-11 du code des postes et des communications électroniques (CPCE). Les conditions de mise sur le marché de ces équipements résultent des articles L.34-9, L.34-9-1, R.9, R.20-1 et suivants du même code et des arrêtés pris pour leur application, qui transposent la directive communautaire 1999/05/CE du 9 mars 1999, dite R&TTE.

Dans le cadre de cette mission, des agents habilités et assermentés de l'ANFR ont prélevé, dans des lieux de vente, 95 équipements de type téléphones mobiles entre le 1er janvier 2012 et le 31 décembre 2014, et 71 entre le 1er janvier et le 31 décembre 2015. À la suite de ces prélèvements, les équipements concernés ont fait l'objet de mesures de débit d'absorption spécifique (DAS) par un laboratoire désigné par arrêté du ministre chargé des communications électroniques. En application de la directive R&TTE, ces mesures ont été effectuées en prenant en compte les conditions d'utilisation prévues par le fabricant, typiquement à une distance de 15 mm de l'appareil. Dans ces conditions, aucun dépassement de la valeur limite d'exposition de 2 W/kg définie par l'arrêté du 8 octobre 2003 fixant des spécifications techniques applicables aux équipements terminaux radioélectriques n'a été enregistré.

Toutefois, la Directive R&TTE est abrogée par la Directive 2014/35/UE, à compter du 13 juin 2016. Cette nouvelle directive prévoit, pour évaluer la conformité des équipements, de prendre en compte les conditions de fonctionnement raisonnablement prévisibles. En l'espèce, l'utilisateur est susceptible d'être au contact de l'appareil. Dans ce cadre et dans un but d'information, des mesures ont donc été effectuées dans ces conditions. Des valeurs de DAS supérieures à la valeur limite d'exposition de 2 W/kg ont ainsi été mesurées. Les personnes responsables de la mise sur le marché, souvent les fabricants, ont été informées des résultats de ces mesures (*cf.* Figure 12).

Les autorités françaises, par la voix de la Direction générale des entreprises (DGE), sur la base des campagnes de mesures de l'ANFR, ont estimé nécessaire une révision de la norme EN 50566 :2013 afin qu'elle ne permette pas au fabricant de choisir une distance possiblement incompatible avec une utilisation réaliste des équipements. Conformément à son article 5, paragraphe 2, les autorités françaises ont saisi le comité pour l'évaluation de la conformité et de la surveillance du marché des télécommunications (TCAM). La Commission européenne a rédigé un projet de décision indiquant que la norme EN 50566 :2013 ne satisfait pas à l'exigence essentielle de protection de la santé et de la sécurité de la directive R&TTE 1999/5/CE. Prenant en considération cette défaillance et en attendant une révision appropriée de la norme, le projet de

décision proposé par la Commission européenne conduirait à la publication au Journal Officiel de l'Union Européenne de restrictions dans l'application de la norme EN50566 :2013. La procédure, à la date de rédaction de ce rapport, est toujours en cours au niveau de la Commission européenne.

En 2015, 89 % des téléphones mesurés au contact par l'ANFR présentaient un DAS supérieur à 2 W/kg et 25 % un DAS supérieur à 4 W/kg. Vingt-cinq pour cent des téléphones contrôlés n'avaient pas de distance de séparation déclarée dans la notice d'utilisation, associé à un DAS corps en contact supérieur à 2 W/kg.

L'analyse de la répartition des mesures de DAS moyenné dans 10 g maximum qui dépassent 2 W/kg, lorsque le téléphone est au contact du mannequin de test, en fonction des bandes de fréquences testées ne fait pas ressortir de fréquence privilégiée. On peut toutefois noter que les bandes UMTS 1950 MHz et LTE 2600 MHz semblent être plus souvent représentées que les autres dans les valeurs de DAS élevées. La valeur maximale du DAS corps au contact est mesurée sur la bande :

- UMTS 2100 dans 30 % des cas ;
- DCS 1800 dans 21 % des cas ;
- GSM 900 dans 13 % des cas ;
- LTE dans 30 % des cas.

Lors des tests de DAS au contact du corps, les téléphones sont testés à la fois face arrière et face avant contre le mannequin. En 2015, 68 % des téléphones dont le DAS au contact était supérieur à 2 W/kg ont été testés en face arrière. Dans les années précédentes, notamment en 2012 et 2013, les mesures supérieures à 2 W/kg étaient en revanche essentiellement retrouvées en face arrière (dans plus de 90 % des cas).

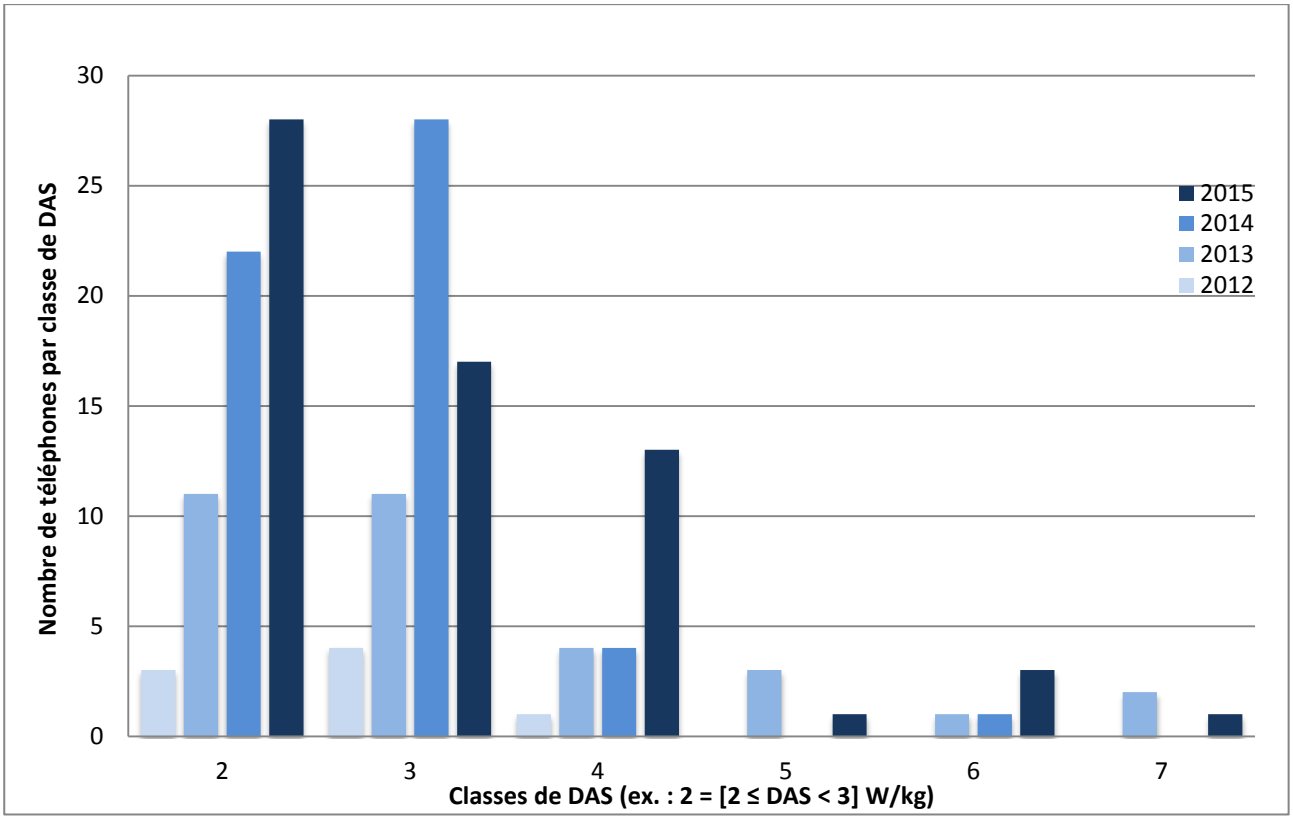


Figure 12 : nombre de mesures au contact supérieures à 2 W/kg par classe de DAS (2012 - 2015).

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 :

$$DAS = \frac{\sigma |Eeff|^2}{\rho} = c.\frac{dT}{dt} = \frac{J^2}{\rho\sigma}$$

Avec :

- E_{eff} : valeur efficace de l'amplitude du champ électrique dans les tissus (V/m), c'est-à-dire la valeur crête divisée par racine de 2 ;
- σ : conductivité du tissu (S/m) ;
- ρ : masse volumique du tissu (kg/m^3) ;
- dT/dt : variation de température dans le tissu (°C/s) ;
- J : densité de courant induit dans le tissu (A/m²) ;
- c : Chaleur massique des tissus du corps humain exprimée en J/kg/K.

La deuxième partie de cette expression montre que le DAS est une énergie représentative d'une augmentation de la température pour une masse de tissu donnée (*cf*. Anses, 2013).

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*[32], représentation numérique d'un corps humain (homme et femme) « normal » obtenue à partir de sections d'1 mm d'épaisseur pour l'homme et d'un tiers de millimètre pour la femme issues de données d'imagerie médicale ou de cadavres cryogénisés.

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

masculins

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

féminins

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

femmes enceintes

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

enfants

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

familles

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

[32] http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html.

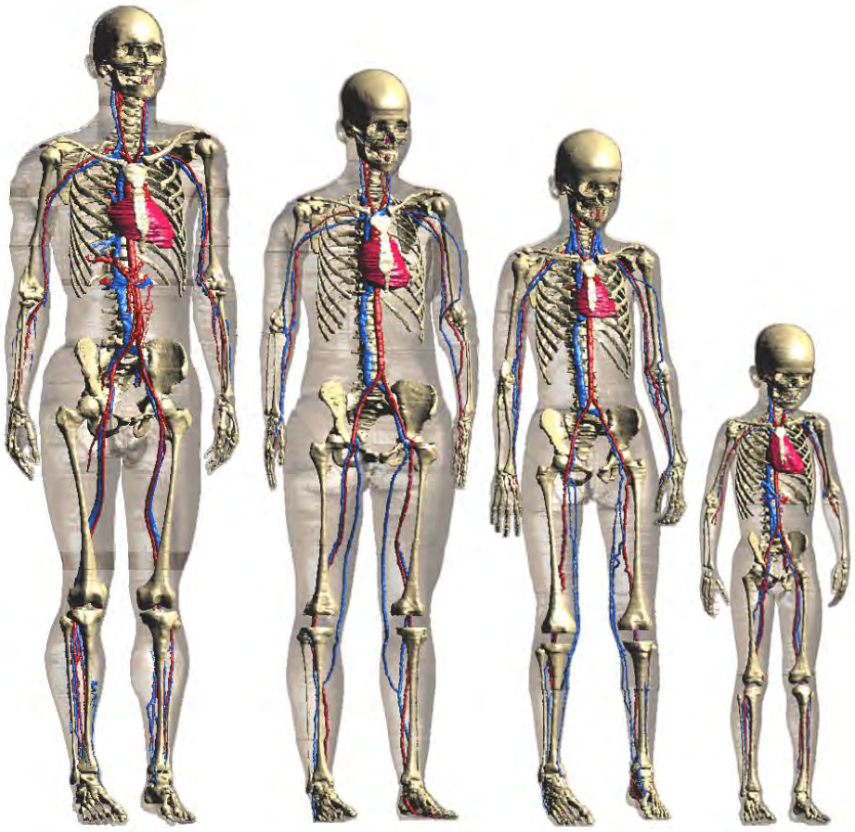


Figure 13 : la famille virtuelle : Duke, Ella, Billie, Thelonious (Christ *et al*. 2007).

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 1996[33], 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.

[33] http://niremf.ifac.cnr.it/docs/DIELECTRIC/Report.html.

D'autres références existent, dont certaines basées sur des modèles (par exemple le modèle de Cole-cole (Cole & Cole 1941)).

La fondation de recherche suisse It'is, spécialisée dans les technologies liées à la recherche des effets biologiques des champs électromagnétiques, met à disposition, en ligne, une base de données des paramètres diélectriques dans les différents tissus aux différentes fréquences. Cette base de données a été construite à partir des éléments fournis par C. Gabriel et de la littérature ultérieure. La Figure 14 présente les variations de permittivité et de conductivité diélectriques pour les tissus de la peau et du cerveau, en fonction de la fréquence, issus de cette base de données, pour des adultes.

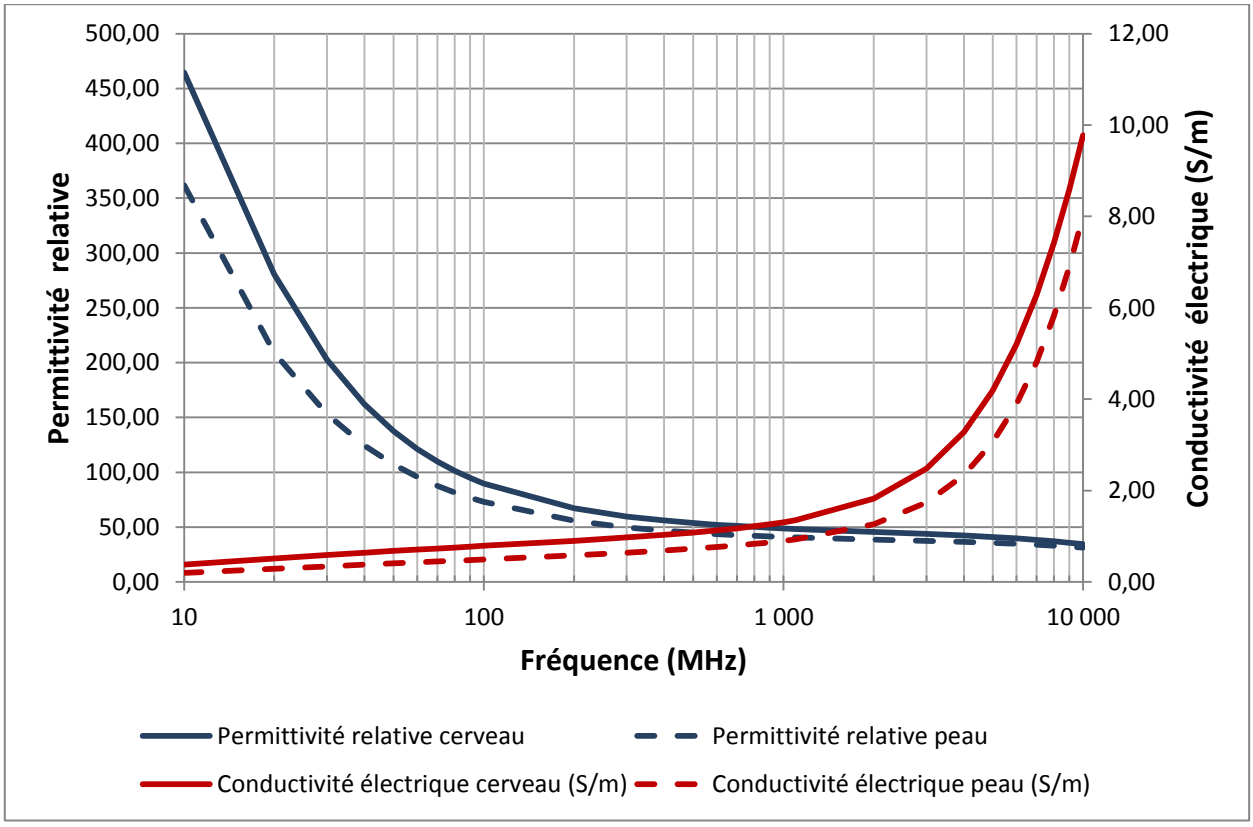


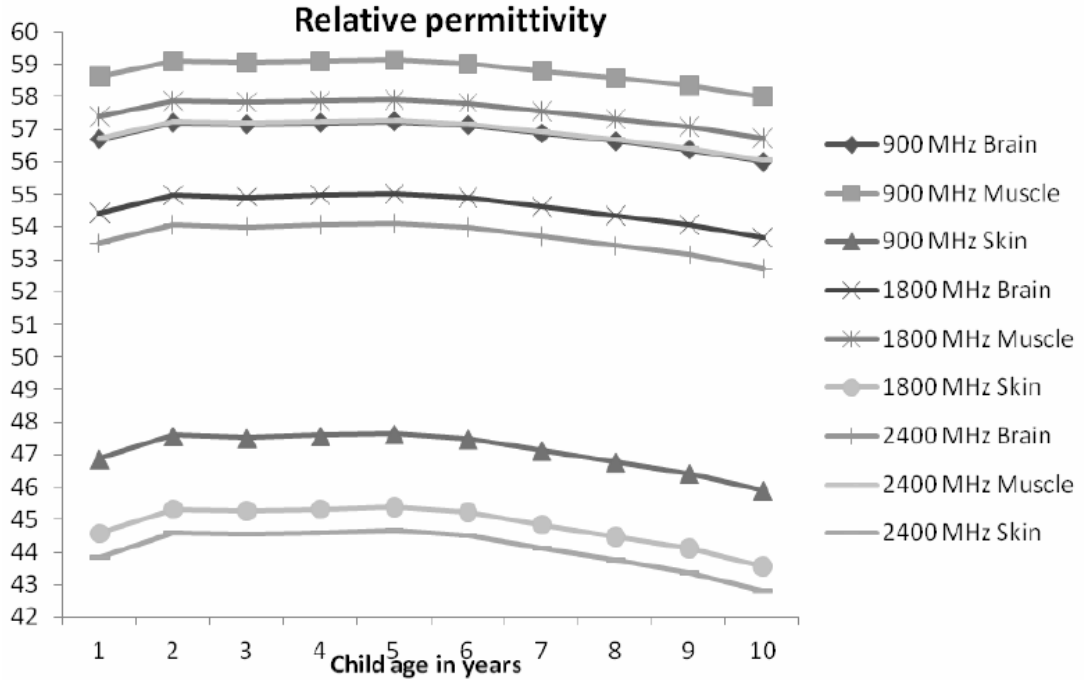
Figure 14 : propriétés diélectriques des tissus de la peau et du cerveau en fonction de la fréquence.

4.4.1.1 Variations des propriétés diélectriques avec l'âge

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

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

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



Source : Ibrani et al. 2011

Figure 15 : permittivité relative des tissus en fonction de l'âge de l'enfant et de la fréquence d'émission.

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

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

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

4.4.1.2 Impact des variations des propriétés diélectriques sur le DAS

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

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

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

Peyman *et al*. (2009) ont étudié la sensibilité du DAS aux variations des propriétés diélectriques de modèles d'enfants et d'adultes exposés à des *talkies-walkies* à 446 MHz (utilisation pour les modèles de tête de tissus de cochon à différents âges). Ces auteurs ont montré que les variations du $DAS_{10\,g}$[34] étaient inférieures à 10 % et ne reflétaient donc pas l'importance des variations des propriétés diélectriques avec l'âge pourtant observées. *In fine*, les DAS obtenus étaient compris dans les valeurs limites d'exposition recommandées (Icnirp). Ceci pourrait être lié au fait que le $DAS_{10\,g}$ résulte d'un moyennage spatial du DAS local, avec pour conséquence de diluer les effets de variations des propriétés diélectriques, en donnant plus de poids à l'influence de l'absorption dans la peau par rapport aux autres tissus (Peyman *et al*. 2009).
Ces résultats ont été complétés par des expérimentations plus récentes. Ainsi, Christ *et al*. (2010) ont évalué l'impact des variations des propriétés diélectriques en fonction de l'âge sur l'absorption locale et globale dans le crâne, en utilisant plusieurs modèles de tête humaine (âges : 3, 6, 7, 11, 34 et 38 ans) (Christ, Gosselin, Christopoulou, *et al.* 2010). Les valeurs de permittivité et de conductivité utilisées étaient celles de Peyman *et al.* (2009) et de Gabriel *et al*. (1996). Les simulations réalisées ont montré notamment que l'exposition à un téléphone mobile dans deux bandes de fréquences (à 900 et 1 800 MHz) de certaines régions du cerveau de jeunes enfants, telles que l'hypothalamus et l'hippocampe, pouvait dans ces conditions dépasser l'exposition des adultes d'un facteur 1,6 à 3,2. De même, l'exposition de la moelle osseuse des enfants pouvait dépasser celle des adultes de 10 dB (facteur 10), à cause de la grande diminution de la conductivité de ce tissu avec l'âge. Toujours dans cette étude, l'exposition des yeux des enfants a

[34] $DAS_{10\,g}$ = DAS évalué sur 10 grammes de tissus contigus, soit approximativement un cube de 2,2 cm de côté.

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

Tableau 11 : 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 *et al.*, 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 scenario pire-cas. À des fréquences plus basses, les propriétés diélectriques varient avec l'âge, en raison des modifications des structures cellulaires.
Peyman *et al.,* 2007	Tissu cérébrospinal de porc ; mesures *in vitro* et *in vivo*	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 *et al.,* 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 *et al.*, 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 *et al.,* 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

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

4.4.2.2 Exposition du crâne

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Tableau 12 : 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 *et al.,* 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 *et al.*, 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 *et al.,* 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 *et al.,* 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 *et al.,* 2006	Modèle morphométrique	850 et 1 850 MHz	-	Le DAS 1 g est plus élevé chez les enfants que chez les adultes.
Wiart *et al.,* 2005	Modèle morphométrique Modèle hétérogène (IRM)	-		Revue.
Hadjem *et al.,* 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 *et al.,* 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.
Wiart *et al.,* 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 *et al.,* 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 *et al.,* 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.
Christ *et al.,* 2010	Modèle anatomique haute résolution	-	6-8 ans	Augmentation du DAS avec la compression du pavillon de l'oreille par le téléphone.

4.4.2.3 Exposition de type « corps entier »

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Tableau 13 : études investiguant l'impact de la morphologie des enfants sur DAS « corps entier ».

Auteurs	Modèles utilisés	Âge des modèles d'enfant	Conclusions
Dimbylow *et al.,* 1997 Dimbylow *et al.,* 2002, Dimbylow *et al.,* 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 *et al.,* 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 *et al.*¸ 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 *et al.,* 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 *et al.,* 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 *et al.,* (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 *et al.,* 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 *et al.,* 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 *et al.,* 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 scenarios de type pire-cas.

4.4.3 Influence de la résonance sur l'exposition

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

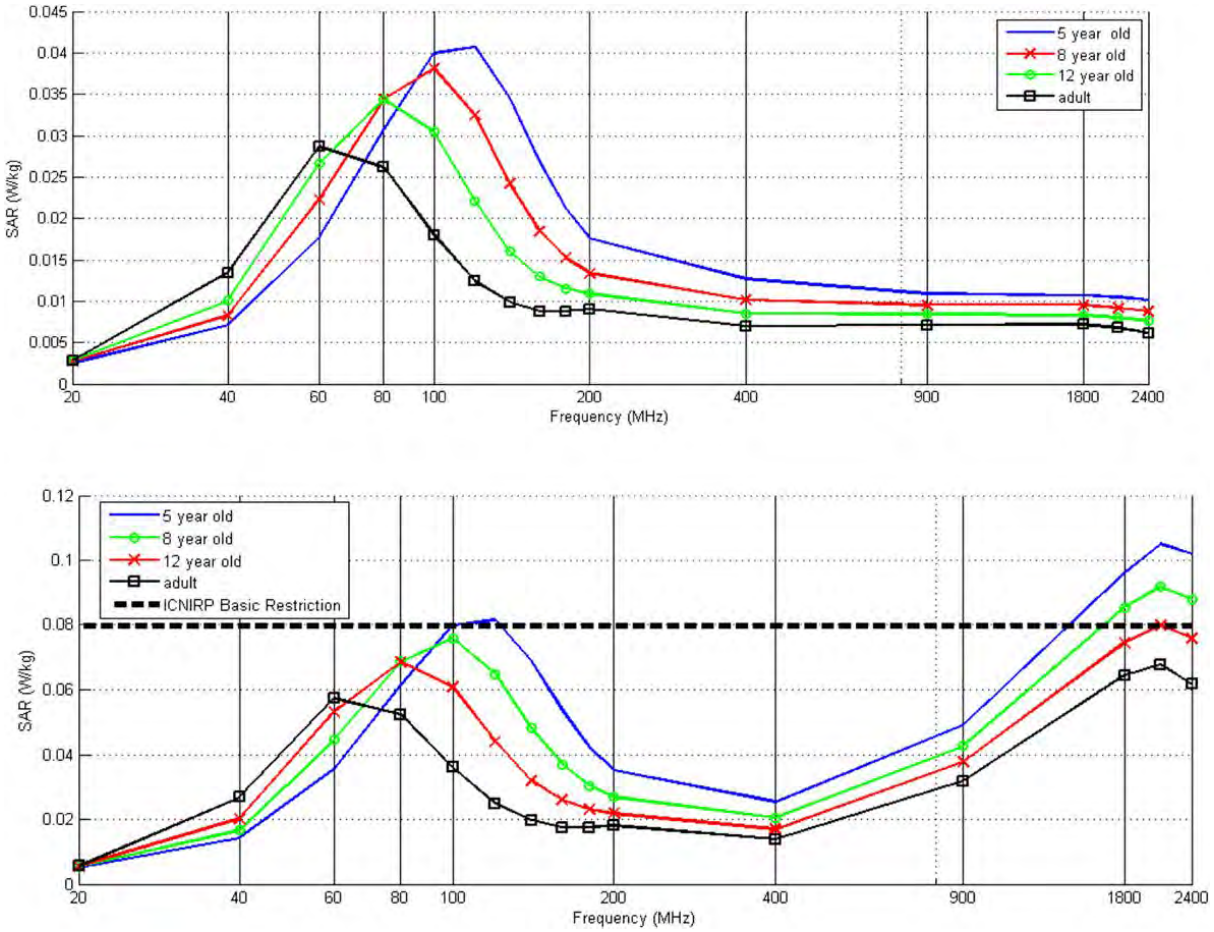


Figure 16 : résonance en fonction de la fréquence et de l'âge (Wiart *et al*. 2011).

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

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

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

Bien que la plupart des études recensées montrent que le modèle « SAM », notamment utilisé pour vérifier la conformité des téléphones mobiles par rapport aux valeurs limites d'exposition réglementaires (DAS_{10g}), est conservateur pour la détermination du DAS, y compris pour les modèles d'enfants, une grande partie d'entre elles met clairement en évidence une augmentation du DAS chez les plus jeunes enfants par rapport aux adultes, liée aux différences morphologiques et anatomiques. Des augmentations du DAS, notamment du DAS local, sont retrouvées pour les enfants par rapport aux adultes dans différents types de modèles, en particulier pour certains tissus comme la peau et les tissus cérébraux périphériques. Par ailleurs, les études ayant évalué le DAS « corps entier » rapportent des niveaux d'exposition plus élevés chez les enfants que chez les adultes, en particulier dans 2 gammes de fréquence : vers 100 MHz et autour de 1 à 4 GHz. Le DAS peut alors dépasser les restrictions de base de 40 % lorsque l'exposition est égale au niveau maximal autorisé pour les adultes (niveaux de référence). Ceci signifie que pour toute personne de taille inférieure à 1,30 m, les valeurs limites d'exposition réglementaires sont moins adaptées. La plupart des études rapportent enfin la grande variabilité des valeurs de DAS en fonction des caractéristiques morphologiques et anatomiques des modèles, mais aussi de la position des sources (téléphones mobiles notamment) par rapport à la tête. Les nouveaux usages des dispositifs de communication sans fil ainsi que les nouvelles formes de téléphones posent donc la question de la pertinence du modèle de fantôme « SAM » utilisé pour les mesures normatives.

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

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, et l'exposition à des facteurs environnementaux est susceptible d'interagir avec le développement des organes et des fonctions physiologiques. Par ailleurs, les enfants constituent une population spécifique concernant l'exposition aux radiofréquences. En effet, les enfants d'aujourd'hui sont potentiellement exposés aux appareils de communication 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, pointant ainsi l'importance d'envisager la possibilité d'effets sanitaires à long terme qui ne seraient pas décelés à la suite d'expositions aiguës.

Dès que l'on quitte le champ de l'expérimentation pour laquelle l'exposition aux radiofréquences peut être, du moins en théorie, parfaitement contrôlée, et que l'on cherche à interpréter des données d'observation telles qu'on peut les réunir dans une étude épidémiologique, l'exposition « réelle » des individus aux radiofréquences et, *a fortiori*, l'histoire de leur exposition, ne peut être, le plus souvent, mesurée au sens physique du terme mais « estimée » à partir de leur exposition actuelle ou passée à des sources identifiées de radiofréquences comme, par exemple, l'usage du téléphone mobile. Au-delà de l'impossibilité très générale de conclure sur la causalité d'une relation d'observation prise isolément, il s'agit là d'une limite importante de l'approche épidémiologique dont les conséquences pour l'interprétation des résultats concernant les enfants sont évoquées au chapitre 5.1.

La description de la méthodologie utilisée pour cette expertise est précisée au chapitre 5.2.

Enfin, les études scientifiques ayant analysé les effets potentiels des radiofréquences sur la santé ont été décrites, faisant figurer dans un premier temps les études portant sur l'Homme (études épidémiologiques et expérimentales) puis les études sur les modèles animaux (paragraphes 5.3 à 5.8).

5.1 Usage des outils de télécommunications mobiles et exposition aux radiofréquences

Dans les études épidémiologiques qui recherchent des associations entre l'exposition aux radiofréquences et des effets sur la santé, l'exposition peut être évaluée de plusieurs manières :

- par l'exposition aux radiofréquences, en utilisant des mesures de champs électromagnétiques chez l'individu, des exposimètres individuels ou des modélisations en fonction de l'adresse de l'individu (pour l'exposition aux antennes-relais) ;
- par l'exposition au téléphone mobile ou aux autres appareils électromagnétiques (téléphone mobile, tablette, Wi-Fi, jouets, veille-bébés, *etc.*), en recueillant l'évaluation quantitative de l'usage de ces appareils à l'aide de questionnaires.

Les études évaluant l'exposition aux radiofréquences par l'intermédiaire d'un questionnaire ne permettent de connaitre que les sources d'expositions connues des répondants, c'est-à-dire liées à leur propre usage. Or, il convient de considérer également l'exposition environnementale aux radiofréquences (liée aux antennes-relais, antennes de radiocommunication, *etc.*).

Si l'on restreint la connaissance de l'exposition au téléphone mobile durant une période donnée relativement courte (par exemple 24 h), il est possible de mesurer par dosimétrie le champ électromagnétique parallèlement au recueil des durées d'utilisation du téléphone à l'aide d'un auto-questionnaire d'usage. Cette situation est évidemment favorable lorsqu'il existe une forte corrélation entre les résultats quantitatifs (ou semi quantitatifs) obtenus car elle permet de « valider » l'emploi du questionnaire concernant l'usage comme « proxy » de l'exposition aux radiofréquences pour la recherche d'éventuelles associations avec des effets sanitaires.

Cependant, en pratique, chez les enfants de 8 à 12 ans et les adolescents (13 – 17 ans), la corrélation entre l'exposition aux radiofréquences et la durée d'utilisation du téléphone estimée par questionnaire auto-rapporté est faible (Thomas *et al*. 2008 et Heinrich *et al.* 2010), et la corrélation entre la durée d'utilisation fournie par les opérateurs et celle estimée par les utilisateurs est médiocre (voir paragraphe 4.2.3).

De plus, dès que l'on s'intéresse à la genèse d'effets chroniques potentiels des radiofréquences, on ne peut tenter que de reconstituer l'histoire de l'exposition aux sources, c'est à dire en pratique l'usage des outils de télécommunication mobile. L'information est obtenue généralement par questionnaire, rempli le plus souvent de façon rétrospective, interrogeant les usages passés pour obtenir une exposition « moyenne », voire en cherchant simplement une exposition « habituelle ». Une estimation quantitative de l'usage peut alors permettre la recherche d'éventuelles relations dose-effet, mais aucune validation directe de l'exposition n'est envisageable.

En règle générale, une exposition (même « parfaitement » estimée) peut conduire à une association indépendamment de l'existence d'un effet propre de l'exposition d'intérêt, généralement parce que des facteurs de confusion importants n'ont pas été pris en compte (*cf* encadré « Généralités sur le rôle des facteurs de confusion dans l'analyse de risques en épidémiologie »).

Généralités sur le rôle des facteurs de confusion dans l'analyse de risques en épidémiologie

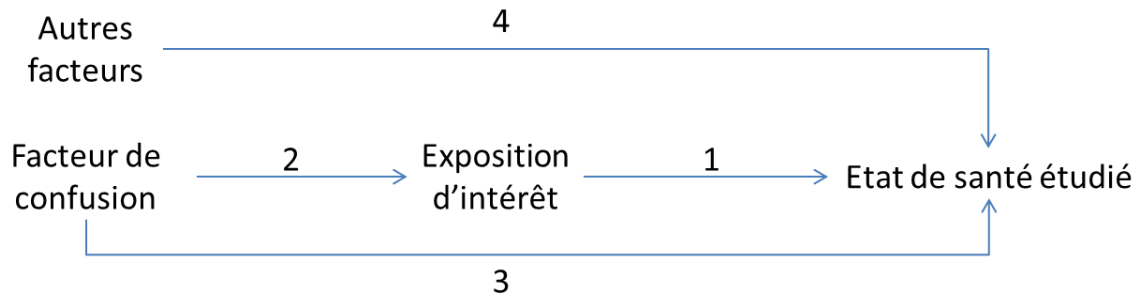


Figure 17 : schéma de causalité élémentaire illustrant un effet de confusion dans la relation entre l'exposition d'intérêt et l'état de santé.

La Figure 17 fait apparaître l'exposition d'intérêt comme cause de l'effet de santé étudié (flèche 1), parmi l'ensemble des causes possibles parmi lesquelles on distingue le sous ensemble de causes (ou facteurs) qui sont également associées à l'exposition (flèche 2). Ces facteurs sont appelés « facteurs de confusion » dans l'analyse du risque causé par l'exposition. Les autres facteurs causaux, non associés à l'exposition, n'ont d'après le schéma aucun effet (en dehors d'être facteur causal de l'état de santé) (flèche 4).

L'association observée directement entre l'exposition et l'état de santé résulte à la fois de l'effet causal direct (flèche 1) et aussi de l'effet causal indirect généré par les facteurs de confusion (combinaison des flèches 2 et 3). L'écart entre l'association mesurée directement et celle de l'effet causal direct recherché prend le nom de biais de confusion. Bien entendu, les effets créés par les facteurs causaux non associés à l'exposition d'intérêt ne jouent aucun rôle dans le biais de confusion et ils ne sont généralement pas étudiés ni même évoqués.

Ce schéma de causalité est le plus simple possible pour exprimer un biais de confusion associé à une exposition. Il peut évidemment être beaucoup plus complexe. Par exemple, la Figure 18 indique que la présence de l'état de santé modifie à son tour causalement l'intensité de l'exposition, effet de causalité inverse qui n'était en aucune façon permis initialement (flèche 1').

Une étude épidémiologique doit être en mesure de fournir des estimations non biaisées de l'association causale d'intérêt, c'est à dire ici de la relation 1, tenant compte ou non, selon le

schéma de causalité retenu, d'un effet de causalité inverse. La méthodologie statistique permettant d'atteindre ce but, au moins théoriquement, utilise les techniques dites d'ajustement.

Cependant, les données recueillies dans l'étude sont en règle générale insuffisantes pour deux grands types de raisons :

- seuls quelques facteurs de confusion ont effectivement été mesurés dans l'étude et peuvent de ce fait être pris en compte dans les ajustements. Certains, bien que connus, ne sont pas mesurés, d'autres, inconnus ne peuvent, de ce fait, n'être que négligés. L'hypothèse que la responsabilité des facteurs de confusion non mesurés et inconnus dans le biais de confusion est faible est absolument nécessaire pour que l'on puisse être assuré que l'association observée après ajustement soit proche de l'association causale. C'est en ce sens qu'il est dit couramment qu'une étude d'observation ne permet pas de montrer la causalité d'une association. La plausibilité d'un effet causal est donc matière à discussion qui ne peut être au bout du compte réglée qu'en faisant intervenir des connaissances extérieures à l'étude elle-même et en particulier des mécanismes biologiques qui pourraient être en cause. Néanmoins, une telle discussion peut être guidée par un raisonnement simple : le biais de confusion créé par un facteur dépend à la fois de l'intensité de son association avec l'exposition (flèche 2) et de l'intensité de son association avec l'état de santé étudié (flèche 3). Pour que ce biais soit important, il est nécessaire et suffisant que ces deux associations soient simultanément fortes. Le calcul permet d'établir les conditions que devrait remplir un facteur inconnu hypothétique qui pourrait à lui seul « expliquer » entièrement l'association observée après ajustement sur les facteurs connus et mesurés.
- Compte tenu du « design » de l'étude, les données recueillies ne permettent pas toujours d'estimer les paramètres du modèle causal nécessaires pour obtenir une estimation sans biais de l'effet causal étudié. Il est dit dans ce cas que le modèle est non identifiable. C'est en particulier le cas du modèle incluant un biais de causalité inverse à partir d'une étude transversale ne faisant à aucun moment intervenir le temps.

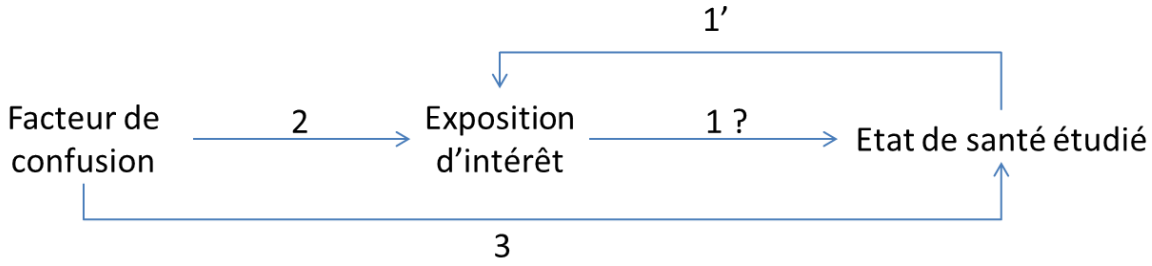


Figure 18 : schéma de causalité impliquant un biais de causalité inverse.

L'usage du téléphone mobile peut être considéré comme pouvant introduire un biais de confusion majeur pour l'association état sanitaire étudié et radiofréquences. Les effets sanitaires observés résultent-ils de l'exposition aux radiofréquences ou de l'exposition aux sources de radiofréquences ?

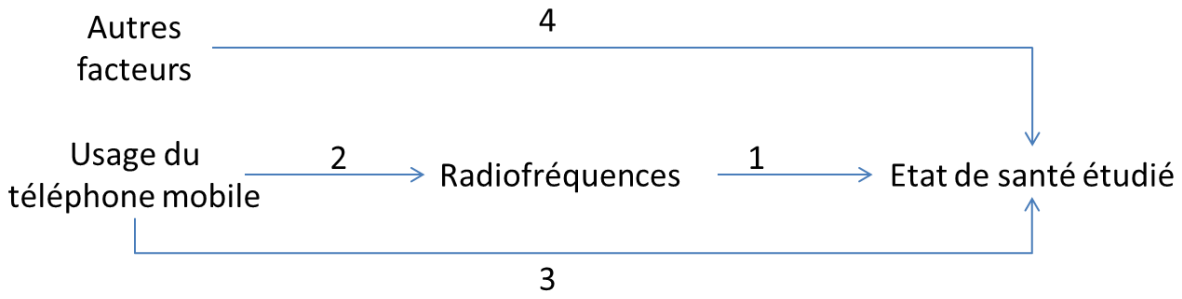


Figure 19 : schéma de causalité général étudié dans les études épidémiologiques.

Cette distinction peut ne pas être immédiatement perceptible aux yeux des scientifiques rompus à l'expérimentation pour lesquels seule l'exposition à l'agent considéré (ici les radiofréquences) défini par ses caractéristiques physiques doit être considérée. Dans quelle mesure l'analyse des risques associés à l'utilisation des sources peut-elle se substituer à l'analyse des risques associés aux radiofréquences correspondantes ? Il ne s'agit évidemment pas de donner une réponse en tout ou rien mais d'entamer une discussion qui, très rapidement, devra faire intervenir, en plus des résultats de l'étude elle-même, l'ensemble des connaissances disponibles et particulièrement celles fournies par l'expérimentation biologique. Dans le cas présent, les données disponibles concernent très majoritairement des publications s'intéressant à l'exposition au téléphone mobile, mais le raisonnement reste valable pour les autres sources de radiofréquences auxquelles peuvent être exposés les enfants : Wi-Fi, veille-bébés, jouets radiocommandés etc.

Par exemple, plusieurs études ont recherché une association entre l'exposition aux radiofréquences pendant la grossesse et l'apparition de troubles cognitifs pendant l'enfance. Leur approche épidémiologique a conduit à remplacer cette question à laquelle on ne peut fournir *a priori* aucun élément de réponse, par celle d'un éventuel effet sur l'enfant de l'usage du téléphone mobile par les futures mères tel qu'elles peuvent le rapporter par interrogatoire plusieurs années après leur grossesse. Une telle approche présente dans ce cas précis une limite évidente : l'exposition individuelle réelle du fœtus à l'agent physique est vraisemblablement mal estimée par la seule déclaration de l'usage du téléphone mobile par la mère, conduisant *a priori* à une sous-estimation de l'association, si elle existe, avec l'état de santé étudié, c'est à dire à une perte de puissance de l'étude. Le schéma de causalité de cette série d'études est illustré dans la Figure 20.

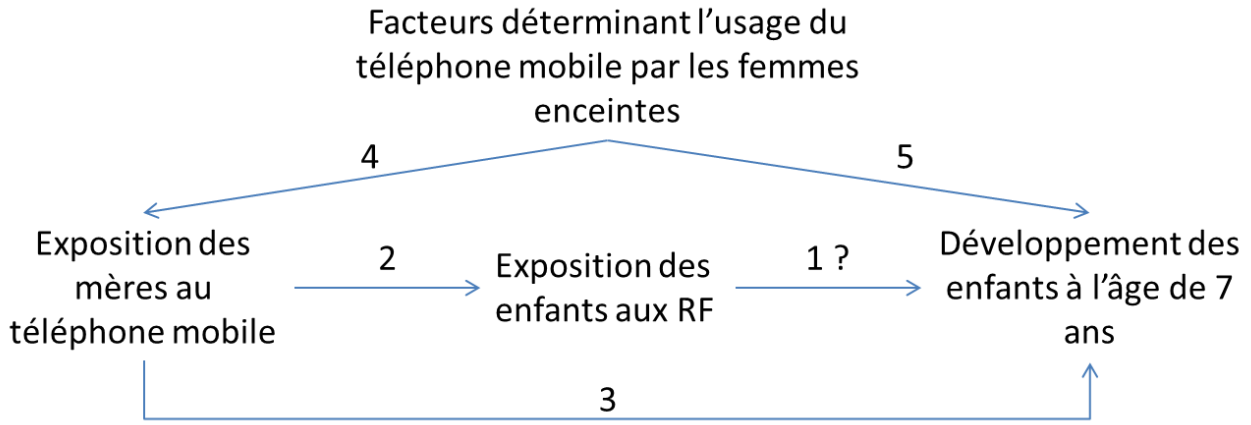


Figure 20 : schéma de causalité étudiée dans les études de Divan *et al*., 2008, 2010 et 2011.

Cette figure fait apparaître un élément supplémentaire par rapport à la Figure 19 : l'exposition des futures mères au téléphone mobile est associée causalement (*a priori* fortement) à l'exposition des enfants aux radiofréquences (flèche 2) et associée hypothétiquement causalement au développement de l'enfant (flèche 3). Dans un tel modèle, l'exposition des mères au téléphone joue un rôle de facteur de confusion pour l'association entre radiofréquences et développement de l'enfant au même titre que les autres facteurs de confusion indiqués sur le schéma par les flèches 4 et 5. Autrement dit, l'association observée entre l'exposition au téléphone mobile et le développement de l'enfant présente un biais de confusion pour l'estimation de l'association causale entre les radiofréquences et cet état de santé (flèche 1). Ce biais ne peut s'annuler que si l'exposition au téléphone mobile n'a aucun lien direct causal avec l'état de santé, c'est à dire si l'association représentée par la flèche 3 est supprimée. Ceci ne peut résulter que d'une hypothèse nouvelle qui, en général, ne peut pas être testée alors que ce biais peut être important dans certains cas particuliers. En effet, l'usage du téléphone mobile durant la grossesse peut être associé au développement ultérieur de l'enfant en dehors de tout effet des radiofréquences. Il peut par exemple témoigner de conditions familiales, psychologiques, sociales, *etc.,* qui pourraient être préjudiciables au développement du jeune enfant. Ce biais de confusion aurait d'autant plus de chance d'être important que l'effet étudié concerne lui-même des dimensions subjectives de la santé (symptômes généraux, comportement, bien être…) *a priori* fortement associées à ces conditions.

Cette analyse de causalité est particulièrement nécessaire lorsque l'on cherche à étudier les effets des radiofréquences sur le bien-être des enfants. Les résultats des études mettent en relation l'utilisation du téléphone mobile et des effets sur le bien-être des enfants, sans qu'il soit possible de différencier avec certitude l'effet des radiofréquences de l'effet de l'utilisation du téléphone mobile. En effet, le biais de confusion ne peut s'annuler que si l'exposition au téléphone mobile n'a aucun lien direct causal avec le bien-être des enfants, ce qui n'est pas le cas. Par ailleurs, l'usage du téléphone peut n'être qu'un indicateur d'altération du bien-être (tout comme la santé mentale, annexe 7) et non une cause, c'est-à-dire qu'il est envisageable qu'un adolescent en situation de mal-être téléphone davantage qu'un adolescent qui n'en a pas.

Depuis quelques années, plusieurs études se sont intéressées aux relations entre l'usage problématique du téléphone mobile par les adolescents (par exemple après leur coucher) et l'existence de troubles relevant de la santé mentale comme par exemple la dépression. En poursuivant l'analyse faite précédemment, on se trouve face à un cas extrême où le facteur d'intérêt et le facteur de confusion sont échangés : l'association recherchée ne concerne plus l'effet des radiofréquences mais bien celui du comportement des sujets comme déterminant (ou témoin) des troubles psychiques. Ces études n'apportent en conséquence aucune information sur les effets de l'exposition des adolescents aux radiofréquences et pourraient ne pas être prises en compte dans ce rapport. Elles ont paru cependant importantes au collectif d'experts mobilisé pour cette expertise qui a décidé de les mentionner en annexe 7.

D'une façon générale, la prise en compte de facteurs de confusion de nature psychosociale dans l'analyse du risque associé à l'usage des outils mobiles de communication représente un critère important pour déterminer le crédit devant être accordé aux résultats des études et à leur interprétation.

5.2 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 (*cf.* Figure 21, Figure 22, Figure 23)

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, notamment des études épidémiologiques transversales. Cependant, rappelons que les études épidémiologiques 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 décrivant des 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 ou physiologique 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.

Les études utilisant des modèles *in vitro*, réalisées dans une finalité de recherche de mécanismes biologiques explicatifs d'effets sanitaires, ont été examinées en détail dans le rapport de l'Anses publié en 2013 et n'ont pas été rappelées dans ce rapport.

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

5.2.1 Étude des effets des radiofréquences sur des modèles animaux (Figure 21)

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

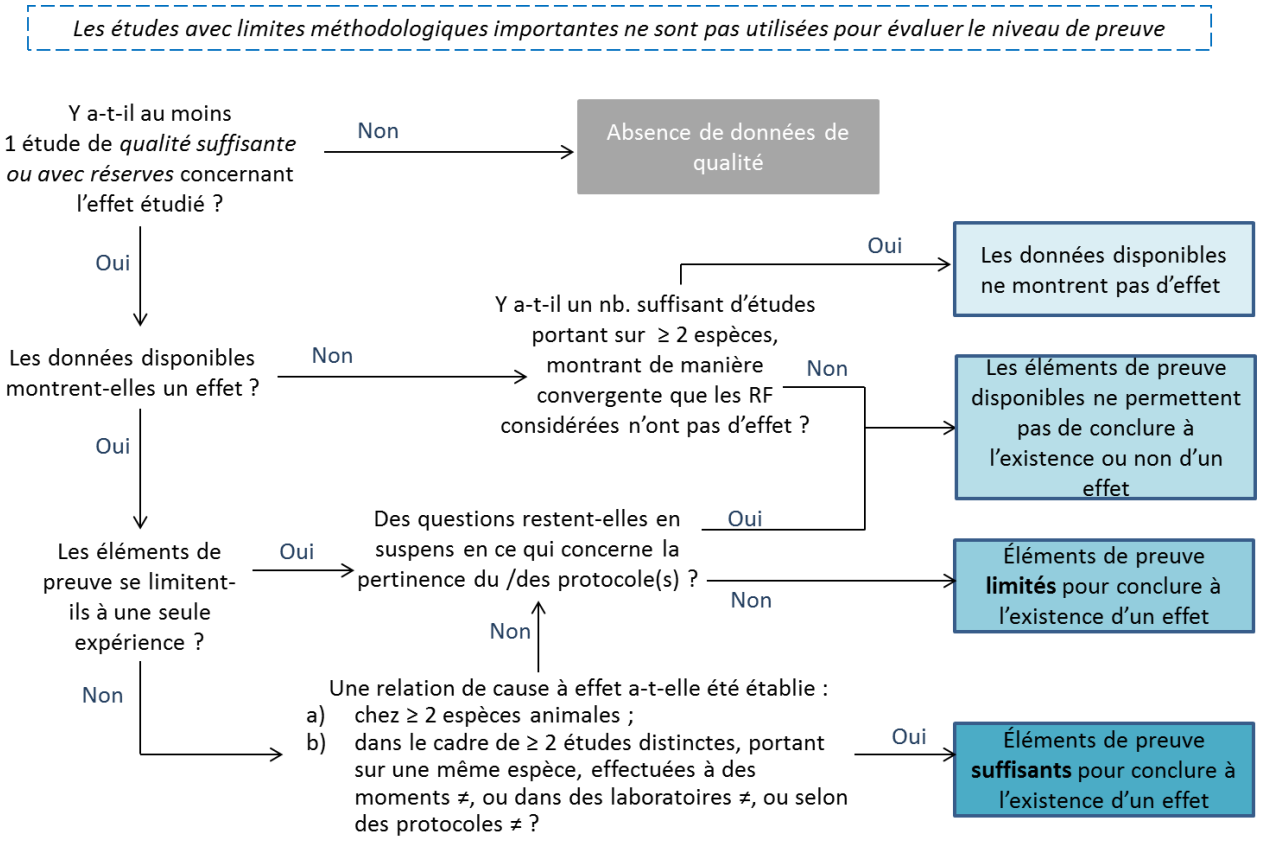


Figure 21 : logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études sur les modèles animaux.

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

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

Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet : les données disponibles laissent penser qu'il existe un effet, mais elles sont limitées et ne permettent pas de faire une évaluation définitive parce que : a) les éléments de preuve de l'effet se limitent à une seule expérience mais dont le protocole a été jugé de bonne qualité sans limites méthodologiques majeures; ou b) plusieurs études de bonne qualité montrent des résultats convergents mais des questions restent en suspens en ce qui concerne la pertinence du protocole, la conduite ou l'interprétation des données ; ou l'incidence de l'effet observé peut être naturellement élevée chez certaines souches.

Éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet : les études ne peuvent pas être interprétées comme prouvant la présence ou l'absence de l'effet étudié, parce que : a) il n'y a qu'une seule étude qui ne montre pas d'effet b) il y a plusieurs

études qui ne montre pas d'effet mais elles n'ont pas été effectuées chez 2 espèces animales au moins, ou bien c) elles présentent d'importantes faiblesses d'ordre qualitatif ou quantitatif.

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

5.2.2 Étude des effets des radiofréquences chez l'enfant (Figure 22)

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

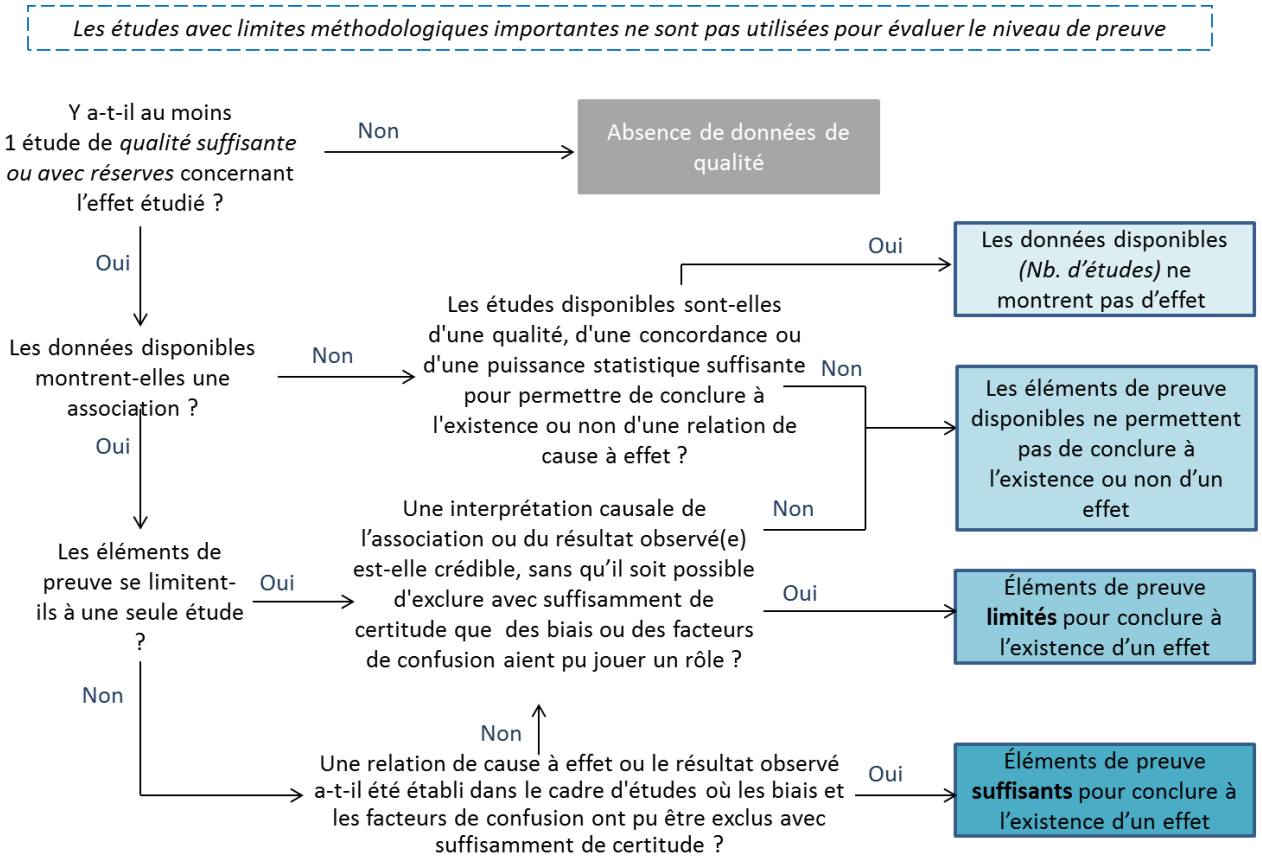


Figure 22 : logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études épidémiologiques.

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

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

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

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

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

5.2.3 Évaluation globale (Figure 23)

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

Chaque effet étudié est classé dans l'une des catégories ci-après (fortement inspirées de celles utilisées pour étudier la cancérogénicité d'un agent dans les monographies du Circ). Le classement d'un effet résulte d'un processus d'évaluation collective et s'appuie sur les éléments d'appréciation extraits d'études sur l'enfant, l'animal de laboratoire et d'autres informations pertinentes (mécanismes d'action par exemple).

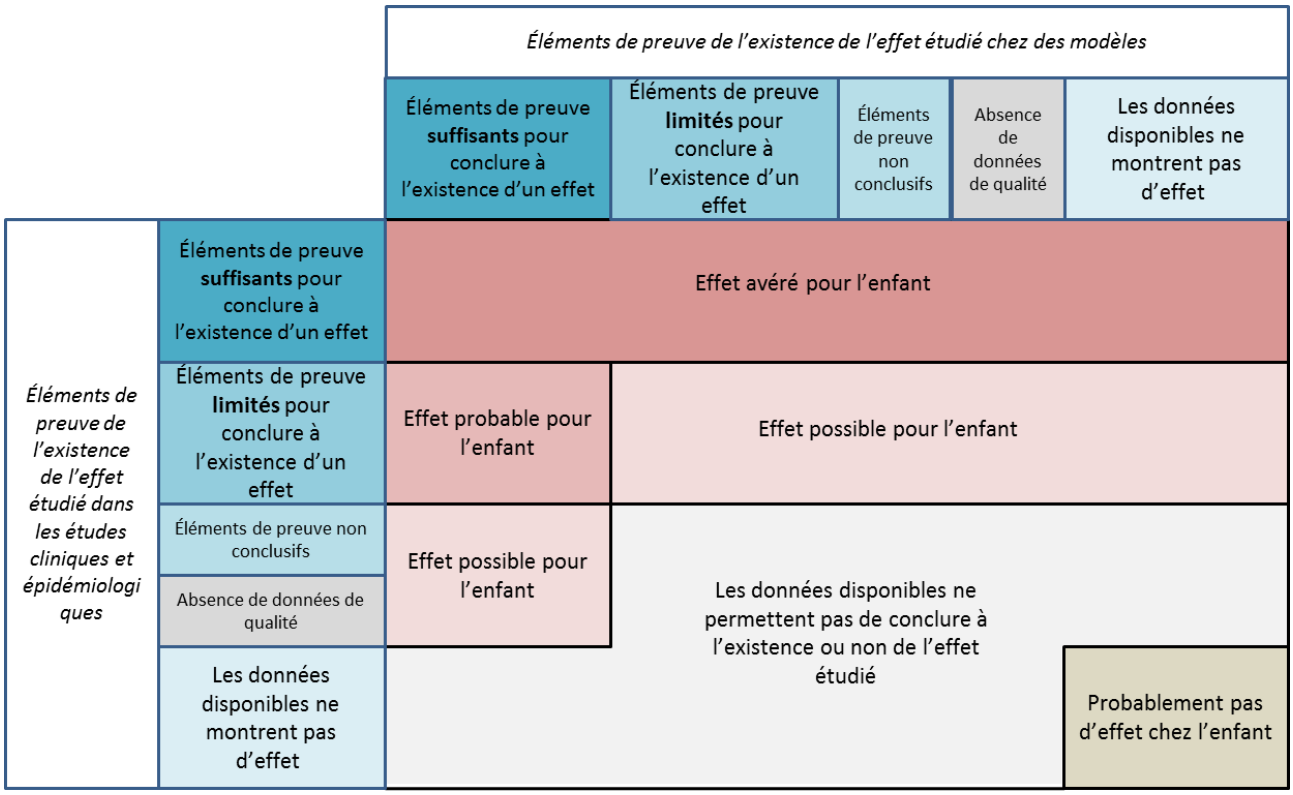


Figure 23 : évaluation du niveau de preuve pour un effet donné en fonction des éléments de preuve en faveur de l'existence d'un effet.

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'enfant. Exceptionnellement, un effet peut être placé dans cette catégorie lorsque les éléments de preuve concernant l'effet pour l'enfant 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 *limités* en faveur de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques 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. Ces effets sont alors 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 *limités* en faveur de l'existence de l'effet étudié 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 que les éléments de preuve sont inexistants dans les études cliniques et épidémiologiques et que les éléments de preuve sont *suffisants* pour l'animal de laboratoire et que de fortes présomptions que l'effet étudié s'effectue par un mécanisme qui fonctionne également chez l'enfant.

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

b- Effet possible pour l'enfant

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

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

Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet des radiofréquences sur l'effet sanitaire étudié.

Cette catégorie comprend essentiellement les effets étudiés pour lesquels :

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

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

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

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

Probablement pas d'effet pour l'enfant

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

Dans certains cas, peuvent être classés dans ce groupe des effets pour lesquels les éléments de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet ou que l'on ne dispose pas de données de qualité dans les études épidémiologiques ou cliniques, mais pour lesquels on dispose

d'éléments de preuve suggérant *une absence d'effet* chez l'animal de laboratoire, constamment et fortement corroborées par une large gamme de données mécanistiques et d'autres données pertinentes.

Pour chaque effet, les conclusions du rapport de l'Anses publié en 2013 ont été rappelées.

5.3 Rappels physiologiques sur le développement de l'enfant

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

5.3.1 Le développement cérébral chez l'Homme

5.3.1.1 Généralités

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

5.3.1.2 Les principales étapes du développement cérébral (Figure 24)

<u>Période prénatale</u>

Le processus neuro-ontogénétique commence à 2-3 semaines d'âge gestationnel avec le repliement (« folding ») et la fusion de l'ectoderme pour former le tube neural. À 5-6 semaines de gestation, les neuroblastes ou précurseurs neuronaux prolifèrent rapidement dans la zone ventriculaire qui bordent les ventricules cérébraux. La migration neuronale présente un pic entre la 12^{e} et la 20^{e}semaine de gestation et est terminée entre la 26^{e} et la 29^{e} semaine de gestation. Les axones et dendrites des neurones commencent à s'étendre et à partir de la 5^{e} semaine de gestation et forment un réseau primitif fonctionnel. À 32 semaines, le cortex est déjà constitué des

diverses couches contenant les principaux systèmes de neurotransmetteurs, une diversité de cellules gliales et différents types de neurones. L'arborisation dendritique et la synaptogenèse s'accélèrent au 3e trimestre de gestation pour produire un épaississement du cortex (Huttenlocher & Dabholkar 1997), ce qui coïncide avec l'apparition des gyri et sulci corticaux. La 34e semaine de gestation marque l'arrivée du pic de la synaptogenèse pendant laquelle environ 40 000 nouvelles synapses sont formées chaque seconde. Ce processus continue jusqu'au début de la vie postnatale (*cf.* Figure 24). Le nombre de neurones est le plus élevé à 28 semaines de gestation et plus de la moitié seront éliminés par apoptose d'ici la fin de l'adolescence (Tau & Peterson 2010).

Période postnatale

À la naissance, le cerveau du nouveau-né de 2-4 semaines représente environ 36 % de sa taille adulte et grandit pour atteindre 70 % à 1 an et 80 % à 2 ans de sa taille adulte (Knickmeyer *et al.* 2008). Cette croissance est majoritairement due à l'expansion de la glie et à la myélinisation, même si la neurogénèse et la migration neuronale sont encore présentes. Cette période est caractérisée par des changements importants de la structure et de la fonction cérébrale. Bien que la taille du cerveau n'augmente que de 10 % environ entre l'âge de 2 et 5 ans, la myélinisation et le remodelage synaptique sont encore très actifs. Lenroot *et al.* (2007) montrent que le cerveau atteint 95 % de sa taille adulte vers l'âge de 6 ans avec un pic de volume de matière grise à 10,5 ans pour les filles et 14,5 ans pour les garçons. Ainsi, au cours de l'enfance et jusqu'à l'adolescence, les circuits neuronaux continuent à se modeler en parallèle avec la formation de la myéline, la maturation du métabolisme cérébral (voir paragraphe 5.3.1.4) et l'acquisition des fonctions cognitives (voir paragraphe 5.3.1.6).

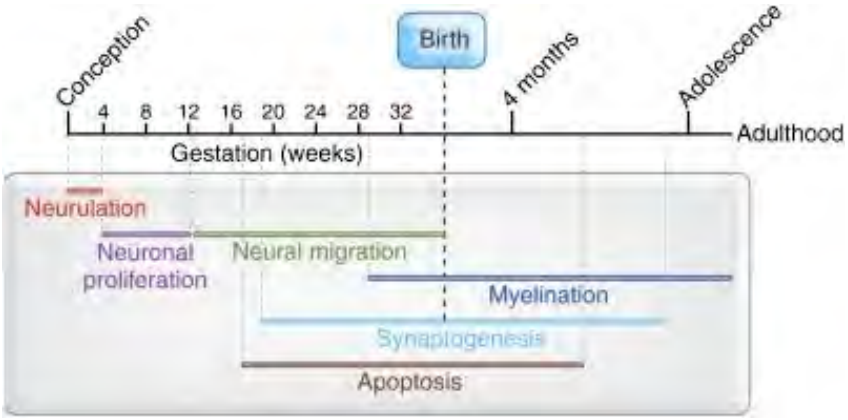


Figure 24 : décours temporel des évènements majeurs du développement cérébral. Image de Giedd (1999) dans la revue de Tau *and* Peterson 2010.

5.3.1.3 Le développement structural

La matière grise

Le développement cortical de la matière grise suit une séquence de maturation fonctionnelle hétérogène qui présente des vitesses différentes de maturation (Gogtay & Thompson 2010) (*cf.* Figure 25). En premier se développent les cortex primaires visuels et sensorimoteurs le long des pôles frontal et occipital puis le reste du cortex se développe dans une direction pariétale vers frontale. Le cortex temporal supérieur, qui contient les aires associatives intégrant les informations de plusieurs modalités sensorielles se développe en dernier (Gogtay et al. 2004). Par exemple, le volume de matière grise dans le cortex occipital présente un pic rapidement après la naissance et est presque entièrement mature à la fin de l'enfance (Gogtay & Thompson 2010). En revanche, le volume de la matière grise du cortex préfrontal atteint un pic vers l'âge de 9 ans puis décline pour atteindre sa taille finale à la fin de l'adolescence voire chez l'adulte jeune (Petanjek *et al.* 2011). Sowell *et al.*, montrent que la croissance locale cérébrale est d'environ 0,4 – 1,5 mm de tissu par an entre l'âge de 5 et 11 ans : elle est la plus marquée dans les régions frontales et occipitales

(Sowell *et al*., 2004a, et 2004b). De même, le développement de la synaptogenèse qui est corrélée au volume de matière grise (Figure 26C) dépend des régions corticales et atteint un pic (150 % de la valeur adulte) dans le cortex visuel primaire entre 4 et 12 mois, alors que dans le cortex préfrontal ce pic survient vers 8 mois et se poursuit la 2e année (Tau & Peterson 2010).

Ainsi, le volume de matière grise présente une trajectoire développementale qui a la forme d'un U inversé (*cf*. Figure 26A).

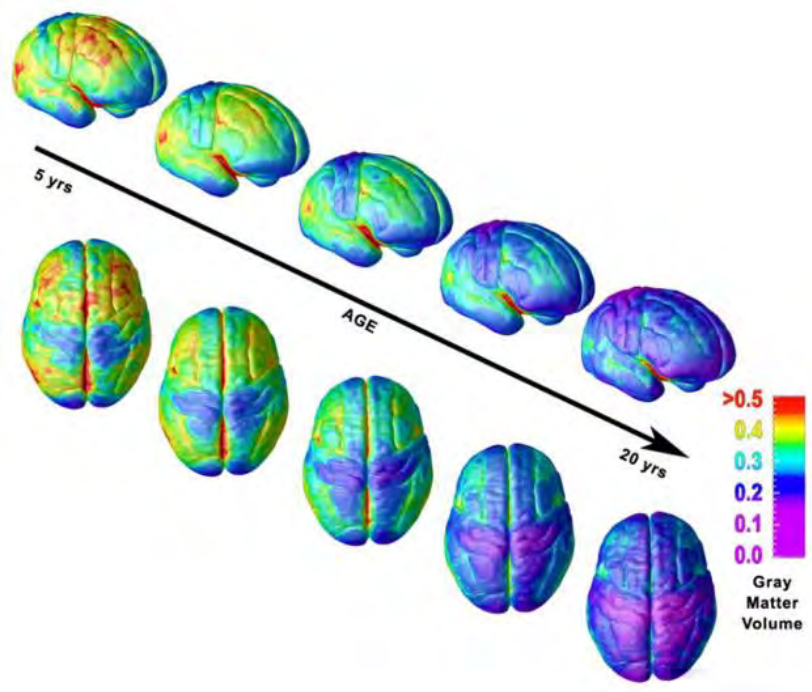


Figure 25 : maturation régionale de l'épaisseur du cortex : âge 4 -21 ans.

Vues du dessus et vues latérales de la maturation de la matière grise sur la surface corticale. La barre de légende à droite montre une représentation en couleur des unités de volume de matière grise (Lenroot & Giedd 2006).

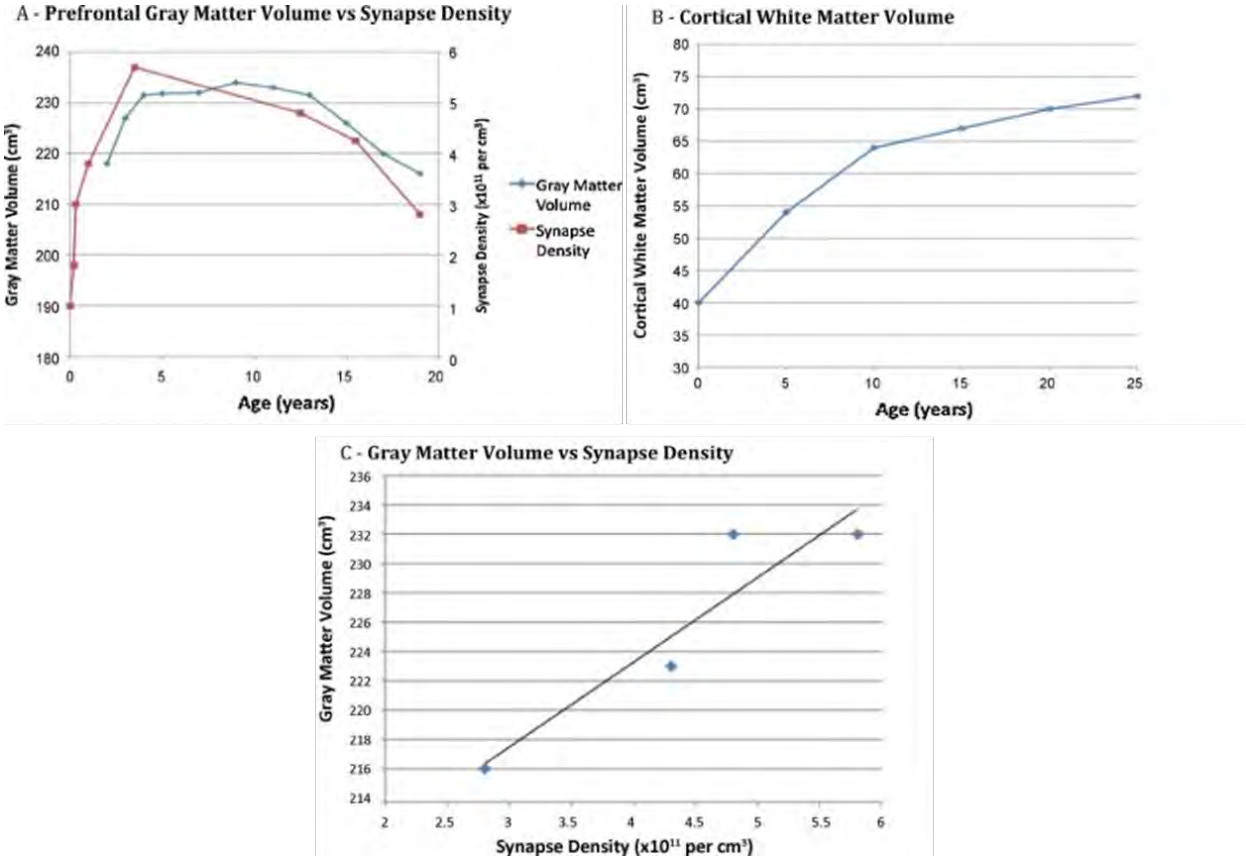


Figure 26 : volumes de matières grise et blanche et densité synaptique en fonction de l'âge.

(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 absolus 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/épines 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 visualisable entre la 20e et 28e semaine de gestation, d'abord dans les régions sous-corticales, puis plus tard dans les régions corticales. La myélinogenèse est très active dans la 1ère année de vie postnatale : les cellules gliales augmentent fortement en taille et en nombre en fonction des régions cérébrales avec les voies sensorielles qui se « myélinisent » en 1er, puis les voies motrices et ensuite les aires associatives. Enfin, au sein d'un circuit fonctionnel, ce sont les structures sous-corticales qui se « myélinisent » en 1er puis les aires corticales (Tau & Peterson 2010). Des études en IRM morphologique ont montré que l'apparence générale des structures est similaire à celle de l'adulte vers l'âge de 2 ans et que tous les tractus majeurs de fibres peuvent être observés à 3 ans (Matsuzawa *et al*. 2001). Contrairement à la matière grise, le volume de la matière blanche augmente tout au long de l'enfance et de l'adolescence jusqu'à l'âge adulte, en particulier dans les régions frontales (Giedd *et al*. 1999, Lenroot *et al.* 2007) ; (Figure 26B, Figure 27). Une caractéristique importante plus récemment découverte est que la myéline, non seulement maximise la vitesse de transmission de l'influx nerveux, mais aussi module le *timing* et la synchronisation des profils de décharges des neurones qui permet la création de réseaux fonctionnels (Giedd & Rapoport 2010).

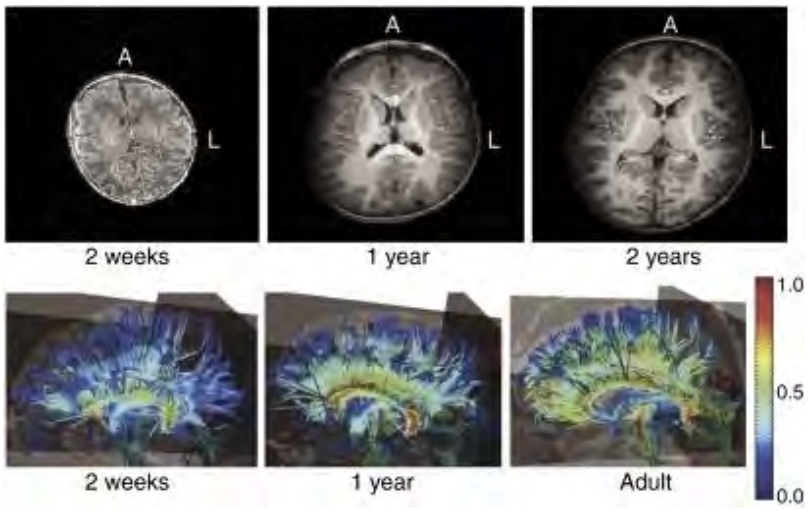


Figure 27 : myélinisation au cours du développement.

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

5.3.1.4 Le développement de la barrière hématoencéphalique (BHE)

Rappels et définitions

Le fonctionnement normal du cerveau nécessite un environnement contrôlé autour des cellules nerveuses. Ce contrôle est obtenu non seulement par une protection mécanique, comme la boite crânienne ou les méninges qui protègent le cerveau des agressions physiques, mais aussi par le strict contrôle des concentrations en solutés dans le tissu cérébral, qui permettent le fonctionnement normal des cellules cérébrales. Comme le sang fournit au cerveau tous ses nutriments, une interface sélective existe entre le cerveau et le sang : la barrière hématoencéphalique. Celle-ci maintient l'homéostasie des fluides extracellulaires du cerveau par un prélèvement sélectif des nutriments de la circulation sanguine, mais aussi par l'efflux des déchets métaboliques et des molécules toxiques issus du sang. La BHE est donc une barrière cellulaire composée essentiellement de cellules endothéliales qui forment les capillaires cérébraux

et entourée par une membrane basale contenant des péricytes (cellules ayant un phénotype muscle lisse) en contact étroit avec les cellules nerveuses comme les neurones ou les astrocytes (Abbott *et al*., 2010). La caractéristique des cellules endothéliales est la présence de jonctions serrées entre les cellules qui réduit fortement la diffusion passive de substances : elles forment une barrière physique permettant aux cellules endothéliales de contrôler finement le passage des molécules et substances variées. Les péricytes, quant-à-eux, régulent les fonctions de la BHE. Les astrocytes peuvent être impliqués dans le développement et le maintien de la BHE. La BHE est absente dans un petit nombre de structures cérébrales (7 au total, telles que l'éminence médiane et l'hypothalamus) pour lesquelles un accès non limité au compartiment sanguin est nécessaire à leur fonctionnement.

Le passage des (macro)molécules entre le sang et le cerveau, au travers de la BHE, fait intervenir plusieurs systèmes de transport en fonction de la taille, de la liposolubilité, de la structure ou encore de la capacité de ces molécules à se lier à des récepteurs membranaires spécifiques. On distingue ainsi :

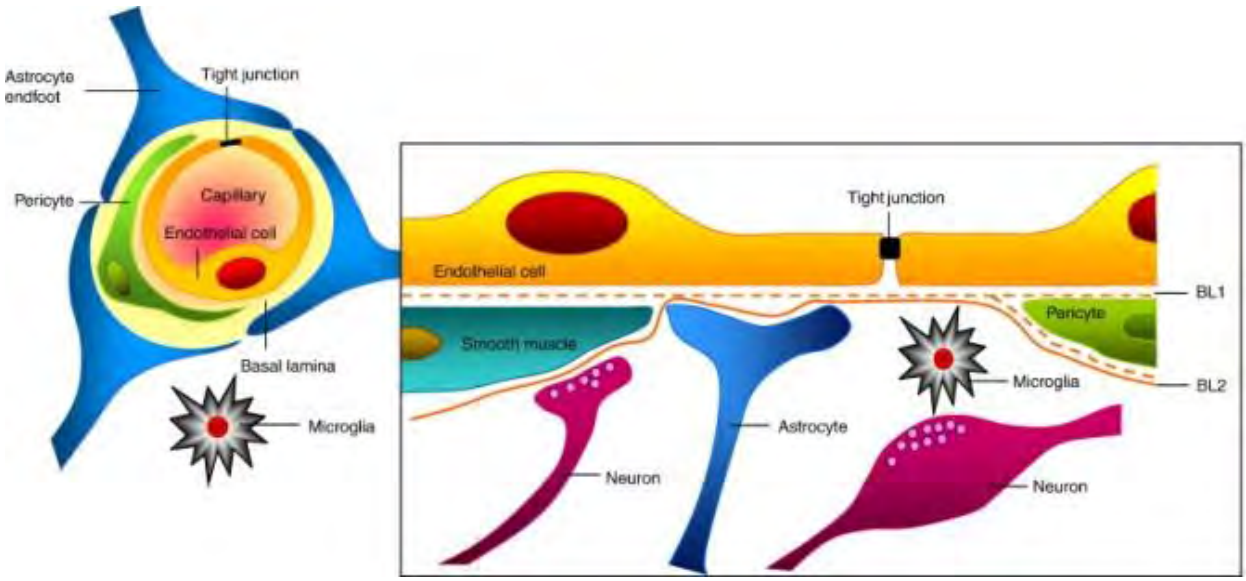
1- la diffusion passive, qui concerne les molécules très liposolubles ;

2- le transport ABC (*ATP binding cassette*), qui permet d'éliminer les substances contre un gradient de concentration (transport actif, fonction de détoxification, neuroprotection) ;

3- le système SLC (*solute carrier*), uni ou bidirectionnel, qui correspond à une famille de transporteurs en charge de fournir au cerveau ses nutriments comme le glucose, les nucléosides ou les acides aminés, mais qui peut aussi plus largement transporter des agents chimiques (anioniques ou cationiques), des stéroïdes, ou encore certains médicaments (anti-inflammatoires non stéroïdiens, antiépileptiques) ;

4- les molécules de gros poids moléculaire comme les protéines qui traversent la BHE *via* des récepteurs spécifiques sur la membrane des cellules endothéliales (Abbott *et al.,* 2010).

Enfin, des altérations de la BHE ont été décrites dans de nombreux états pathologiques comme les maladies auto-immunes (sclérose en plaques), les pathologies infectieuses (méningites, paludisme, SIDA), mais aussi au cours de l'ischémie cérébrale, de l'hypertension, des traumatismes, ou encore dans certaines tumeurs cérébrales.



A

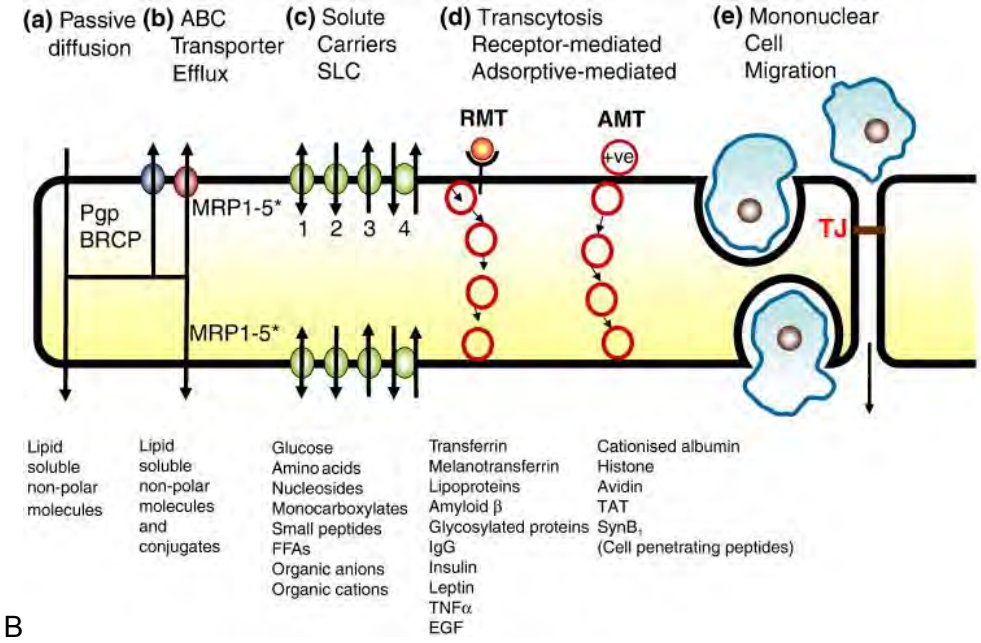


Figure 28 : (A) les différents composants cellulaires de la barrière hématoencéphalique et leurs associations (B) les voies de transport au travers de la BHE. À partir d'Abbott *et al*. (2010).

Le développement

Une croyance très largement répandue est celle qui consiste à dire que chez l'embryon et le nouveau-né, la BHE est immature et/ou perméable (*leaky*), ce qui rendrait le cerveau plus vulnérable aux substances ou toxines pénétrant dans la circulation fœtale en provenance de la circulation maternelle. En réalité, de très nombreuses études à ce sujet ont conduit à des résultats controversés, utilisant des techniques très variées ciblant l'un ou l'autre aspect de la fonctionnalité de la BHE, et ce depuis plus d'un siècle. Des revues récentes ont fait le point sur ces travaux et ont souligné que de nombreux mécanismes de l'adulte, incluant les jonctions serrées, sont présentes dans le cerveau embryonnaire et que même certains transporteurs sont plus actifs pendant le développement que chez l'adulte, correspondant aux besoins spécifiques du cerveau immature (Saunders *et al*. 2012, 2014). De plus, certains mécanismes présents chez l'embryon ne le sont pas chez l'adulte. Ainsi, le cerveau se développe dans un environnement interne bien contrôlé. Les caractéristiques physiques des éléments structuraux de la BHE (*i.e.,* cellules endothéliales, péricytes, membrane basale) qui suivent la formation des vaisseaux cérébraux (angiogenèse) sont présentes et fonctionnelles très tôt au cours de l'embryogenèse. C'est le cas par exemple des jonctions serrées au niveau des cellules endothéliales, qui sont fonctionnelles dès que les vaisseaux sanguins envahissent le cerveau, soit 10 - 11 jours post-conception chez le rat et la souris (*e.g.*, rev Abbott *et al*. 2010 ; Saunders *et al*., 2012). Chez l'Homme, l'imperméabilité au colorant bleu trypan serait comparable à l'adulte dès le début de 2^{e} trimestre de gestation. De même, les mécanismes de transport au niveau des interfaces sang-cerveau au cours du développement, qui déterminent la composition de l'environnement interne du cerveau et en apportent les nutriments essentiels pour la croissance et la différentiation cérébrale, sont fonctionnels dans le cerveau fœtal et néonatal, avec pour certains de ces mécanismes des caractéristiques propres au développement. C'est le cas par exemple de l'entrée de plusieurs acides aminés, plus importante dans le cerveau immature que chez l'adulte, qui reflète des besoins métaboliques augmentés du cerveau en développement (Saunders *et al.,* 2012). Ceci a été complété par la mise en évidence très récemment de la présence et de l'expression de très nombreux transporteurs au niveau de la BHE dans le cerveau immature de la souris, montrant des profils d'expressions variables en fonction du type de transporteurs et de l'âge (Daneman *et al.,* 2010). Ainsi, si les caractéristiques de la BHE au cours du développement sont différentes de

celles de l'adulte, elles reflètent les besoins physiologiques caractéristiques de l'âge. Le terme « *leakiness* », ou fuite de la BHE, chez l'embryon, ne semble plus aujourd'hui approprié, le terme d'immaturité semble l'être beaucoup plus. Mais ce dernier fait plutôt référence aux différences liées aux besoins et particularités du cerveau immature par rapport au cerveau adulte, plutôt qu'à une non-fonctionnalité de la BHE par rapport à l'adulte (Engelhardt et Liebner, 2014). Cependant, les vaisseaux sanguins immatures sont plus fragiles que ceux de l'adulte. Il faut donc considérer que l'ensemble de ces caractéristiques (vaisseaux, BHE) pourraient rendre le cerveau immature plus vulnérable aux médicaments, toxines ou conditions pathologiques, contribuant à un dommage cérébral ou des altérations neurologiques.

5.3.1.5 Développement de l'activité fonctionnelle cérébrale (consommation cérébrale de glucose et d'O_2 et débit sanguin cérébral)

Les modifications neuroanatomiques au cours du développement sont aussi observables au niveau de l'activité fonctionnelle cérébrale *in vivo* mesurée par la consommation cérébrale de glucose (CMRglc) en tomographie d'émission de positrons (TEP). Cependant, cette méthode implique l'injection d'un médicament radiopharmaceutique, le ^{18}F-fluorodésoxyglucose. Elle a pu être utilisée dans une population clinique pédiatrique ne présentant pas d'altération neurologique majeure (Chugani & Phelps 1986, Chugani *et al*. 1987). Pendant la 1ère semaine de vie postnatale, la consommation cérébrale de glucose est plus élevée dans le cortex sensorimoteur, le thalamus, le tronc cérébral et le cervelet. À 3 mois, une augmentation de la consommation cérébrale de glucose très importante est observée dans les cortex pariétal, temporal et occipital, les ganglions de la base et le cervelet, alors qu'une telle augmentation n'est pas retrouvée dans les cortex frontal et occipital dorsolatéral avant l'âge de 8 - 9 mois. Le métabolisme basal du glucose continue à augmenter après la 1ère année avec un pic atteignant 150-200 % des taux de l'adulte aux alentours de 4-5 ans (Figure 29, Figure 31) (Chugani & Phelps 1986, Chugani *et al*. 1987). Ce métabolisme élevé reflète probablement la croissance colossale des neurones et de la glie et donc l'accroissement des besoins métaboliques nécessaires à la myélinogenèse, au remodelage synaptique et aux processus d'élimination. Ensuite le phénomène de régression est également observable et les taux de métabolisme cérébral diminuent progressivement à partir de l'âge de 9-10 ans pour atteindre les taux de l'adulte vers 16-18 ans (Chugani *et al*. 1987).

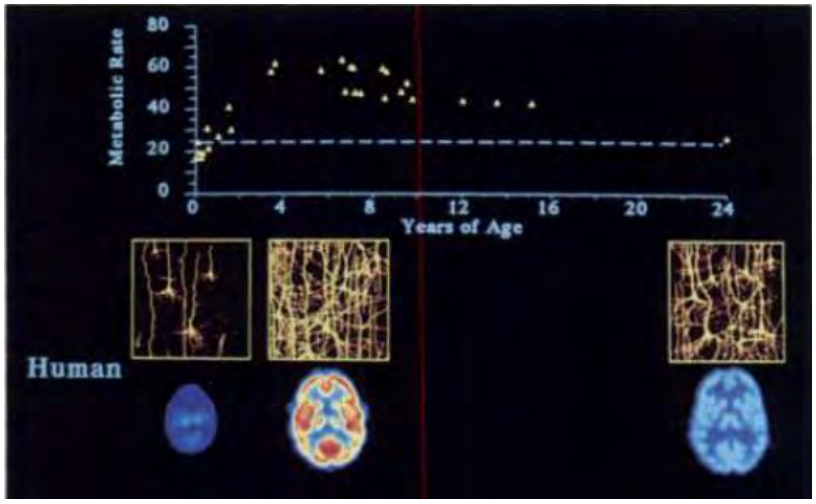


Figure 29 : décours temporel des variations de l'utilisation cérébrale locale de glucose (LCMRglc, *local cerebral metabolic rate for glucose*) au cours du développement humain.

Haut : LCMRglc en µmol/min/100g. La ligne hachurée représente la valeur moyenne de l'adulte. Milieu : Densité des processus neuronaux dans le cortex à la naissance (faible), à 6 ans (exubérante) et chez le jeune adulte.

Bas : Images TEP d'utilisation de glucose (LCMRglc) sur des coupes à l'âge de 5 jours (noter la faible consommation de glucose corticale et sous-corticale sauf pour le thalamus, structure phylogénétiquement la

plus ancienne), à 6 ans (hyperactivité généralisée) et chez le jeune adulte. En rouge, les taux les plus élevés de métabolisme, avec les couleurs orange, jaune, vert et bleu représentant des valeurs progressivement plus faibles (Chugani & Phelps 1991).

Plus récemment, l'équipe de Chugani a repris des données antérieures de la consommation cérébrale de glucose qu'elle a comparé à l'évolution du poids corporel de la naissance à l'adolescence (0 – 15 ans) (Kuzawa *et al.* 2014). De manière intéressante, le rapport de l'utilisation cérébrale de glucose sur le métabolisme corporel au repos ($glucose_{RMR}$), exprimé en pourcentage, est inversement corrélé à la croissance corporelle (d*w*/d*t*) (Figure 30). Ainsi, dès la naissance, l'augmentation importante des besoins en glucose cérébral s'accompagne d'une baisse proportionnelle de la croissance corporelle, avec une demande en glucose cérébral qui présente un pic pendant l'enfance alors que la croissance corporelle est la plus active à l'adolescence. Ceci conforte l'hypothèse que les besoins très élevés du cerveau en développement nécessitent une baisse de la croissance corporelle compensatoire qui reprend lorsque les besoins en glucose cérébral ont diminué.

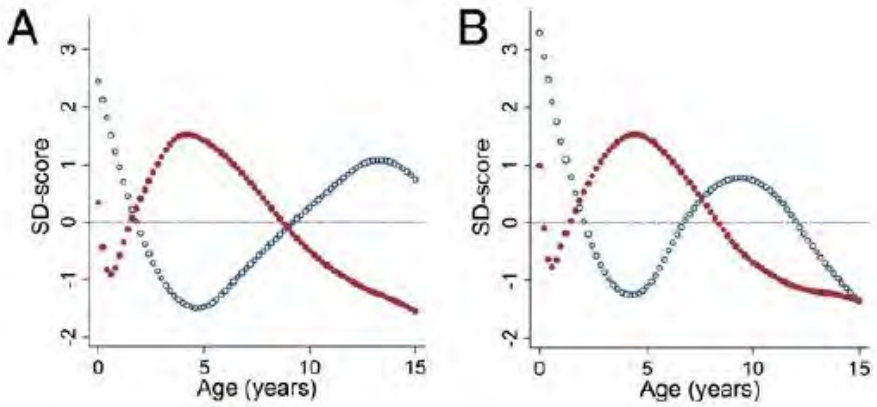


Figure 30 : $glucose_{rmr\%}$ et croissance corporelle exprimés en score SD afin de permettre la comparaison.
A, $Glucose_{rmr\%}$ (rouge) et d*w*/d*t* (bleu) chez l'homme.
B, $Glucose_{rmr\%}$ (rouge) et d*w*/d*t* (bleu) chez la femme (Kuzawa *et al* 2014).

Enfin, Goyal *et al.* (2014), par le biais de méta-analyses à partir d'études du métabolisme cérébral du glucose, de la consommation cérébrale en O_2 et du débit sanguin cérébral, illustrent clairement l'évolution similaire de ces 3 paramètres de l'activité fonctionnelle cérébrale tout au long de la vie avec un pic d'activité fonctionnelle cérébrale chez l'enfant avant 10 ans (*cf.* Figure 31).

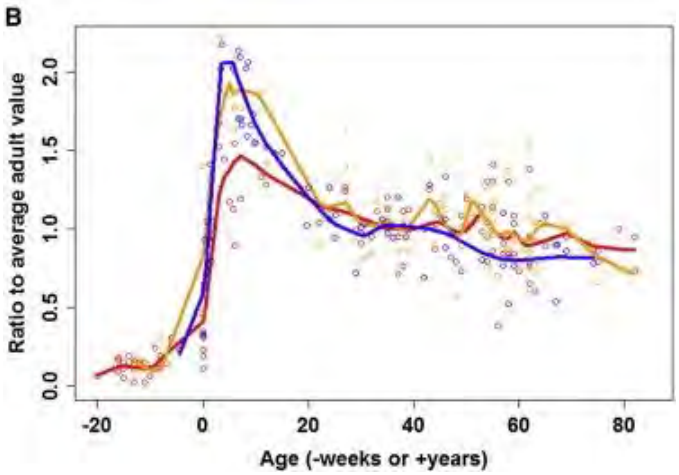


Figure 31 : métabolisme cérébral au cours de la vie, normalisé par rapport aux valeurs moyennes de l'adulte.

Cette figure met en évidence, au début de l'enfance, l'augmentation d'un facteur 2 environ de la consommation cérébrale de glucose (bleu), d'un facteur 1,5 pour la consommation cérébrale en O_2 (rouge) et d'un facteur 2,0 pour le débit sanguin cérébral (orange) (Goyal *et al* 2014).

5.3.1.6 Corrélats cognitifs

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

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

5.3.1.7 Les techniques d'imagerie non invasive pour l'étude du développement du cerveau humain

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

Ainsi, l'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) permet de mesurer le volume et la surface de la substance blanche (SB) et de la matière grise (MG) ainsi que l'épaisseur ou la densité corticale, reflétant en partie le nombre de cellules au sein des colonnes corticales (IRM structurale ou morphologique). Elle permet également d'évaluer le degré de maturation des fibres de SB (microstructure, longueur) et donc la connectivité (imagerie en tenseur de diffusion, ITD [*tensor diffusion imaging*], ou tractographie). Enfin l'IRM fonctionnelle (IRMf) permet d'investiguer l'activité cérébrale en mesurant le degré d'oxygénation de l'hémoglobine (*vs* désoxyhémoglobine) (Figure 32).

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

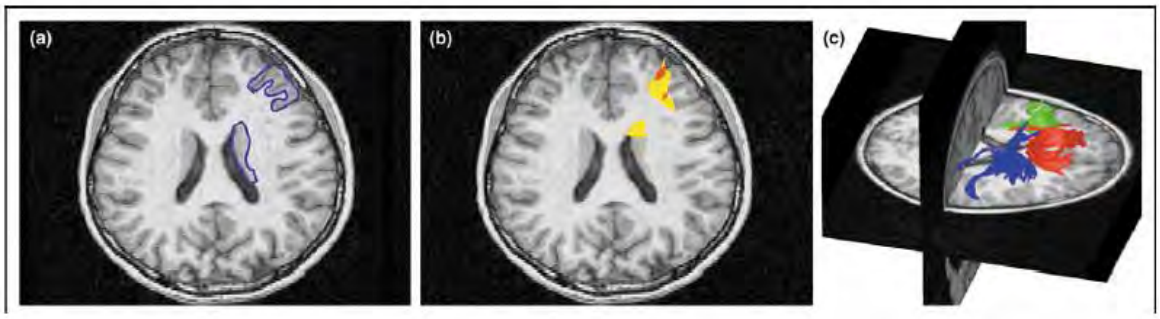


Figure 32 : méthodes d'IRM couramment utilisées pour l'étude du développement cérébral chez l'Homme.

(a) L'IRM morphologique mesure la taille et la forme des structures cérébrales (ex : le noyau caudé et le gyrus frontal inférieur en bleu).

(b) L'IRMf mesure les profils d'activité au sein des structures (jaune et rouge).

(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).

5.3.2 Développement de la fonction de reproduction

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

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

- chez le mâle, à partir des canaux de Wolff, en épididyme, canal déférent et vésicules séminales ;
- chez la femelle, à partir des canaux de Müller, en utérus.

Chez les garçons

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

- l'hormone anti-müllérienne (AMH) par les cellules de Sertoli, responsable de la régression des canaux de Müller ;
- la testostérone par les cellules de Leydig, responsable du maintien des canaux de Wollf. La testostérone et ses dérivés favorisent également le développement des organes génitaux externes (urètre, prostate, pénis, bourses).

Peu de temps avant la naissance, les testicules, situés dans l'abdomen, descendent dans le scrotum. Cette migration est également sous le contrôle de la testostérone et d'une autre hormone sécrétée par les cellules de Leydig, l'*insuline-like factor* 3 (INSL3). L'appareil génital est achevé à la fin du premier trimestre de grossesse. La poursuite de la maturation ne s'effectue que lentement pour s'achever au moment de la puberté. Les cellules germinales souches du testicule immature (gonocytes) restent inactives jusqu'à la puberté puis se transforment en spermatogonies souches. Par des divisions et des différenciations successives, ce réservoir de cellules souches donne naissance aux spermatozoïdes. La spermatogenèse se poursuit tout au long de la vie. Comme toutes les glandes endocrines, le testicule est sous le contrôle du complexe hypothalamo-hypophysaire. La gonadotrophine (GnRH), libérée par l'hypothalamus, stimule la sécrétion de deux hormones hypophysaires :

- la folliculostimuline (FSH) : la FSH agissant sur les cellules de Sertoli participe à l'initiation de la spermatogenèse ;
- l'hormone luthéinisante (LH) : à la puberté, la LH augmente la production de testostérone qui agit directement sur les cellules de Sertoli pour assurer le bon déroulement de la spermatogenèse.

Chez les filles

Dans l'embryon féminin (en l'absence de SRY et grâce à l'expression d'autres gènes), la gonade indifférenciée se transforme en ovaire. En l'absence de testostérone et d'AMH, les canaux de Wolff régressent tandis que les canaux de Müller se différencient en trompes de Fallope, utérus, et partie supérieure du vagin. Les organes génitaux externes se développent également.

Chez la fille, toutes les cellules germinales souches, les ovogonies, cessent de se diviser avant la naissance, après leur transformation en ovocytes à la première division méiotique. La plupart des ovocytes bloqués en phase de méiose disparaissent après la naissance et après la puberté. Le stock de cellules germinales disponibles est donc limité.

Chez la femme, les ovaires produisent des ovules et sécrètent deux hormones, l'œstradiol et la progestérone. À la puberté, les ovocytes localisés dans les follicules primordiaux entrent régulièrement en croissance selon un processus dénommé folliculogenèse qui conduit l'ovocyte vers l'ovulation. Les cellules de la granulosa deviennent alors sensibles à la FSH et vont continuer à se multiplier et à se différencier (comme les cellules de Leydig chez le mâle). Les androgènes sécrétés diffusent dans les cellules de la granulosa et, sous l'influence de la FSH, sont transformés en œstradiol. La différenciation des cellules de la granulosa produit également le liquide folliculaire et le follicule devient le follicule à antrum. La sécrétion brutale de LH déclenche la maturation finale de l'ovocyte et l'ovulation.

5.3.3 Développement de la moelle osseuse

La moelle osseuse (MO) est l'un des organes les plus actifs tout au long de la vie. La moelle osseuse hématopoïétique occupe les espaces entre les travées d'os spongieux et est le lieu où se situent tous les précurseurs des cellules sanguines. Elle est ainsi à l'origine de la plupart des lignées sanguines : lignée érythrocytaire (globules rouges), lignée mégacaryocytaire (plaquettes) et lignée granulocytaire appelée également myélopoïétique (polynucléaires et

monocytes/macrophages). La moelle osseuse hématopoïétique est donc riche en cellules souches.

Elle produit chaque jour 1 000 milliards de cellules sanguines, qui viennent prendre la place des cellules sanguines détruites par ailleurs dans le corps.

5.3.3.1 Particularités physiologiques chez l'enfant

À la naissance la moelle osseuse a définitivement pris le relais des organes hématopoïétiques de la vie fœtale que sont le foie et la rate. Elle est alors extrêmement riche, occupant tous les espaces intra-osseux.

Tous les os vont ensuite avoir une activité hématopoïétique jusqu'à l'âge de 5 ans, c'est-à-dire que chez l'enfant, la totalité de la moelle osseuse est hématopoïétique. Progressivement durant l'enfance, il se produit une transformation adipeuse progressive de la moelle. Elle va ainsi se limiter à quelques segments du squelette, constituant ainsi la « moelle osseuse rouge » des épiphyses des os longs, mais également des os courts et plats : côtes, sternum, pelvis (os coxaux ou iliaques), vertèbres, os plats du crâne. Même dans ces territoires hématopoïétiquement actifs, approximativement 50 % de la moelle est formée de graisse.

La moelle adipeuse est capable d'une reconversion à l'hématopoïèse et dans de nombreuses maladies, il peut se produire une expansion de l'hématopoïèse dans des zones non hématopoiétiques.

5.3.3.2 Particularités en pathologie

Les leucémies sont des maladies malignes caractérisées par la prolifération des précurseurs hématopoïétiques de la moelle osseuse. 31 % des maladies malignes de l'enfant sont des leucémies alors que ces maladies ne représentent qu'un faible pourcentage des maladies cancéreuses de l'adulte. Ainsi, l'incidence est d'environ 4 nouveaux cas pour 100 000 enfants et par an ce qui revient à dire qu'environ 1 nouveau-né sur 2 000[35] aura une leucémie au cours des 15 premières années de sa vie. Les leucémies aiguës de l'enfant sont le plus souvent lymphoblastiques, c'est-à-dire touchant le précurseur des lymphocytes.

En fait, il faut définir ces leucémies aiguës comme des maladies malignes caractérisées par la prolifération de précurseurs hématopoïétiques qui ont perdu une grande partie de leur potentiel de maturation. Ces précurseurs sont ainsi bloqués à un stade donné de leur maturation. C'est la raison pour laquelle la prolifération maligne qui envahit progressivement la moelle osseuse est monomorphe ou peu polymorphe, contrairement à ce qui survient dans la leucémie myéloïde chronique de l'adulte où le clone malin garde des possibilités de différentiation dans les différentes lignées hématopoïétiques.

Les cytologistes appellent « hiatus leucémique » l'aspect cytologique d'envahissement monomorphe sans différentiation d'aval que l'on observe au cours des leucémies aiguës.

5.4 Transposition des résultats obtenus sur des animaux à l'Homme

Lorsque des données obtenues directement chez l'Homme (dans le cadre d'études cliniques ou épidémiologiques) ou indirectement sur des tissus humains ne sont pas disponibles, mais que des effets sont observés chez l'animal, il est important de s'interroger sur la plausibilité de l'existence d'effets similaires chez l'Homme : les mécanismes d'action sont-ils spécifiques à l'animal ? Y a-t-il des différences entre les espèces de laboratoire si plusieurs espèces ont été testées ? *etc.* Les rongeurs sont souvent utilisés comme modèle d'étude des effets potentiels des radiofréquences. Leur petite taille permet en effet d'exposer plusieurs individus en même temps, dans des

[35] Source : registre national des hémopathie maligne de l'enfant et Registre national des tumeurs solides de l'enfant 2007-2011.

conditions plus ou moins identiques, et leur durée de vie limitée autorise une exploration des effets pendant les différents stades de leur vie, voire sur plusieurs générations.

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

Tableau 14 : corrélation entre l'âge des rats et de l'Homme en fonction des différentes phases de la vie 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 équivaut 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 équivaut 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

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

5.4.1 Éléments de comparaison entre le développement cérébral chez les animaux de laboratoire et chez l'Homme

Il est généralement admis que le cerveau en développement est qualitativement différent du cerveau adulte et ceci chez l'Homme comme chez les mammifères. Des études comparatives entre mammifères ont très largement montré une conservation importante des évènements/séquences neuro-développementaux(ales) au travers des espèces. Il est ainsi admis que le développement régional global est similaire entre les rongeurs (rat, souris) et l' Homme, de même que l'ordre dans lequel les différentes structures cérébrales se développent, soit la moelle épinière et les structures postérieures (phylogénétiquement les plus anciennes) en 1er, l'hippocampe et les cortex limbiques en dernier, quant-au cervelet, son développement couvre une période très étendue, depuis la gestation et qui se prolonge au-delà de la naissance chez l'Homme comme chez le rongeur (jusqu'au 20^{e} jour postnatal). De plus, la majorité des structures cérébrales organisées en réseaux/circuits neuroanatomiques qui sous-tendent l'une ou l'autre fonction (ex : sensorielle, motrice…) chez l'Homme, sont aussi présentes chez le rongeur et sous-tendent globalement les mêmes fonctions (Rice & Barone 2000). Cependant, il existe des différences pour certaines structures comme celle du système olfactif beaucoup plus développé chez le rongeur, alors que le néocortex, en particulier le cortex préfrontal, l'est beaucoup plus chez l'Homme. Enfin, l'Homme a un cerveau gyrencéphalique, alors que le rat a un cerveau lissencéphalique (absence de sillons).

S'il existe de réelles similitudes entre le développement des diverses espèces animales, le décours temporel peut être très différent (*e.g.,* Finlay & Darlington, 1995). Ainsi, une des

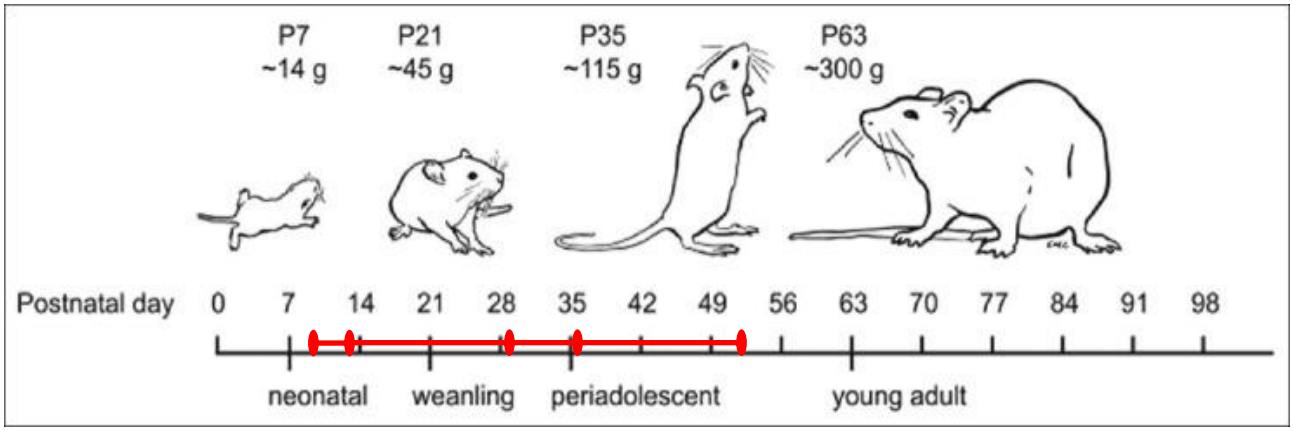
caractéristiques du développement cérébral du rongeur (rat, souris) est qu'il est surtout postnatal et rapide (environ 3 mois depuis la conception dont 21 jours *in utero*), alors que c'est l'inverse chez l'Homme dont le développement prénatal cérébral est considérable et se poursuit après la naissance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

Certains modèles sont validés et un certain nombre de comportements ou de fonctions, ainsi que leurs mécanismes sous-jacents, sont considérés comme homologues entre les modèles et l'Homme, car issus d'un caractère ancestral commun. Par exemple, certains comportements moteurs (préhension, tremblement, akinésie) et les mécanismes qui les sous-tendent impliquant des structures cérébrales spécifiques (les noyaux gris centraux ou noyaux de la base[36]), sont considérés comme comparables entre le rat et l'Homme. En revanche, pour d'autres fonctions ou comportements, il n'existe qu'un rapport d'analogie qui nécessite plus de prudence quant à une extrapolation de l'animal à l'Homme.

En conclusion, des données de la littérature permettent de proposer une échelle de correspondance entre l'âge de l'animal et celui de l'Homme, mais cette échelle est sujette à modifications en fonction des paramètres de développement considérés, ce qui pointe la difficulté à établir des correspondances précises. Il existe cependant un consensus sur le fait que le rat ou la souris naît beaucoup plus immature que l'Homme au plan du développement cérébral notamment (environ le début du 3e trimestre de la gestation chez le fœtus humain) et qu'à 10-12 jours, le jeune rat présente un développement cérébral qui peut être comparé à celui du nouveau-né humain. Ensuite, le début de la puberté et de l'adolescence est estimé vers 28 jours chez le rongeur et il est considéré comme adulte vers 60 jours (la maturité sexuelle s'atteignant entre le 42ème et le 60ème jour) (voir Figure 33).

[36] 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

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



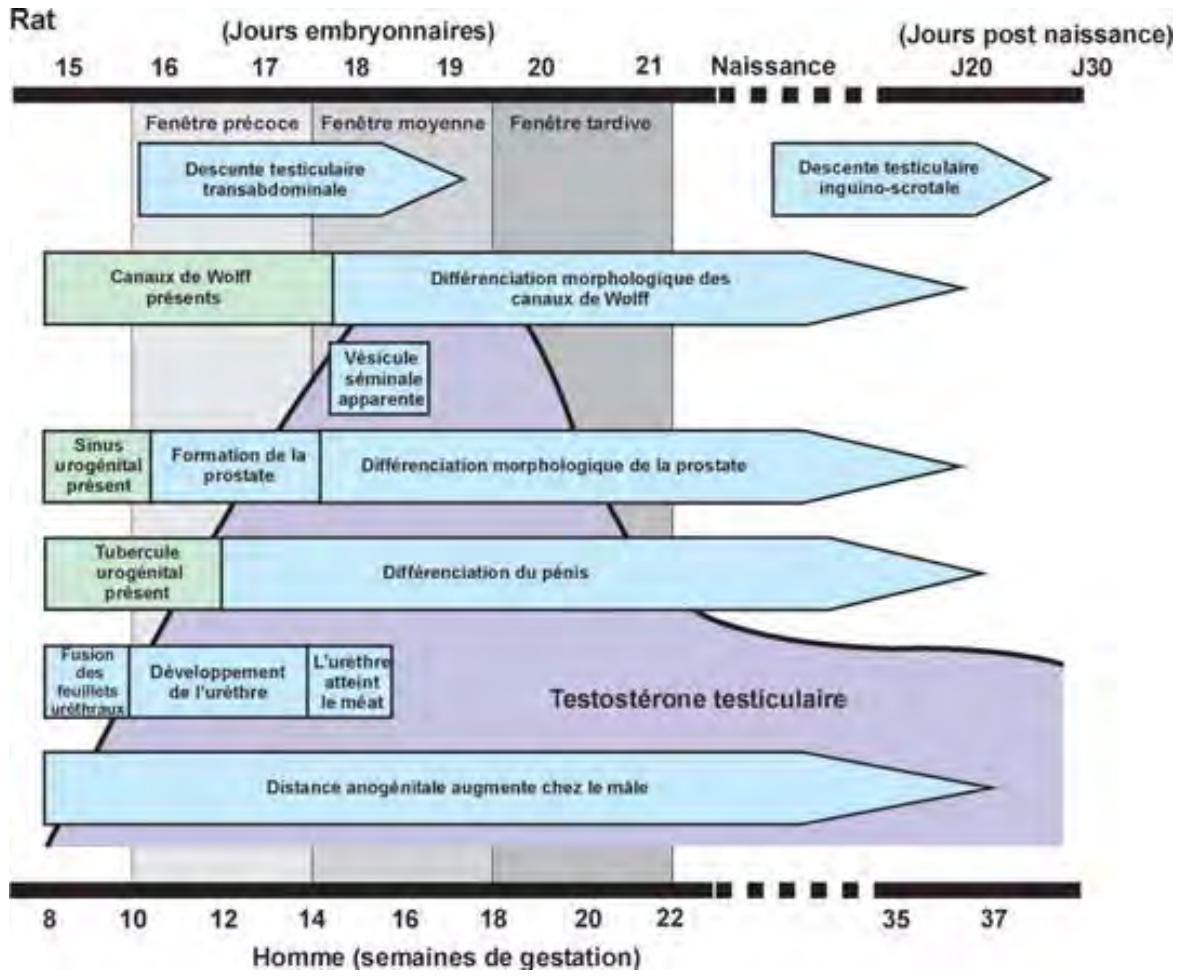
Âge du rat	10 – 12 jours	12 – 28 jours	28 – 35 jours	35 – 50 jours
Âge humain	Naissance	Enfant de 8 – 10 ans	Adolescent de 11 - 13 ans	Adolescent de 14 – 18 ans

Figure 33 : développement cérébral chez le rat et l'Homme (graphe modifié à partir d'Alling (1985)).

5.4.2 Éléments de comparaison entre le développement de la fonction de reproduction chez les animaux de laboratoire et chez l'Homme

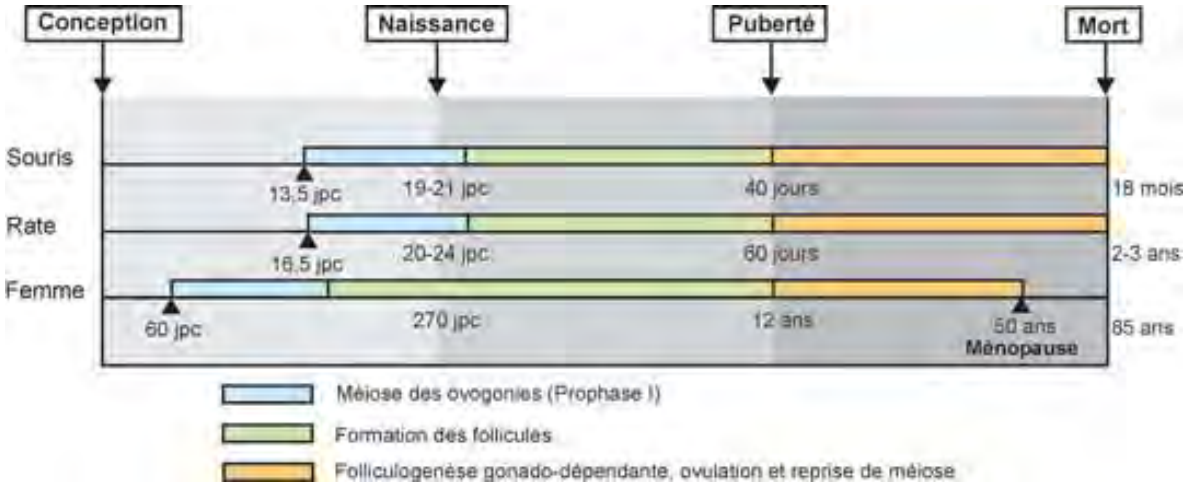
Le paragraphe ci-après a été repris du rapport « Reproduction et environnement » de l'expertise collective de l'Inserm (2011).

Il existe des différences importantes entre espèces dans le déroulement de la différentiation sexuelle et dans les mécanismes qui les régulent. Les rongeurs ne représentent pas l'ensemble des mammifères et ont des particularités qui en font souvent une exception plus qu'un modèle universel. Les différentes étapes du développement ovarien et testiculaire, bien que globalement similaire chez tous les mammifères, présentent des variations importantes entre espèces et ne se déroulent pas pendant des périodes similaires (voir Figure 34 et Figure 35).



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

Figure 34 : 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 35 : 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.

De plus, comme vu dans le chapitre précédent, les rongeurs naissent très immatures par rapport à d'autres mammifères comme le singe, le cheval, le cochon ou l'Homme. La période néonatale chez les rongeurs correspond du point de vue du développement au 3e trimestre de la gestation chez l'Homme, et c'est vers l'âge de 10 - 12 jours que le rongeur peut être comparé au nouveau-né humain (voir 5.4.1). Ces différences de « timing » et de vitesse de croissance entre les différentes espèces sont donc à prendre en compte lorsqu'il s'agit d'extrapoler les données animales à l'Homme. En conséquence, la correspondance entre l'ontogénèse du développement ovarien par exemple et le développement du système nerveux central diffère entre l'Homme et le rat, de telle sorte que des perturbations durant la gestation pourraient ne pas avoir le même impact sur le développement. Par ailleurs, les rongeurs naissent en nombre largement plus élevé, ce qui augmente la variabilité quant à l'exposition individuelle. Il est donc clair qu'il faut être prudent pour extrapoler les résultats obtenus chez la souris à l'Homme et prendre en compte les différences chronologiques et physiologiques qui existent entre les 2 espèces. D'autres modèles animaux peuvent se révéler plus pertinents que le rongeur, notamment ceux qui ont des durées de gestation et de vie longue, et qui n'ont qu'un seul petit par portée, comme par exemple les ruminants ou les porcs.

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

5.5 Études sur le système nerveux

5.5.1 Effets biologiques et mécanistiques

5.5.1.1 Effets sur la barrière hémato encéphalique

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

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

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

de la BHE (extravasion de l'albumine) après une exposition chronique pendant toute la vie (2 ans) à un DAS de 4 W/kg (60 min / jour, 5 jours par semaine) ayant débuté à l'âge de 8 semaines. (Finnie et al. 2002).

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

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

Tableau 15 : 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 *(se référer au texte pour les commentaires)*
Finnie *et al.*, 2002	Signal GSM 900 MHz DAS = 0,25 ; 1 ; 2 ; et 4 W/kg 2 h/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 *et al.*, 2005	Signal TDMA 1 439 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 *et al.*, 2006a	Signal GSM 900 MHz DAS = 4 W/kg 2 h/j, 5 j/semaine pendant 5 semaines	Souris Dès la naissance	Extravasation de l'albumine	10 animaux par groupe	Pas d'effet sur la perméabilité des vaisseaux sanguins à l'albumine.
Finnie *et al.*, 2006b	Signal GSM 900 MHz DAS = 4 W/kg 2 h/j, 5 j/semaine, GD 1 - GD 19	Souris *In utero*	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 *et al.*, 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).

Le rapport de l'Anses publié en 2013 indiquait qu'aucun effet neurotoxique d'une exposition aux radiofréquences n'avait été mis en évidence sur la barrière hématoencéphalique, en dehors des effets thermiques, quels que soient les modèles biologiques testés.

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

5.5.1.2.1 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 péroxydation 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) 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.

5.5.1.2.2 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.

Aucune différence significative n'a été notée entre les résultats des animaux issus d'un même groupe. En revanche, une augmentation des cassures simple-brin de l'ADN a été constatée chez les rats exposés par rapport au groupe témoin, quelle que soit la fréquence du signal.

Les limites de cette étude résident en l'absence de dosimétrie numérique et expérimentale, et le DAS est estimé théoriquement selon une méthode publiée en 1978 [Durney *et al*., 1978]. De plus,

compte tenu de la disposition des rats décrite par les auteurs, il est possible que l'exposition de tous les animaux n'ait pas été identique, la cage étant située en face de l'antenne cornet, les 6 animaux par cage étant alignés sur 2 rangées.

Paulraj & Behari (2006b) ont mesuré l'activité de la protéine kinase C (PKC) grâce à l'ATP marqué au phosphore 32 sur des cerveaux de 6 rats âgés de 35 jours exposés 2 h / jour, 5 jours par semaine pendant 35 jours (DAS = 0,11 W/kg) à des ondes de fréquence 2,45 GHz (de type non précisé). Les rats ont été divisés en deux groupes : un groupe exposé et un groupe témoin négatif. L'activité de la PKC a été mesurée soit dans tout le tissu cérébral, soit uniquement dans l'hippocampe soit encore dans le restant du cerveau après prélèvement de l'hippocampe.

Les auteurs ont mis en évidence une diminution significative de l'activité de la PKC dans l'hippocampe si cette activité est comparée à celle du reste du cerveau et à celle du groupe contrôle, ainsi qu'une diminution dans le cerveau total. En revanche, aucune diminution significative de l'activité de la PKC n'a été observée dans le cerveau sans l'hippocampe. À l'analyse histologique, une augmentation de la population gliale au niveau du cortex cérébral dans le groupe exposé a été constatée.

Les résultats sont peu explicables concernant l'activité de la PKC, étant donné que l'hippocampe occupe une faible portion du volume cérébral et qu'à lui seul il ne peut expliquer une baisse significative de l'activité cérébrale, alors que le reste du cerveau aurait une activité non diminuée. De plus, l'article manque de données importantes (comme le type d'ondes émises) et ne fournit pas de dosimétrie.

Ammari *et al.* (2010) ont étudié chez des rats de 6 semaines (n = 6) les effets d'une exposition à un générateur de radiofréquences (GSM-*like*, 900 MHz), 45 min / jour à un DAS de 1,5 W/kg ou 15 min / jour à un DAS de 6 W/kg, 5 jours par semaine pendant 8 semaines. L'expression de la GFAP, une protéine spécifique des astrocytes, a été quantifiée dans 5 structures cérébrales (cortex préfrontal, cortex cérébelleux, le gyrus dentelé de l'hippocampe, le globus pallidus latéral du pallidum et le striatum) 3 ou 10 jours après la fin de l'exposition.

Trois jours après la fin de l'exposition, une augmentation significative de la GFAP est observée pour les deux niveaux d'exposition dans toutes les structures. Dix jours après la fin de l'exposition, l'augmentation reste significative seulement dans une seule structure cérébrale (le globus pallidus) pour l'exposition au DAS faible, et dans 3 structures (hippocampe, cortex préfrontal et globus pallidus) pour l'exposition au DAS élevé. Des effets thermiques sont exclus car l'exposition semble rigoureusement contrôlée (référence à un de leur précédent article de Brillaud *et al.*, 2007). Les auteurs concluent qu'une exposition sub-chronique à un signal de 900 MHz peut affecter de manière transitoire et réversible le cerveau du rat, ici l'augmentation d'un marqueur d'activation gliale pouvant être le reflet d'une réaction de type inflammatoire.

Kesari *et al.* (2010) ont étudié l'effet des radiofréquences à 2,45 GHz modulées à 50 Hz, sur le cerveau en développement de jeunes rats âgés de 35 jours. Les animaux (n = 6) ont été exposés 2 h / j pendant 35 jours, à la densité de puissance de 0,34 mW/cm^2. Le DAS a été estimé à 0,11 W/kg. Les animaux ont ensuite été euthanasiés et le tissu cérébral dans son ensemble a été prélevé afin d'effectuer un test des comètes et un dosage de l'activité de certaines enzymes jouant un rôle dans de stress oxydant (superoxyde dismutase, catalase, glutathion peroxydase, histone H1 kinase).

Chez les animaux exposés, le test des comètes révèle une augmentation significative des cassures doubles brin de l'ADN, se traduisant par une augmentation de la longueur de la tête et de la queue des comètes et du moment de la queue[37]. De plus, les animaux exposés présentent une

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

diminution de l'activité des enzymes anti-oxydantes (superoxyde dismutase et glutathion peroxydase) ainsi que de l'histone H1 kinase, mais une augmentation de l'activité de la catalase. Pour les auteurs, ces éléments sont en faveur d'une production d'espèces réactives de l'oxygène suggérant la probabilité d'une promotion cancéreuse.

Aït-Aïssa *et al.* (2010) ont évalué les effets sur la gliose et l'apoptose de rats exposés 2 h / j, 5 j / semaine en pré- et post- natal (GD 6 – PND 35) à un signal Wi-Fi de 2,45 GHz (3 niveaux d'exposition : DAS = 0,08 ; 0,4 et 4 W/kg). Voir 5.5.1.2.1 pour la description de l'étude. L'étude de la gliose et de cellules apoptotiques dans différentes régions du cerveau des jeunes rats (hippocampe, cortex, striatum, amygdale et zone pré-optique) n'a montré aucune altération suite à l'exposition pré- et post-natale.

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

Watilliaux *et al.* (2011) ont étudié chez le jeune rat âgé de 5, 15 ou 35 jours (n = 5 ou 6 par groupe), les effets d'une exposition aiguë (2 h) à un signal de type GSM 1 800 MHz (DAS = 1,7 - 2,5 W/kg) sur le stress cellulaire et la réponse gliale. Le stress cellulaire a été évalué par la détection des *heat shock proteins* (HSP60, HSP 90 et HSC70) par *Western Blot* tandis que la réponse gliale (astrocytes et microglie) a été mesurée par un marquage immunohistochimique de diverses protéines comme la GFAP, la sérine-racémase, GLT1, GLAST et CD 68 dans 4 sous-régions cérébrales.
Vingt-quatre heures après la fin de l'exposition, aucune modification de l'expression de ces protéines n'a été observée.
Cette étude est particulièrement informative, car elle a investigué les expositions chez des animaux immatures de différents âges et concerne plusieurs paramètres de l'inflammation au niveau des cellules gliales et de la microglie ainsi que du métabolisme du glutamate, le neurotransmetteur excitateur majeur du système nerveux central. Ces données semblent montrer que le cerveau très immature (5 et 15 jours chez le rat) ne présente pas une sensibilité particulière à une exposition aiguë aux radiofréquences, par rapport à un cerveau plus développé comme celui du rat de 35 jours. Par ailleurs, les auteurs remarquent qu'il n'est pas exclu que l'anesthésie pendant l'exposition ait interféré avec une réponse cellulaire aux radiofréquences, mais elle a permis d'éviter le stress lié à une contention prolongée et de standardiser la position de la tête dans le dispositif permettant une exposition reproductible.

Bouji *et al.* (2012a) ont étudié chez des rats jeunes (6 semaines) et adultes d'âge moyen (12 mois) (n = 8 - 9 par groupe), la neuro-inflammation en mesurant l'expression de la GFAP dans le cortex, l'hippocampe et le striatum, ainsi que les interleukines IL-1β et IL-6 dans le cortex, le cervelet, les régions sous-corticales et les bulbes olfactifs 48 h après la fin d'une exposition de 15 min à un générateur de signal type GSM (900 MHz, DAS de 6 W/kg). La concentration plasmatique de corticostérone et la mémoire émotionnelle ont également été évaluées (voir § 5.5.2.2).

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

Maaroufi *et al.,* ont publié une série de 3 articles visant à étudier les effets exposition aux radiofréquences seules ou combinées à un traitement au fer sur des rats juvéniles (Maaroufi *et al.,* 2009, 2011 et 2014). Les résultats de l'article de 2009 sont détaillés dans le paragraphe 5.5.2.2.

Les rats âgés de 4 semaines ont été exposés à un signal de 150 KHz (intensité 5 mA/m) (Maaroufi *et al.,* 2009 et 2011) ou à un signal GSM 900 MHz (Maaroufi *et al.,* 2014) 1 h / j pendant 21 jours consécutifs. Le DAS a été évalué entre 0,05 et 0,18 W/kg. Trois groupes ont été réalisés : un groupe exposé aux radiofréquences seules, un groupe d'exposition factice et un groupe exposé aux radiofréquences recevant en parallèle une injection quotidienne de sulfate de fer. Des travaux antérieurs ont montré que l'administration de sulfate de fer produit une accumulation de fer dans le cerveau, qui est une hypothèse physiopathologique de maladies neurodégénératives. Le stress oxydant a été évalué en dosant la concentration de l'acide thiobarbiturique (TBARS), de superoxyde dismutase (SOD) et de catalase (CAT) dans le cervelet, le striatum, l'hippocampe et le cortex préfrontal.

Alors que le traitement au sulfate de fer n'induit pas de stress oxydatif chez les rats, il stimule les défenses anti-oxydantes notamment dans le cervelet et le cortex frontal. En revanche, l'exposition aux radiofréquences stimule la peroxydation lipidique prinicpalement dans le cervelet, sans affecter les défenses anti-oxydantes. De plus, en situation de co-exposition radiofréquences + sulfate de fer, la peroxydation lipidique est légèrement supérieure à celle observée pour l'exposition aux radiofréquences seules. La co-exposition radiofréquences + sulfate de fer abolit l'augmentation des défenses anti-oxydantes observées lors de l'administration du fer seul (Marroufi *et al.,* 2011).

Les manipulations sur le stress oxydant ont été répliquées dans l'étude de 2014, dans laquelle aucun des 2 traitements n'induit de stress oxydant global, bien que quelques variations complexes de certains paramètres du stress oxydant aient été relevées. Des lacunes dans la description du protocole d'exposition (méthode d'estimation du champ électrique, pesée du rat pour connaître la variation du DAS, *etc.*) rendent délicate l'interprétation des résultats. De plus, il est regrettable qu'aucun groupe ayant reçu du sulfate de fer sans exposition aux radiofréquences n'ait été inclus dans l'étude.

En raison d'importantes limites méthodologiques, les résultats des études suivantes n'ont pas pu être exploités :

- Jing *et al.,* (2012) ont exposé des rates 10, 30 ou 60 min, 3 fois par jour, pendant toute la durée de la gestation (GD1 – GD 21). Les paramètres du stress oxydant (SOD, GSH-Px, MDA) et les catécolamines (Noradrénaline, dopamine et Sérotonine) ont été recherchés dans le cerveau entier (5 cerveaux entier de fœtus poolé par femelle). Le système d'exposition est très peu décrit, à part qu'un téléphone est placé près de l'oreille du rat en mode appel. Les rats sont exposés dans un tube, occasionnant un stress majeur, qui n'est pas évalué par la présence d'un groupe de rat contrôle cage. L'analyse statistique manque de détails.
- Sangun 2014, lors d'une étude sur la reproduction (voir paragraphe 5.7.2.2) ont exposé des rats à un signal Wi-Fi (2450 MHz, 0,1 W/kg, 1 h / j). Deux types d'exposition ont été réalisé, une exposition prénatale : de GD 0 à la naissance, puis de PND 21 à la puberté et une exposition postnatale de PND 21 à la puberté.

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

  L'absence de groupe contrôle cage est regrettable, car les paramètres évalués (prise alimentaire, prise de poids) et les conditions d'exposition (contention dans un carrousel d'exposition) sont très impactés par le stress. De plus, les animaux ne semblent pas avoir

été habitués préalablement au carrousel. L'interprétation des résultats n'est pas rigoureuse (comparaison avec articles exposant à des champs basses fréquences).

Le groupe de travail « Radiofréquences et santé » avait identifié des études qui ne peuvent pas être utilisées pour évaluer les effets des radiofréquences sur la réponse cellulaire, le stress oxydant et la neuroinflammation en raison des nombreux biais méthodologiques. Parmi ces dernières, les études portant sur les animaux juvéniles sont Imge *et al.* 2010, Kesari *et al.* 2011, 2012 et Noor *et al.* 2011.

Tableau 16 : 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)*
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.
Finnie *et al.,* 2009b	GSM 900 MHz DAS = 4 W/kg 60 min/jour GD1 – GD19	Souris *in utero*	Évaluation du stress cellulaire : dosage de HSP 25, 32, 70	10 animaux / groupe	Aucune différence d'expression des protéines de stress inductibles entre les groupes exposés et témoins.
Maaroufi *et al.,* 2009	Signal 150 kHz DAS non renseigné 1 h/j, 21 jours consécutifs Administration concomitante de sulfate de fer	Rat 1 mois	Effets de la combinaison RF + fer sur la mémoire et le métabolisme de la sérotonine et dopamine	6 animaux / groupe	Le traitement au fer seul n'a pas d'effets sur la mémoire spatiale mais affecte la composante spatiale dans la tâche d'exploration d'objets. L'exposition aux RF seules ou combinée au fer n'a pas d'effet sur la mémoire spatiale et n'affecte pas la détection de la nouveauté spatiale dans le test de reconnaissance d'objets mais diminue le temps d'exploration. Absence d'effet sur les systèmes dopamine et sérotonine et donc un effet protecteur des RF sur système sérotonine en cas de traitement par le fer

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux	Résultats *(se référer au texte pour les commentaires)*
Güler *et al.,* 2010	GSM 1 800 MHz DAS non précisé 15 min/jour pendant 7 jours GD 15 – GD 22	Lapin *in utero*	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 *et al.,* 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 *in utero*	Expression de GFAP Détection de cellules apoptotiques	12 animaux /groupe	Absence de gliose et d'altération de différentes régions du cerveau.
Ammari *et al.,* 2010	GSM 900 MHz DAS = 1,5 W/kg 45 min/jour DAS = 6 W/kg 15 min/jour, 5 j/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 *globus pallidus* latéral pour l'exposition au DAS faible, et dans l'hippocampe, cortex préfrontal et *globus pallidus* pour l'exposition au DAS élevé.
Kesari *et al.,* 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 *et al.* 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 5.5.1.3)	10 animaux par groupe	Augmentation de l'expression de GFAP dans les aires CA1, CA3 et dans le gyrus denté de l'hippocampe.

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge à l'exposition	Effet étudié	Nombre d'animaux	Résultats *(se référer au texte pour les commentaires)*
Watilliaux *et al.,* 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.
Maaroufi *et al.,* 2011	Signal 150 kHz DAS = 0,5 et 0,9 W/kg 1 h/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	<u>Sulfate de fer seul :</u> Aucun effet du traitement sur peroxydation lipidique. Augmentation de l'activité SOD dans le cervelet et de la catalase dans le cervelet et le cortex préfrontal. <u>Radiofréquences seules</u> : Augmentation peroxydation lipidique dans le cervelet. Pas d'effet sur SOD et Catalase. <u>Radiofréquences + Fer</u> : Aucun effet sur la SOD et Catalase. Les RF aboliraient l'augmentation des défenses antioxydantes provoquées par le fer.
Bouji *et al.,*, 2012	GSM 900 MHz DAS = 6 W/kg Exposition unique de 15 min	Rat 6 semaines et 12 mois	Expression de GFAP, IL-1β et IL-6 dans différentes régions du cerveau	8 ou 9 rats / groupe	Aucun effet sur la GFAP et l'IL-1β 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 *et al.*, 2014	GSM 900 MHz DAS = 0,05 - 0,18 W/kg 1 h/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.

- Concernant l'apparition de gliose

Chez le rat, cinq études ont investigué les effets des radiofréquences, soit en exposition postnatale (4 études) soit prénatale (1 étude) sur la protéine GFAP, marqueur d'activation des astrocytes et de réponse gliale, dans différentes structures cérébrales. Les études de Bouji *et al.,* et de Watilliaux *et al.,* montrent qu'une exposition aiguë à un signal GSM 900 ou 1 800 MHz (15 min – 2 h, DAS entre 1,7 et 6 W/kg) aux radiofréquences entre l'âge de 5 et 42 jours chez le jeune rat n'affecte pas l'activité de cette protéine 24 h ou 48 h après la fin de l'exposition.
En revanche, une exposition chronique de 2 ou 3 mois ayant débuté à l'âge de 6 semaines entraînerait une augmentation transitoire de l'expression de la GFAP dans certaines régions cérébrales (Ammari *et al.,* 2010 ; Maskey *et al.*, 2010a), alors qu'une exposition chronique *in utero* ou pendant la gestation et la lactation n'entraînerait pas ces mêmes effets (Aït-Aïssa *et al.,* 2010).

Les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient qu'une augmentation vraisemblablement transitoire de l'expression de la protéine GFAP était observée après une exposition chronique *in vivo.*

- Concernant les cassures de l'ADN

Chez l'animal, deux études vont dans le sens d'une augmentation des cassures d'ADN, après exposition de 35 jours aux radiofréquences chez des rats âgés de de 35 jours (Paulraj et Behari, 2006a ; Kesari *et al*., 2010). Ces études provenant de la même équipe méritent d'être reproduites.

Les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient que dans certaines conditions (notamment avec des expositions à des signaux modulés), les radiofréquences induisent des cassures de l'ADN. Néanmoins, ces dernières sont souvent de faible ampleur (proche du bruit de fond naturel) et semblent être rapidement réparées. Elles sont vraisemblablement sans conséquences pour l'intégrité des chromosomes.

- Concernant la production de stress oxydant

Chez l'animal, trois études se sont penchées sur la production de stress oxydant dans différentes structures cérébrales après exposition aux radiofréquences. Les résultats sont hétérogènes, puisque chez le rat, Maaroufi *et al.,* (2014) ne rapportent pas de stress oxydant dans les différentes structures cérébrales étudiées, alors que les études de Kesari *et al.,* (2010a et 2010b) sont en faveur d'une production de stress oxydant par diminution de l'activité des enzymes anti-oxydantes. De même que Maaroufi *et al.,* 2011 rapportent une augmentation de la peroxydation lipidique dans le cervelet de rats exposés aux radiofréquences, potentialisée par l'administration de sulfate de fer, alors que Güler *et al.,* ne rapportent pas d'induction de stress oxydant après exposition *in utero* chez le lapin. Il est à noter que les marqueurs de stress oxydant étudiés diffèrent en fonction des études (oxydation de l'ADN, oxydation des lipides ou enzymes de détoxification des radicaux libres….) pouvant très largement contribuer à l'hétérogénéité des résultats, obtenus de plus sur un faible nombre d'études.

Les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient que dans certaines conditions, une exposition aux RF pouvait favoriser l'oxydation de l'ADN et en particulier l'ADN mitochondrial. D'autres données *in vivo* et *in vitro* suggèrent cependant une absence d'effet de type stress oxydant, voire un effet inverse montrant que les radiofréquences peuvent améliorer certains paramètres caractérisant le stress oxydant. Ceci pourrait être particulièrement vrai dans des conditions dans lesquels le niveau de stress oxydant cérébral est élevé (vieillissement, pathologies neurodégénératives).

- Concernant la production de stress cellulaire

Chez l'animal, deux études ont investigué les effets d'une exposition aux radiofréquences sur le stress cellulaire visualisé par les protéines de choc thermique (HSP). Bien que le protocole d'exposition (pré- *vs* postnatal), la durée d'exposition (aiguë *vs* chronique) ainsi que l'espèce animale (souris *vs* rat) soient différents, ces 2 études concordent sur l'absence de stress cellulaire

après exposition aux radiofréquences (Finnie *et al.,* 2009b ; Watillaux *et al.,* 2011). Ces études mériteraient d'être reproduites.

Les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient qu'aucun effet délétère de type stress oxydant incluant les protéines de choc thermique, à la fois *in vivo* et *in vitro*, que ce soit pour une exposition aiguë ou semi-chronique/chronique.

5.5.1.3 Effets sur la morphologie cérébrale

Les études disponibles ont investigué les effets de l'exposition aux radiofréquences sur l'hippocampe, le cervelet et la moelle épinière immatures.

Cobb *et al*. (2000) ont exposé des rats *in utero* (GD3 jusqu'à la naissance) ou de façon pré- et post- natale (GD 3 à PND 10) à un champ électromagnétique large bande (UWB) 24 h / 24, 7 j / 7. Le but de l'étude est d'observer les éventuels effets tératogènes d'une exposition pré- et postnatale aux radiofréquences. Le DAS a été évalué à 45 mW/kg. Trois groupes ont été réalisés : un groupe exposé, un groupe contrôle négatif et un groupe contrôle positif auquel une solution de plomb a été administrée dans l'eau de boisson. Les nouveau-nés F1 qui ont été exposés de façon pré- et post- natale ont été utilisés pour examiner la morphologie de l'hippocampe sur coupe de cerveau colorées à l'hématoxyline-éosine en mesurant l'épaisseur de la couche des cellules pyramidales de l'hippocampe et des cellules granulaires du gyrus denté ainsi que la présence de cellules en dégénérescence (morphologie et intensité de coloration) dans le gyrus denté.

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

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

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

Maskey *et al*. (2010b) ont étudié les effets des radiofréquences (GSM 835 MHz) sur 2 protéines liant le calcium (la calrétinine (CR) et la calbindine D28-k (Calb)) dans l'hippocampe de souris ICR mâles de 6 semaines. Six protocoles d'exposition ont été mis en œuvre : groupe contrôle, 1 h / jour 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 1 jour ou en continu pendant 1 mois avec un DAS de 1,6 W/kg. Le calcul du DAS repose sur une estimation du champ dans la cage et non sur une mesure directe. L'exposition semble correctement maîtrisée. L'expression des protéines a été mise en évidence par immunohistochimie.
L'évaluation densitométrique du marquage dans 5 sous-régions de l'hippocampe montre soit une augmentation, soit une diminution, soit une absence de modification de l'expression de protéines. Ces résultats dépendent de la sous-région de l'hippocampe considérée, de la protéine étudiée, de 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 de mettre en évidence un effet net d'un des facteurs. Enfin, les modifications, bien que significatives, sont pour l'essentiel de faible amplitude (< 10%, rarement 20 %), ce qui explique en partie l'impossibilité de faire émerger l'influence de l'un ou l'autre des facteurs cités plus haut (structure, type de protéines, durée et intensité de l'exposition) (Maskey, *et al*. 2010b).

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

La 2nde étude proposée (voir chapitre 5.5.1.2) par les mêmes auteurs s'est intéressée aux effets d'une exposition chronique (3 mois, GSM 835 MHz, DAS de 1,6 W/kg) sur la calbindine D28-K chez des souris ICR mâles de 6 semaines (Maskey, *et al*. 2010a). Les résultats montrent une diminution significative de l'immunoréactivité dans les différentes sous-régions de l'hippocampe. Les baisses observées atteignent au maximum 8-10 %. Une augmentation du marquage de la GFAP au niveau des astrocytes est constatée, ainsi qu'une altération de la viabilité cellulaire (correspondant à une augmentation du marquage TUNEL). Selon les auteurs, celle-ci est à mettre en lien avec une augmentation de l'inflammation et de l'expression de protéines liant le calcium (telles que la calbindine D28-k et la calrétinine).
Les auteurs concluent à des effets potentiellement plus délétères sur les neurones de l'hippocampe liés à une exposition longue par rapport à une exposition plus courte (en comparant leurs résultats à ceux de leur précédente étude).

En raison d'importantes limites méthodologiques, les résultats des études suivantes n'ont pas pu être exploités :

- Albert et Sherif (1988) ont exposé des ratons de 1 et 6 jours à un signal continu CW de 2,45 GHz, pendant 3,5 h deux fois par jour pendant 5 jours. Le DAS moyen a été estimé par calcul à 2 W/kg. La morphologie du cervelet a été examinée qualitativement par microscopie électronique puis une coloration par hématoxyline/éosine et thionine a été réalisée pour analyser par microscopie optique la morphologie et le nombre des cellules de la couche externe granulaire (EGL), des cellules de Purkinje et des cellules mononuclées sanguines (extravasion). La très forte exposition (entre 20 et 335 V/m, estimée à environ 195 V/m en moyenne pour le champ électrique incident dans les cages par les auteurs) n'est pas représentative d'une exposition due aux systèmes de communication sans-fil (antennes-relais, Wi-Fi, *bluetooth*, *etc.*). La séparation de ratons aussi jeunes de leurs mères pendant 7 h par jour représente un stress important, et aucune donnée sur l'environnement thermique notamment de l'exposition n'est précisée, sachant qu'à cet âge les ratons sont incapables de réguler leur température. Aucune information n'est disponible sur l'état physiologique des jeunes rats (croissance, température….).
- Odaci *et al.,* (2008) ont exposé des rates en gestation à un signal continu de type CW de 900 MHz (DAS estimé à 2 W/kg) et ont étudié les coupes histologiques du gyrus denté de l'hippocampe. La description du système d'exposition est très succincte. Les animaux ont été exposés à une forte intensité de champ électrique (~195V/m en moyenne), non représentative d'une exposition à des systèmes sans-fil (antennes-relais, Wi-Fi, *bluetooth*, *etc.*). De plus, si les auteurs ont apparemment mis en place un groupe « contrôle cage », dont les animaux n'ont pas été manipulés, il manque un groupe d'exposition factice (témoin). Le groupe des animaux exposés subit en effet une contention dans un tube, occasionnant un niveau de stress majeur et donc des conditions expérimentales différentes entre les groupes d'animaux comparés.

- Ikinci *et al.* (2013) ont exposé des rates en gestation (GD 13 – GD 21), 1 h par jour pendant 8 jours à un signal CW 900 MHz. La description du système d'exposition est très succincte et la valeur de DAS n'est pas renseignée. Des tests de mémoire spatiale (*radial maze*), d'évitement passif (*light-dark box*), d'activité locomotrice (*test open field*) et la morphologie de l'hippocampe au 32ème jour postnatal (coloration violet de crésyl) ont été réalisés (voir

résultats au paragraphe 5.5.2.2). Comme dans l'étude précédente, le groupe contrôle est un groupe *home-cage* et non un groupe d'exposition factice (*sham*). Les anomalies morphologiques de l'hippocampe sont illustrées par 3 photos de mauvaise qualité, sans tentative de quantification ou semi-quantification.

- La même équipe (Odaci *et al*., 2013) a répliqué ce protocole d'exposition pour étudier le comportement moteur et la morphologie de la moelle épinière. À partir du 26ème jour post-natal, les fonctions motrices ont été évaluées par le test de la roue rotatrice et l'activité locomotrice dans un champ ouvert (voir résultats au paragraphe 5.5.2.2). L'évaluation uniquement qualitative de la morphologie de la moelle épinière ne permet pas de rendre compte objectivement de l'existence d'anomalies, la figure 4 ne montrant que des coupes histologiques de rats exposés aux radiofréquences, mais pas de rats du groupe contrôle, rendant impossible toute comparaison qui, de plus, ne serait que qualitative.

- Köktürk *et al.,* 2013 ont exposé des rats 30 min par jour, lors de la gestation jusqu'au 80ème jour postnatal, à un téléphone GSM 900 MHz avec un groupe sham d'exposition factice, un groupe d'exposition aux champs électromagnétiques, et un groupe d'exposition aux champs électromagnétiques supplémenté en extrait de tomate (*Lycopersicon esculentum*) 2 g/kg/j. Le nombre de cellules de Purkinje et de cellules granulaires du cervelet caspase 3 positives (marqueur d'apoptose) a été compté. Une coloration au crésyl violet a été utilisée pour identifier les modifications liées à un processus de neurodégénération. Le DAS n'est ni mesuré ni calculé. La date du début de l'exposition n'est pas mentionnée, le nombre de rats dans l'étude n'est pas précisé et les conditions environnementales ne sont pas maîtrisées.

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

Chez l'animal, les résultats sont inconsistants, parfois aux dires mêmes des auteurs. En effet, Kumlin *et al.* (2007) ne rapportent pas d'effet, alors que Maskey *et al.,* (2010a et 2010b) rapportent des modifications de la structure de l'hippocampe. L'étude de Cobb *et al.,* (2000) montre quelques effets que les auteurs ne retiennent pas.

Compte tenu du faible nombre d'études ayant investigué cet effet, il est impossible, à ce jour, de conclure à un effet ou non des radiofréquences sur la morphologie de l'hippocampe.

Les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient qu'il était difficile de conclure à l'existence ou non d'un effet biologique des radiofréquences sur le nombre, la morphologie des neurones et la mort cellulaire dans les conditions expérimentales testées.

5.5.1.4 Effets sur l'activité électrique cérébrale

Certains auteurs se sont intéressé aux effets d'une exposition aux RF sur l'excitabilité cérébrale chez des individus sains ou plus généralement sur l'activité électrique cérébrale (EEG, potentiels évoqués…) parfois en lien avec la réalisation de tâches cognitives. Ces études ont été analysées dans les précédents rapports Afsset 2009 et Anses 2013.

Krause *et al.* (2006) ont réalisé des enregistrements électro-encéphalographiques (EEG) sur 15 enfants (6 garçons et 9 filles) âgés de 10 à 14 ans soumis à des tests de mémoire auditive

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

Loughran *et al*. (2013) se sont intéressé à la sensibilité potentielle aux champs électromagnétiques émis par les téléphones mobiles chez 22 adolescents de 11 à 13 ans. Le protocole en double aveugle, échantillonné de façon aléatoire, comprenait trois sessions à une semaine d'intervalle. À chaque session, les adolescents ont été soumis à un signal de type GSM à 900 MHz, à 2 niveaux différents d'intensité d'exposition ($DAS_{élevé}$ = 1,4 W/kg ; DAS_{faible} = 0,35 W/kg), et à une exposition factice. L'exposition a duré 30 min pendant lesquelles des tests cognitifs ont été réalisés (voir paragraphe 5.5.2.1.1). Un EEG de base (3 min yeux clos, 3 min yeux ouverts) a été réalisé avant l'exposition. Puis d'autres EEG ont été enregistrés immédiatement, 30 et 60 min après l'exposition. 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 soit possible de les interpréter comme un effet de l'exposition. En effet, les auteurs mentionnent la forte variabilité interindividuelle dans les résultats de l'EEG, d'autant plus importante lors de l'enfance et l'adolescence.

Les articles de Croft *et al.* (2010) et de Leung *et al.* (2011) présentent les deux volets d'une étude réalisée avec les mêmes volontaires soumis aux mêmes conditions d'exposition. Ils ne diffèrent que par les effets étudiés :

- le rythme *alpha* de repos (Croft *et al.*, 2010) ;
- la réalisation de deux tâches cognitives (Leung *et al.*, 2011).

La population étudiée comprend 3 groupes de sujets sains :

- 41 adolescents âgés de 13 à 15 ans, dont 21 de sexe masculin ;
- 42 adultes âgés de 19 à 40 ans, dont 21 de sexe masculin ;
- 20 de sujets âgés de 55 à 70 ans, dont 10 de sexe masculin.

Le protocole a comporté 3 sessions correspondant à 3 conditions d'exposition différentes (2G, 3G et simulée) qui se sont déroulées à au moins 4 jours d'intervalle dans un ordre tiré au sort selon une procédure en *cross-over* et double aveugle (voir détails des protocoles d'exposition et d'enregistrement EEG dans rapport publié par l'Anses en 2013). L'exposition 2G a été réalisée à l'aide d'un téléphone du commerce émettant un signal GSM 894,6 MHz, modulé à 217 Hz, et de puissance moyenne de 250 mW. L'exposition 3G a été réalisée avec une antenne monopole insérée dans un boîtier téléphonique et alimentée par une source de RF simulant un signal W-CDMA (1 900 MHz, 125 mW). Les 2 appareils ont été entièrement insonorisés et placés en position « *touch* » (contre la joue). Les niveaux maximum des DAS_{10g}, mesurés et calculés selon les méthodes classiques, ont été de 0,7 W/kg avec l'exposition 2G et de 1,7 W/kg avec l'exposition 3G. La position des téléphones, un du côté droit et l'autre du côté gauche, a été répartie par tirage au sort entre les sujets.

Croft *et al.* (2010) ont étendu leurs études de 2002 et 2008, qui montraient une augmentation de la puissance *alpha* de l'EEG sous exposition 2G chez l'adulte jeune, à des adolescents et à des sujets âgés, ainsi qu'à l'étude des effets d'une exposition 3G sur la puissance *alpha* dans les trois groupes. Le protocole d'exposition alternait exposition, EEG et réalisation de tâches cognitives (voir rapport publié par l'Anses en 2013). Un test de Thayer a été pratiqué avant, pendant et après exposition, en dehors des périodes d'enregistrement des EEG, pour déterminer le niveau de vigilance. Les résultats ont été les suivants :

- une augmentation significative de la puissance *alpha* a été observée sous exposition 2G, en comparaison avec l'exposition simulée, chez l'adulte jeune. Cette augmentation a été faible (+10 %) et n'a pas été retrouvée en période post-exposition. De plus, elle a été accompagnée d'une tendance non-significative à l'augmentation de l'activation psychologique au test de Thayer, résultat qui, s'il était confirmé ultérieurement, serait un argument en faveur de l'hypothèse d'une augmentation de l'excitabilité corticale sous exposition 2G ;
- cette augmentation de la puissance *alpha* sous exposition 2G n'a pas été retrouvée chez les adolescents et les sujets âgés. De même, il n'y a pas eu de modification du test de Thayer chez ces sujets. Pour les auteurs, ces résultats ne signifient pas que l'exposition 2G n'a pas eu d'effet dans ces 2 groupes d'âge, mais que les effets, s'ils existent, sont moindres que dans le groupe des adultes ;
- sous exposition 3G, aucune différence signicative de puissance *alpha* n'a été observée par rapport à l'exposition simulée (Croft, et al. 2010).

Les auteurs proposent 2 explications à cette différence d'effet entre les expositions 2G et 3G :

- La première est que les signaux 2G ayant une fréquence plus basse (900 MHz) que les signaux 3G (1 900 MHz), ils pénètreraient davantage dans le cerveau ;
- La seconde est que la modulation de fréquence des signaux 2G (217 Hz), qui est différente de celle des signaux 3G, serait à l'origine de l'effet.

L'étude de Leung *et al.* (2011) a comporté la réalisation de deux tâches cognitives et l'enregistrement des potentiels évoqués correspondants.
1) La première tâche a été une tâche de discrimination de signaux auditifs discordants (*oddball paradigm*). Cette tâche provoque l'apparition de 3 potentiels évoqués : N1 (apparaissant entre 50 et 150 ms dans les régions centrales, ce qui correspond à un traitement auditif précoce), P3a (apparaissant entre 200 et 400 ms dans les régions frontales, ce qui correspond à la réponse du cerveau à un *stimulus* nouveau requérant de l'attention) et P3b (apparaissant entre 300 et 500 ms, ce qui correspond à un traitement cognitif tardif).
2) La seconde tâche a été une tâche *N-back* visuelle. Cette tâche provoque l'apparition de potentiels évoqués précoces (P1 entre 40 et 90 ms et N1 entre 90 et 140 ms) et modifie le rapport en fonction du temps entre la désynchronisation (ERD) et la synchronisation (ERS) des rythmes *alpha* (rapport ERD/ERS).
Les résultats ont été les suivants :

- lors de la tâche de discrimination de signaux auditifs discordants :
  - aucune différence n'a été observée pour les paramètres électrophysiologiques P3a et P3b, ce qui conforte les données cognitives ;
  - une augmentation significative de l'amplitude de N1 a cependant été observée entre l'exposition 2G et l'exposition simulée (mais pas entre l'exposition 3G et l'exposition simulée), sans interaction avec les 3 groupes d'âge.
- Lors de la tâche *N-back :*
  - les pourcentages de réponses correctes ont été significativement diminués ;
  - parallèlement, la réponse du rapport désynchronisation/synchronisation (ERD/ERS) des rythmes *alpha* a été significativement retardée sous les expositions 2G et 3G par rapport à l'exposition simulée, sans interaction avec l'âge mais avec une tendance non significative à un effet plus marqué chez les adolescents que chez les adultes ou les sujets âgés.

Ce retard, généralement considéré comme traduisant une altération de l'activation corticale, est en accord avec la baisse de la performance cognitive (Leung, *et al*. 2011).
Cette étude complexe est originale et rigoureusement menée dans tous ses aspects, y compris la discussion.

En raison d'importantes limites méthodologiques, les résultats de l'étude suivante n'ont pas pu être exploités :

Kramarenko et Tan (2003) ont étudié les effets d'une exposition cérébrale à un téléphone mobile GSM classique (fréquence 900 MHz, modulation 217 Hz) sur l'EEG de 10 jeunes hommes sains et de 10 enfants âgés de 12 ans. La description du protocole est très incomplète et centrée sur le système d'enregistrement de l'EEG. Il s'agit d'un système original de télémétrie, développé par l'un des auteurs (sans qu'aucune référence ne soit fournie, notamment de validation) De même, aucune indication méthodologique n'est fournie pour l'analyse spectrale et la reconstruction 3D. Les sujets semblent avoir été exposés à deux téléphones : un téléphone habituel et le téléphone mobile. Mais rien n'est dit sur les conditions de leur utilisation, simultanée ou successive, ni sur leur localisation et les moyens utilisés pour assurer la fixité de leur position par rapport à la tête, ni même sur la durée de l'exposition. La distribution dans la tête du signal GSM émis par le téléphone mobile a été étudiée à l'aide d'un fantôme mais aucune valeur de DAS n'est fournie.

Excitabilité corticale par les radiofréquences

Le rapport publié par l'Afsset en 2009 sur les radiofréquences et la santé avait analysé 2 études concernant l'impact d'une exposition aiguë aux radiofréquences sur l'excitabilité corticale mesurée par STM (stimulation trans-crânienne magnétique) : Ferreri *et al.,* 2006 et Inomata-Terada *et al.,* 2007. Ferreri *et al.* (2006) ont testé l'excitabilité corticale (mesure des potentiels évoqués moteurs) de chaque hémisphère cérébral avant et après exposition aux radiofréquences générées par un téléphone mobile (GSM 900 MHz) pendant 45 min sur 15 volontaires sains. Ils montrent une modification significative des courbes d'excitabilité avec une baisse de l'inhibition et une augmentation de l'excitation (facilitation) intra-corticale dans l'hémisphère exposé aux radiofréquences, par rapport au côté non exposé ou à l'exposition factice aux radiofréquences. En revanche, Inomata-Terada *et al.* (2007) ne montrent aucun effet (excitation ou inhibition) au niveau du cortex moteur, du tronc cérébral et de la moelle épinière d'une exposition à un téléphone mobile (800 MHz) pendant 30 min chez 10 volontaires sains.

Ces travaux concernant l'excitabilité corticale restent rares et méritent d'être complétés. De plus, aucune étude n'a porté spécifiquement sur les enfants ou le cerveau immature dans des modèles expérimentaux. Enfin, considérant que l'épilepsie est une pathologie neurologique qui relève d'une hyper-excitabilité neuronale et/ou d'une anomalie de la synchronisation de populations de neurones, la question des effets des radiofréquences sur l'épilepsie, pathologie qui touche en particulier l'enfant reste posée. Ce thème est abordé en annexe 6, bien qu'il n'y ait à notre connaissance aucune étude n'ayant fait le lien entre l'exposition aux radiofréquences et la survenue de crises d'épilepsie ou d'une pathologie épileptique chez l'enfant.

Les deux études chez l'enfant/adolescent sont cohérentes et mettent en évidence des différences légères à modérées dans le tracé électro-encéphalographique dans les bandes de fréquence thêta (4-8 Hz) et béta (12-15 Hz) (Krause *et al.,* 2006 ; Loughran *et al.,* 2013) chez les enfants exposés, avec une variabilité inter-individus élevée. Les mécanismes et les conséquences médicales de ces modifications restent à étudier. Les études de Croft (2010) et Leung et al (2011) sont le prolongement / complément d'études de ce même groupe chez des individus de différentes tranches d'âges.

Rappelons que, sur la base de 4 études qui avaient exploré des critères différents (Carrubba *et al*. 2010, Croft *et al*. 2010, Vecchio *et al*. 2010, Leung *et al*. 2011), les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient que l'exposition aiguë aux radiofréquences pourrait avoir un effet sur l'activité électrique du cerveau notamment celle liée au rythme alpha, caractéristique de l'état de veille calme. De plus, sur la base de cette analyse, il avait été suggéré que cet effet dépendrait de l'âge des sujets. En ce qui concerne l'enfant ou l'adolescent, les 2 études de Croft et Leung mettent en évidence soit un effet plus marqué, soit moins marqué, soit aucune différence par rapport à la réponse électrique du cerveau l'adulte.

Ces données chez l'adulte qui montrent des modifications de l'activité électrique cérébrale sous l'effet des radiofréquences n'ont cependant pas montré que l'exposition aiguë aux radiofréquences affecte l'activité épileptique (survenue des crises, activité ictale et interictale) chez des patients atteints d'épilepsie (une étude, voir Annexe 6 pour le paragraphe sur l'épilepsie). Le lien entre les modifications électriques observées et une pathologie reste donc à démontrer.

Tableau 17 : 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 *(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*	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 *et al*. 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 *et al*. 2010a	GSM 835 MHz DAS = 1,6 W/kg 8 h/jour pendant 3 mois.	Souris 6 semaines	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 *et al*. 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.		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.

Tableau 18 : 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.

Référence	Population	Effets étudiés	Caractérisation de l'exposition	Nombre de sujets	Résultats *(se référer au texte pour les commentaires)*
Krause *et al.*, 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 periode 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 béta (12-15 Hz), pendant la période de codage des stimuli auditifs, et de reconnaissance d'un mot présenté antérieurement ou non.
Croft *et al.,* 2010	- adolescents (13 à 15 ans) - adultes (19 à 40 ans) - sujets âgés (55 à 70 ans)	rythme *alpha* de repos (électroencéphalogramme) Test de Thayer	- 2G (téléphone mobile GSM 894,6 MHz, modulé à 217 Hz, 250 mW), DAS_{10g} = 0,7 W /kg - 3G (antenne W-CDMA (1 900 MHz, 125 mW) DAS_{10g} = 1,7 W/kg	n = 41 adolescents n = 42 adultes n = 20 sujets âgés	Sous exposition 2G, augmentation de la puissance *alpha* et tendance non-significative à l'augmentation de l'activation psychologique au test de Thayer chez les adultes mais pas chez les adolescents ni les sujets âgés. Sous exposition 3G, aucune différence signicative de puissance *alpha* quel que soit l'âge des sujets.
Leung *et al*. (2011) (suite de Croft *et al.* (2010))		Tests cognitifs + enregistrement des potentiels évoqués			Aucune différence observée pour les paramètres électrophysiologiques. Augmentation significative de l'amplitude de N1 lors de l'exposition 2G (mais pas entre l'exposition 3G), sans interaction avec les 3 groupes d'âge. Diminution du pourcentage de réponse correcte (tâche N-back). Retard significatif des rythmes *alpha* sous les expositions 2G et 3G par rapport à l'exposition simulée, sans interaction avec l'âge mais avec une tendance non significative à un effet plus marqué chez les adolescents que chez les adultes ou les sujets âgés.

Référence	Population	Effets étudiés	Caractérisation de l'exposition	Nombre de sujets	Résultats *(se référer au texte pour les commentaires)*
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. 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.

5.5.2 Effets sur les fonctions cognitives et le comportement

5.5.2.1 Études chez l'homme

5.5.2.1.1 Études de type expérimental

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

Preece *et al.* (2005) ont effectué une série de tests de cognition issus de ceux habituellement utilisés pour évaluer les effets des drogues (*Cognitive Drug Research*) sur 18 enfants âgés de 10 à 12 ans. Les sujets ont été exposés à un téléphone mobile selon 3 conditions différentes dans un ordre aléatoire le même jour (*off*, puissance maximale à 0,2 W ou à 2 W). Le DAS maximal a été estimé à 0,28 W/kg. Pour chaque test, trois types de performance ont été évalués : le temps de réaction, l'exactitude des réponses et l'index de sensibilité (qui mesure l'effet d'un évènement distrayant sur l'exactitude des réponses). L'accomplissement des séries de tests nécessite 30 à 35 minutes. Les résultats ont montré une diminution du temps de réaction en présence du signal GSM avec l'augmentation de la puissance, mais qui n'atteint plus le seuil de la significativité après correction de Bonferroni[38]. De même, une tendance à une plus grande exactitude et un plus grand index de sensibilité des résultats a été retrouvée chez les sujets exposés. Selon le HPA (2012), la correction de Bonferroni qui a été appliquée sur les résultats n'est pas appropriée dans ce cas, et peut donc être une hypothèse trop conservatrice, d'autant que des effets sur le temps de réaction ont déjà été observés dans le passé chez des adultes (Preece *et al*., 1999, Koivisto *et al*. 2000).

Kwon *et al.* (2010) ont exposé 17 enfants âgés de 11 à 12 ans à des radiofréquences (signal GSM). Le téléphone induit un pic de DAS de 1,28 W/kg (DAS moyen sur 10 g de tissu de 0,86 W/kg). Chaque participant a subi une exposition réelle et une exposition simulée de façon aléatoire, sur une oreille puis l'autre. Des *stimuli* auditifs ont été réalisés (un groupe de *stimuli* avec le téléphone fermé, et deux groupes de *stimuli* avec le téléphone émetteur). Un grand nombre de potentiels évoqués ont été mesurés, dont la négativité de discordance[39] (*mismatch negativity*)

[38] 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 %.

[39] 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.

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

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

Tableau 19 : études de provocation sur des enfants investiguant les effets d'une exposition aiguë aux radiofréquences.

Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Référence	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) = 0,99 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 (*Cognitive Drug Research*) 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 1ère fois chez l'enfant, le paradigme de recherche de la négativité de discordance avec 4 caractéristiques déviantes (*multifeature paradigm*) 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.

5.5.2.1.2 Études épidémiologiques

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

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

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

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

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

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

Les principales critiques de cette étude résident dans le fait que l'exposition prénatale ait été estimée 7 ans après la grossesse, que les troubles du comportement aient été appréciés par les mères, et que les questions évaluant les problèmes comportementaux et celles portant sur l'utilisation de téléphones mobiles aient été placées au sein d'un même questionnaire, ce qui pourrait avoir entraîné des biais. L'évaluation de l'exposition 7 ans après la grossesse est forcément moins précise qu'une évaluation en temps réel, mais n'implique pas que l'association

entre l'exposition et les effets observés est faussée. De plus, les auteurs écartent la possibilité de biais potentiellement provoqués par l'évaluation de l'exposition et des problèmes comportementaux au sein du même questionnaire, car l'interprétation du questionnaire *strength and difficulties* se fait à partir des scores obtenus à 25 items différents ; il est de ce fait difficile d'envisager qu'une réponse systématiquement biaisée ait été rapportée par les mères d'enfants ayant des problèmes par comparaison avec les autres mères ; de même, les mères n'avaient vraisemblablement pas connaissance du mode de détermination du diagnostic à partir de leurs réponses.

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

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

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

Guxens, *et al.* (2013a) ont réalisé une étude de cohorte de 8 266 mères enceintes (cohorte ABCD, *Amsterdam Children and their development*) aux Pays-Bas pour étudier la relation entre l'exposition au téléphone mobile et les troubles du comportement chez 2 618 enfants de 5 ans. Les mères ont été recrutées entre janvier 2003 et mars 2004. L'évaluation de l'usage de téléphone mobile et de téléphone sans-fil DECT par la mère pendant la grossesse a été évalué rétrospectivement par un questionnaire lorsque l'enfant avait 7 ans, et les troubles du comportement ont été rapportés à l'aide du questionnaire *strengths and difficulties* par l'enseignant et les parents lorsque l'enfant avait 5 ans. De nombreux facteurs de confusion ont été pris en compte lors de l'inclusion des mères, notamment l'anxiété et la dépression ressenties par la mère. Une association non significative est observée lorsque les troubles de comportement

sont rapportés par le professeur. Aucune association avec l'augmentation de l'usage du téléphone mobile de la mère n'est observée. Les limites de cette étude concernent à la fois le faible taux de participation (37 %) et l'évaluation rétrospective de l'exposition, réalisée 7 ans après la naissance, alors que les troubles du comportement étaient évalués à 5 ans. Cependant, la déconnexion entre le temps de recueil de l'exposition et celui des troubles du comportement évite un biais différentiel de mémorisation.

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

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

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

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

préoccupation sur les sujets environnementaux, utilisation auto-rapportée de téléphone mobile ou sans fil, distance auto-rapportée entre la maison et l'antenne relais la plus proche.

Dans la discussion, les auteurs précisent que le questionnaire SDQ est fiable quand il est possible de collecter les données par 2 sources différentes (autoévaluation et parents, ou parents et professeur). Or, le questionnaire a été utilisé en autoévaluation seul pour les adolescents. Une analyse de sensibilité a été réalisée avec les données obtenues pour les enfants de 8 à 12 ans. Les résultats ne montraient pas d'association entre l'exposition aux radiofréquences et des troubles du comportement chez les enfants et étaient comparables avec l'analyse principale. De ce fait, les auteurs supposent que les résultats pour les adolescents étaient fiables aussi, bien que le questionnaire ait été utilisé en autoévaluation seulement.

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

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

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

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

nombreux facteurs de confusion ont été pris en compte (revenu du ménage, lieu d'habitation, taille de la fratrie, maladie psychiatrique, tabagisme de la mère pendant la grossesse). Les symptômes d'hyperactivité sont associés à un usage du téléphone mobile en mode appel (indicateur : temps moyen passé en appels vocaux), seulement chez des enfants dont la plombémie est supérieure à 2,35 µg / dl [40]. Il existe une tendance entre l'hyperactivité et l'intensité de l'usage du téléphone mobile utilisé en communication ou pour des jeux, uniquement chez les enfants dont la plombémie est supérieure à 2,35 µg / dl. Cette étude évalue l'interaction entre l'usage du téléphone mobile et la plombémie, sur des populations spécifiques (fragilisées par le plomb).

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

Études sur les fonctions neurocognitives d'enfants exposés (ou non) aux radiofréquences d'un radar au-delà de la petite enfance (> 6 ans)

Kolodynski *et al* (1996) ont étudié trois populations d'enfants de Lituanie : une population « exposée » aux radiofréquences d'un radar militaire émettant dans la gamme de fréquence 154-162 MHz, une population de la même zone géographique (Skrunda) exposée à un niveau de base (zone en arrière du radar) et une population « témoin » appariée sur l'âge et le sexe dans une autre zone à distance du radar. Si l'exposition dans la zone non exposée de Skrunda est notée comme étant à un niveau de fond, il n'est pas dit quel est le niveau de la zone témoin. En raison de la variation des niveaux d'exposition, et bien que les auteurs disent que celle-ci diminue avec la distance, il n'y a pas eu d'essai de caractérisation individuelle de l'exposition des sujets de la zone exposée. Des tests cognitifs ont été réalisés (*tapping test*, temps de réaction, test d'attention, test de mémoire) ; les tests statistiques pratiqués sont essentiellement des tests de comparaison de moyenne (Student) : les performances à chaque test ont été moyennées par classe d'âge et par sexe pour chaque population.

Si les tests neurocognitifs sont bien décrits et paraissent être réalisés de manière totalement satisfaisante et sur un nombre conséquent d'enfants, il est difficile de tirer des conclusions de cette étude qui ne procède pas à une évaluation globale de la relation dose-effet, et ne tient compte ni de la multiplicité des tests, ni des facteurs confondants possibles ; en particulier si les auteurs précisent que les zones sont comparables (zone agricole, taux de pollution faible, milieu socioéconomique) les données ne permettent pas de savoir si les populations elles-mêmes sont identiques (niveau social, origine des parents, *etc*.). Les conditions de sélection des populations (pourquoi par exemple passe-t-on de 966 enfants à 609 étudiés) ne sont pas explicitées, et la caractérisation de l'exposition reste très fruste.

Enfin, les puissances mises en jeu ne sont pas comparables avec celles caractérisant l'exposition des enfants en population générale à l'heure actuelle. En raison des niveaux d'exposition, cette étude ne peut pas être retenue dans le cadre de la saisine.

[40] 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.

Tableau 20 : 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)*
Étude de cohorte rétrospective *Danish National Birth Cohort*	Enfants danois nés entre 1996 et 2002	Divan *et al.*, 2008	13 159 mères répondant pour les enfants nés entre 1997 et 1999 (12796 + 363 jumeaux et triplés)	Exposition au téléphone mobile Exposition *in utero* 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 (*Strengths and Difficulties questionnaire*)	Association avec les troubles du comportement général de l'enfant : • Exposition pendant les périodes pré- et post-natale après ajustement (OR = 1,80 [1,45-2,23]).
		Divan *et al.*, 2010 (suite de Divan *et al.*, 2008)	12 796 enfants de la 1ère analyse + 28 745 enfants d'une nouvelle vague d'inclusion nés entre 1998 et 2002 (exclus les jumeaux et triplés)			Association avec les troubles du comportement à l'âge de 7 ans après ajustement : • 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 *et al.*, 2011			Retard cognitif et du développement à 6 et à 18 mois (questionnaires non standardisés)	Absence d'association entre l'exposition au téléphone mobile pendant la grossesse et un retard cognitif ou de développement de l'enfant à 6 mois ou/et à 18 mois.

Type d'étude	Population	Publication	Nombre de sujets	Caractérisation de l'exposition	Effets étudiés	Résultats *(se référer au texte pour les commentaires)*
		Guxens *et al.,* 2013	2618 enfants	Exposition au téléphone mobile pendant la grossesse Exposition auto-déclarée et rétrospective par questionnaire	Troubles comportementaux Questionnaire SDQ (*Strengths and Difficulties questionnaire*) rempli par instituteur et parents	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.
		Sudan *et al.,* 2013b (réponse à Guxens *et al.,* 2013)	52 680 enfants	Exposition au téléphone mobile pendant la grossesse Exposition auto-déclarée et rétrospective par questionnaire	Troubles comportementaux évalués à 7 ans par la mère Questionnaire SDQ (*Strengths and Difficulties questionnaire*)	Association significative entre l'utilisation du téléphone mobile par la mère pendant la grossesse et les problèmes du comportement chez l'enfant. Relation dose-réponse entre la fréquence d'utilisation et la survenue de troubles du comportement chez l'enfant.
Étude transversale	Enfants de 11 à 14 ans recrutés entre 2005 et 2006	Abramson *et al.,* 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.

Type d'étude	Population	Publication	Nombre de sujets	Caractérisation de l'exposition	Effets étudiés	Résultats *(se référer au texte pour les commentaires)*
Étude de cohorte	Enfants de 14 mois.	Vrijheid *et al.*, 2010	530 enfants	Exposition au téléphone mobile Exposition auto-déclarée : Évaluation de l'exposition maternelle à 32 semaines de grossesse *in utero* et durant la petite enfance	Développement mental et psychomoteur (évalués par le « *Bailey Scales of infant développent* »)	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.
Étude transversale *German MobilEe-study*	Enfants de 8 à 12 ans Adolescents de 13 à 17 ans	Thomas *et al.*, 2010a	1 498 enfants 1 508 adolescents	Exposition au téléphone mobile Mesures pendant 24h avec dosimètre individuel Exposition auto-déclarée : 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 (*Strengths and Difficulties questionnaire*)	Troubles du comportement et quartile d'exposition le plus élevé : • 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

Type d'étude	Population	Publication	Nombre de sujets	Caractérisation de l'exposition	Effets étudiés	Résultats *(se référer au texte pour les commentaires)*
	Enfants de 12-13 ans au début de l'étude, recrutés entre 2005 et 2006	Thomas *et al.,* 2010b	238 enfants avec suivi longitudinal	Exposition au téléphone mobile Questionnaire	Fonctions cognitives Tests psychométriques (*Stroop test* et du *CodHealth test*)	Au début : • pas d'association entre les nombres d'appels et sms et les différences de scores du Stroop test et du *CodHealth test* ; • augmentation du score pour le « *two back task* » et la « *one card learning task* » (environ 7 tâches à accomplir). Au suivi : • pas d'association entre les différences de nombre d'appels et sms (au départ/ au suivi) et les différences de scores du *Stroop test* et du *CodHealth test* ; • diminution de scores pour le « *two back task* » ; • augmentation des scores pour le « *simple reaction time* ».
Étude transversale	Enfants de 6 à 17 ans	Byun *et al.,* 2013	2 422 enfants	Exposition auto-déclarée par questionnaire aux parents à l'inclusion et après 2 ans	Hyperactivité (version coréenne de l'*ADHD rating scale*) 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 et supérieure à 2,35 µg/dL.

5.5.2.2 Études chez l'animal

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

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

Les auteurs ne concluent pas à une réelle différence physiologique ou morphologique entre les groupes exposés et non exposés. Ils attribuent les associations significatives obtenues au grand nombre de paramètres mesurés et à la multiplicité des analyses statistiques réalisées. De plus, l'utilisation du témoin positif a prouvé que les analyses sont sensibles à la détection des paramètres investigués dans cette étude.

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

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

Takahashi *et al.* (2010) ont exposé des rats à un signal de fréquence 2,14 GHz (W-CDMA) 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 plus forte, et entre 0,026 et 0,067 W/kg pour l'exposition la plus faible. En plus des nombreux paramètres de développement physique et fonctionnel, de survie et de reproduction (voir § 1.3 et 1.4.2), la génération F1[41] a été examinée pour ses capacités en mémoire spatiale et pour l'activité locomotrice.

Quel que soit le DAS, l'exposition aux radiofréquences n'a affecté ni l'activité dans le test du champ ouvert chez les rats âgés de 5 à 8 semaines, ni leur performance en mémoire spatiale à court terme (30 min) dans la piscine de Morris évaluée chez des rats âgés de 9 semaines (Takahashi *et al.*, 2010).

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

Narayanan *et al.* (2013) ont étudié la relation possible entre une exposition 1 h / jour 28 jours à un téléphone mobile en mode silence (50 appels manqués/heure, GSM 900 MHz, DAS normatif = 1,15 W/kg pour les exposés[42]) chez des jeunes rats (6-8 semaines, n = 12 rats/groupe). L'activité locomotrice et l'anxiété ont été mesurées dans un labyrinthe en croix surélevée au 29e jour ; les rats contrôles étaient exposés au téléphone en mode *OFF*.

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

Maaroufi *et al.,* ont publié une série de 3 articles visant à étudier les effets exposition aux radiofréquences seules ou combinées à un traitement au fer sur des rats juvéniles sur certains paramètres du stress oxydant (voir description des études paragraphe 5.5.1.2) et sur les fonctions cognitives de l'animal (Maaroufi *et al.,* 2009, 2011 et 2014). Les animaux ont subi des tests cognitifs (piscine de Morris, labyrinthe radial à 8 branches et tests de reconnaissance d'objet en version spatiale ou non), un dosage de monoamines (sérotonine et dopamine) et de leurs métabolites, et une évaluation du stress oxydant dans 4 régions cérébrales.

Maaroufi *et al* (2009) ne mettent pas en évidence d'altération des performances des jeunes rats après 3 semaines d'exposition (début à 5 semaines postnatales) dans la piscine de Morris et le labyrinthe radial mesurant respectivement, la mémoire spatiale de référence (à long terme) et la mémoire de travail. La reconnaissance d'un objet déplacé (composante spatiale du test) est altérée par l'exposition aux radiofréquences qu'elle soit seule ou combinée à un traitement au fer, mais plutôt avec un déficit de moindre intensité que celui observé après un traitement au fer seul. Ceci semble montrer un effet plutôt protecteur des radiofréquences vis-à-vis d'une surcharge en fer. De plus, des modifications du métabolisme de la sérotonine, neurotransmetteur impliqué dans les processus mnésiques, ont également été mises en évidence mais seulement chez les rats traités au fer seul. Le fait que l'exposition aux champs électromagnétiques seuls ou combinés au fer n'ait pas de conséquences sur la sérotonine ou la dopamine, montre un effet protecteur des radiofréquences sur les effets délétères du fer. Le(s) mécanisme(s) de cette interaction entre champs électromagnétiques et surcharge en fer (comportementaux et biochimiques) n'est (sont) pas connu(s).

Les résultats de l'étude de 2014 sont concordants avec ceux de 2009. Les rats exposés aux radiofréquences (seules ou combinées avec un traitement au fer) présentent une altération des performances dans une tâche de reconnaissance d'objets (version spatiale, exploration d'un objet déplacé), mais pas de la mémoire spatiale en piscine de Morris ni la mémoire spatiale de travail dans un labyrinthe à 8 branches. Une altération de la concentration en monoamine est constatée dans différentes aires du cerveau et majoritairement dans l'hippocampe. Les rats recevant une co-exposition radiofréquences et sulfate de fer ne présentent pas de différence avec les rats exposés aux radiofréquences seules. Aucun des 2 traitements n'induit de stress oxydant, bien que

[42] 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.

quelques variations complexes des paramètres du stress oxydant aient été relevées (voir § 5.5.1.2). Les auteurs concluent à l'absence d'effets synergiques entre radiofréquences et des concentrations élevées en fer.
Il est regrettable qu'un groupe ayant reçu du sulfate de fer sans exposition aux radiofréquences mais subissant le même protocole d'exposition, n'ait pas été inclus dans l'étude et que la description du protocole d'exposition (méthode d'estimation du champ électrique, pesée du rat pour connaître la variation du DAS…) ne soit pas mieux détaillée.

Haghani *et al.*, 2013 ont exposé des rates en gestation à un signal pulsé de 900 MHz 6 h/jour pendant toute la durée de la gestation. Dix nouveau-nés dans chaque groupe ont subi une évaluation de leur comportement moteur (*rotarod*, et *wire grip test* ou test de suspension) et de leur activité locomotrice (test en champ ouvert) ainsi qu'une exploration des propriétés électrophysiologiques des cellules de Purkinje du cervelet (*ex vivo* sur tranche de tissu cérébral, technique du patch clamp). Le cervelet est une structure qui joue un rôle essentiel dans les comportements moteurs. Les résultats montrent que l'exposition prénatale aux radiofréquences n'affecte ni la force musculaire, ni l'équilibre et ni l'activité locomotrice globale des ratons exposés, par rapport aux témoins. Seul, le nombre de redressements est diminué dans le test du champ ouvert. Par contre, les auteurs notent des altérations des propriétés électrophysiologiques des cellules de Purkinje du cervelet issus des rats exposés aux radiofréquences avec des changements de leur activité spontanée, une baisse de leur excitabilité et des propriétés de décharges répétées de ces neurones en réponse à divers courants induits dans la préparation, ainsi qu'une baisse de la fréquence de décharge de ces mêmes cellules. Les auteurs notent que ces altérations ne sont pas en accord avec l'absence d'effets comportementaux de l'exposition aux radiofréquences et rapprochent leurs données de celles de Krause et al (2000, 2004, 2007) sur l'activité électrique cérébrale dont les modifications après exposition aux radiofréquences ne sont pas non plus corrélées avec des effets sur les fonctions cognitives.

En raison d'importantes limites méthodologiques, les résultats des études suivantes, provenant de la même équipe, n'ont pas pu être exploités :

- Ikinci *et al.* (2013) ont exposé des rattes en gestation (GD 13 – GD 21) 1 h par jour pendant 8 jours à un signal CW 900 MHz. La valeur de DAS n'est pas renseignée. Des tests de mémoire spatiale (*radial maze*), d'évitement passif (*light-dark box*) et d'activité locomotrice (*test open field*) ont été réalisés. La morphologie de l'hippocampe a été examinée au 32ème jour post natal avec un marquage au crésyl violet (voir résultats au paragraphe 5.5.1.3). La description du système d'exposition est très succincte. Le groupe d'exposition factice est en réalité un groupe contrôle cage, dont les animaux ne sont pas manipulés, tandis que le groupe exposé a subi une contention dans un tube, occasionnant un fort niveau de stress. Le niveau de stress dans les 2 groupes d'exposition n'est donc pas comparable, rendant ininterprétables les résultats des tests comportementaux.

- La même équipe (Odaci *et al.*, 2013) a répliqué ce protocole d'exposition pour étudier le comportement moteur et la morphologie de la moelle épinière. À partir du 28ème jour post-natal, les fonctions motrices ont été évaluées par le test de la roue rotatrice et l'activité locomotrice en champ ouvert (voir détails et analyse critique au paragraphe 5.5.1.3). De plus, dans le champ ouvert, les résultats ne mettent pas en évidence d'effet de l'exposition aux radiofréquences, y compris sur les défécations, contrairement aux dires des auteurs.

Le groupe de travail « Radiofréquences et santé », à l'occasion de son travail sur la mise à jour des connaissances concernant les effets sanitaires des radiofréquences publié le 15 octobre 2013, avaient identifié des études qui n'ont pas été prises en compte pour évaluer les effets des radiofréquences sur les fonctions cognitives, en raison d'importants biais méthodologiques (p184 – 186 du rapport de l'Anses publié en 2013). Parmi elles, les études concernant les animaux

juvéniles ayant été écartées sont les suivantes : Daniels *et al*. 2009, Aldad *et al*. 2012, Bouji *et al*. 2012b, Hao *et al.* 2013.

Tableau 21 : 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 24 h/24, 7 j/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 2 140 MHz DAS = 0,068-0,146 W/kg ou DAS = 0,026 – 0,067 W/kg 20 h/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 1 h/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 toilettages et des redressements.

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 2009	150 kHz DAS = 0,05 - 0,18 W/kg 1 h/j, 21 jours consécutifs Administration concomitante de sulfate de fer	Rat 4 semaines	Mémoire Dosages de catécholamines Stress oxydant	6 ou 8 animaux par condition	Absence d'effet du fer sur la mémoire spatiale de travail et de référence, mais affecte la composante spatiale dans la tâche d'exploration d'objets. Absence d'effet de l'exposition aux RF seules ou combinées au fer sur la mémoire spaciale (de travail et de référence), sur la détection de la nouveauté spatiale dans le test de reconnaissance d'objets et diminution du temps d'exploration. Absence d'effet sur les systèmes dopamine et sérotonine en cas de traitement concomitant RF + fer.
Hagani *et al.,* 2013	900 MHz, DAS = 0,5 - 0,9 W/kg 6 h/j pendant toute la durée de la gestation	Rat *In utero*	Comportement moteur Activité locomotrice Propriétés électrophysiologiques des cellules de Purkinje du cervelet	10 animaux par condition	Pas d'effets sur mortalité et poids des ratons, pas de modification des performances en rotarod test. Pas de modification de la force des muscles et d'équilibre. Pas d'effets de l'activité et exploration (open field) sauf diminution des redressements chez les exposés. Chez les exposés, altération de l'activité spontanée électrophysiologique des cellules de Purkinje, baisse de l'excitabilité et des propriétés de décharges répétées des neurones et baisse de la fréquence de décharge des cellules de Purkinje.
Maaroufi et al., 2014	GSM 900 MHz DAS = 0,05 - 0,18 W/kg 1 h/j, 21 jours consécutifs Administration concomitante de sulfate de fer	Rat 4 semaines	Tests comportementaux Dosages de catécholamines Stress oxydant	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.

5.5.2.3 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 (cette discussion est précisée au paragraphe 5.1). Des 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, la temporalité entre usage du téléphone mobile et effet sur le comportement ne peut être étudiée : l'exposition pourrait effectivement induire des perturbations comportementales mais celles-ci pourraient entrainer tout aussi bien un usage plus important du téléphone mobile.

Par conséquent, 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. Les éléments de preuves disponibles **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des radiofréquences sur le comportement des enfants (*cf.*Figure 36).

Chez l'animal juvénile, deux études se sont intéressé 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 e*t al.* (2000), Takahashi *et al.* (2010) et Haghani *et al.* (2013) 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 ou non** d'un effet des radiofréquences sur l'anxiété chez l'animal (*cf.* Figure 37).

Par ailleurs, les données de 5 études (Kumlin *et al.* (2007), Narayanan *et al.* (2012), Cobb e*t al.* (2000), Takahashi *et al.* (2010) et Haghani et al (2013)) **sont en faveur d'une absence d'effet** des radiofréquences sur l'activité locomotrice lors d'une exposition en période de développement chez l'animal dans les conditions expérimentales testées.

En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas conclure à l'existence ou non** de l'effet des radiofréquences sur le comportement de l'enfant (*cf.* Figure 38).

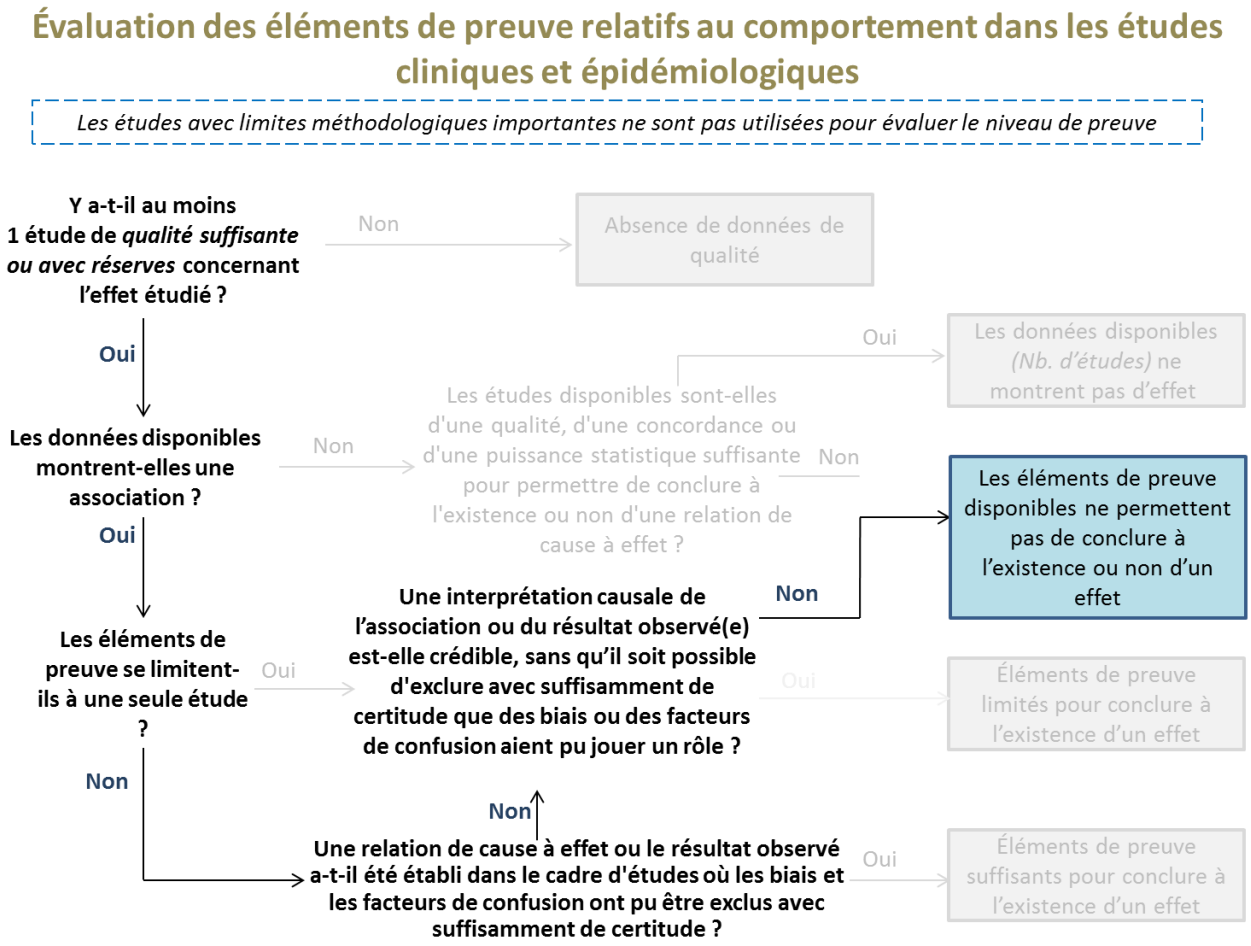


Figure 36 : évaluation des éléments de preuve relatifs au comportement dans les études cliniques et épidémiologiques.

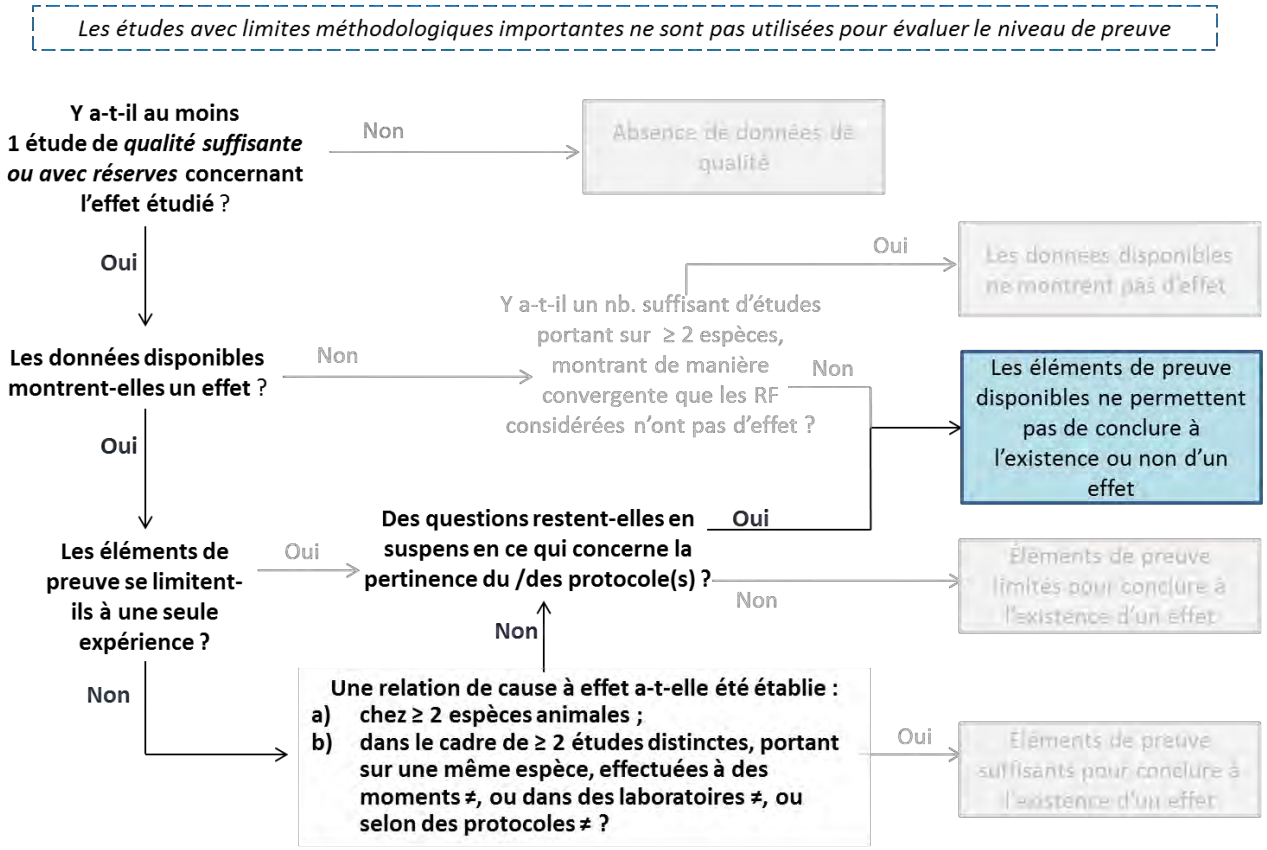


Figure 37 : évaluation des éléments de preuve relatifs au comportement dans les études sur les modèles animaux.

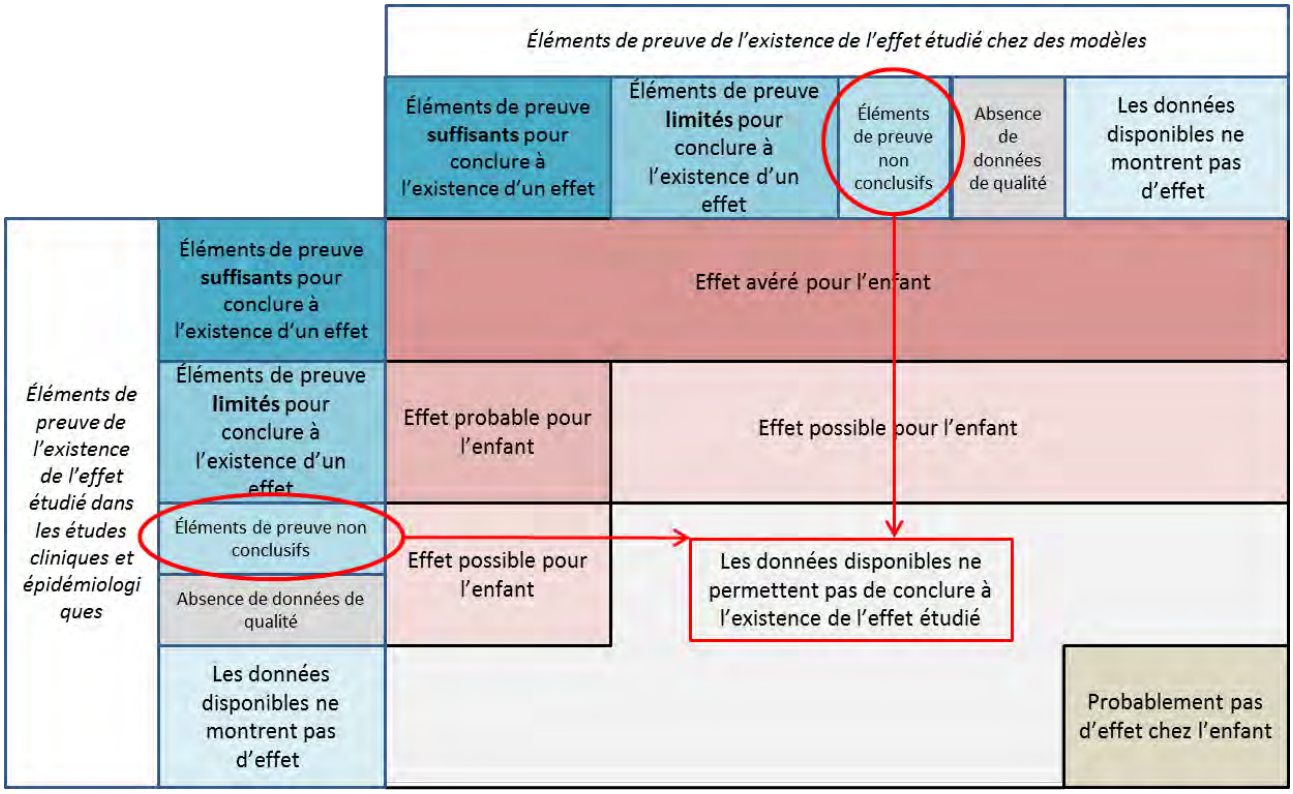


Figure 38 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le comportement chez l'enfant.

- Concernant les fonctions cognitives

Chez l'enfant, deux 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 trois des quatre 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. La 4e étude (Preece et al (2005) montre des effets similaires à ceux observés dans les études épidémiologiques, soit une baisse des temps de réaction mais contrairement à ces dernières, une amélioration de l'exactitude.

Il est important de rappeler que les études expérimentales investiguent des effets aigus, puisque l'évaluation cognitive est réalisée pendant l'exposition, alors que les études épidémiologiques mentionnées plus haut 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 ou non 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 béta (12-15 Hz) (Krause *et al.,* 2006 ; Loughran *et al.,* 2013) chez les enfants exposés, Ces deux catégories d'ondes sont associées aux états d'éveil actif et associés à des tâches et comportements focalisés, intégrés et aux capacités d'attention pour les ondes béta et à la mémoire, aux émotions et sensations pour les ondes théta, ces dernières reflètent l'activité du système limbique et notamment de l'hippocampe. Cependant, les mécanismes et les conséquences médicales de ces modifications sous l'effet des radiofréquences, s'ils existent, restent à étudier.

Par conséquent, les éléments de preuve disponibles permettent de conclure à un **effet limité** des radiofréquences sur les fonctions cognitives des enfants (*cf.* Figure 39).

Chez l'animal, aucun effet 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 (Cobb *et al*., 2000 ; Takahashi *et al*., 2010) ou uniquement postnatale aux radiofréquences (Maaroufi et al. (2009, 2014). Une amélioration des performances est observée après 5 semaines d'exposition chez le rat de 21 jours (Kumlin *et al*., 2007). Cependant, ces résultats ne sont pas retrouvés par Maaroufi *et al* (2009 et 2014) dans un protocole d'exposition similaire chez le rat âgé de 1 mois (3 semaines d'exposition). Ces derniers auteurs ne montrent pas d'effet de l'exposition postnatale sur la mémoire spatiale à court et à long terme testée en labyrinthe (aquatique ou non). En revanche, la reconnaissance spatiale d'objets est altérée (Maaroufi *et al.,* 2009 et 2014).

Chez l'animal, les éléments de preuve disponibles permettent de conclure à un **effet limité** des radiofréquences sur les fonctions cognitives de l'animal (Figure 40). Rappelons que les éléments de preuve avaient amené à conclure à un niveau de preuve limité chez l'animal adulte dans le rapport « Radiofréquences » 2013 sur la base des études du groupe d'Arendash (Arendash *et al.,* 2010, 2012 ; Mori et Arendash 2011) qui avaient retrouvé une amélioration des performances cognitives chez les souris adultes et très âgées.

En conclusion, **les données disponibles permettent de conclure à un effet possible des radiofréquences sur les fonctions cognitives** de l'enfant (Figure 41).

Les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient que le niveau de preuve était ***insuffisant*** pour conclure à un éventuel effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives chez l'Homme.

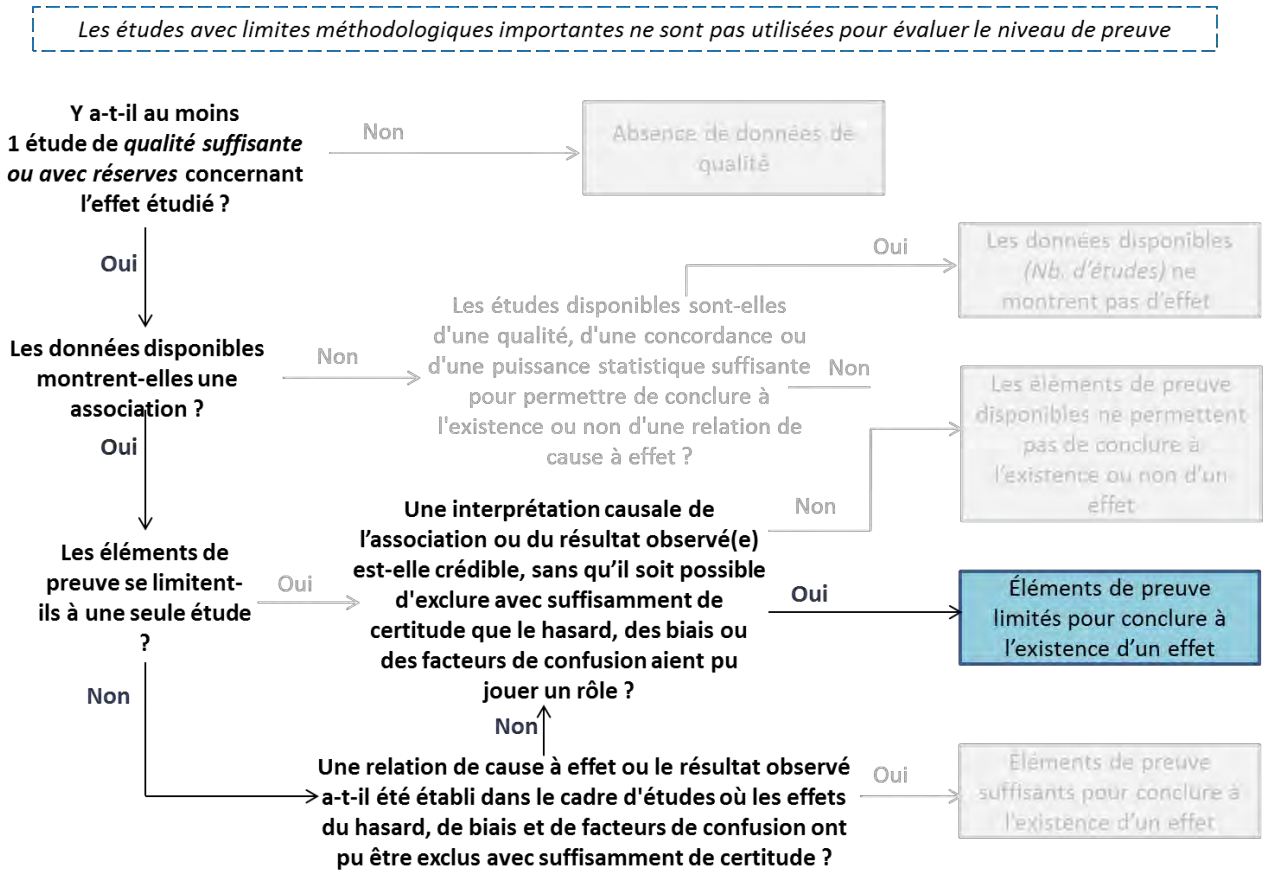


Figure 39 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions cognitives dans les études cliniques et épidémiologiques.

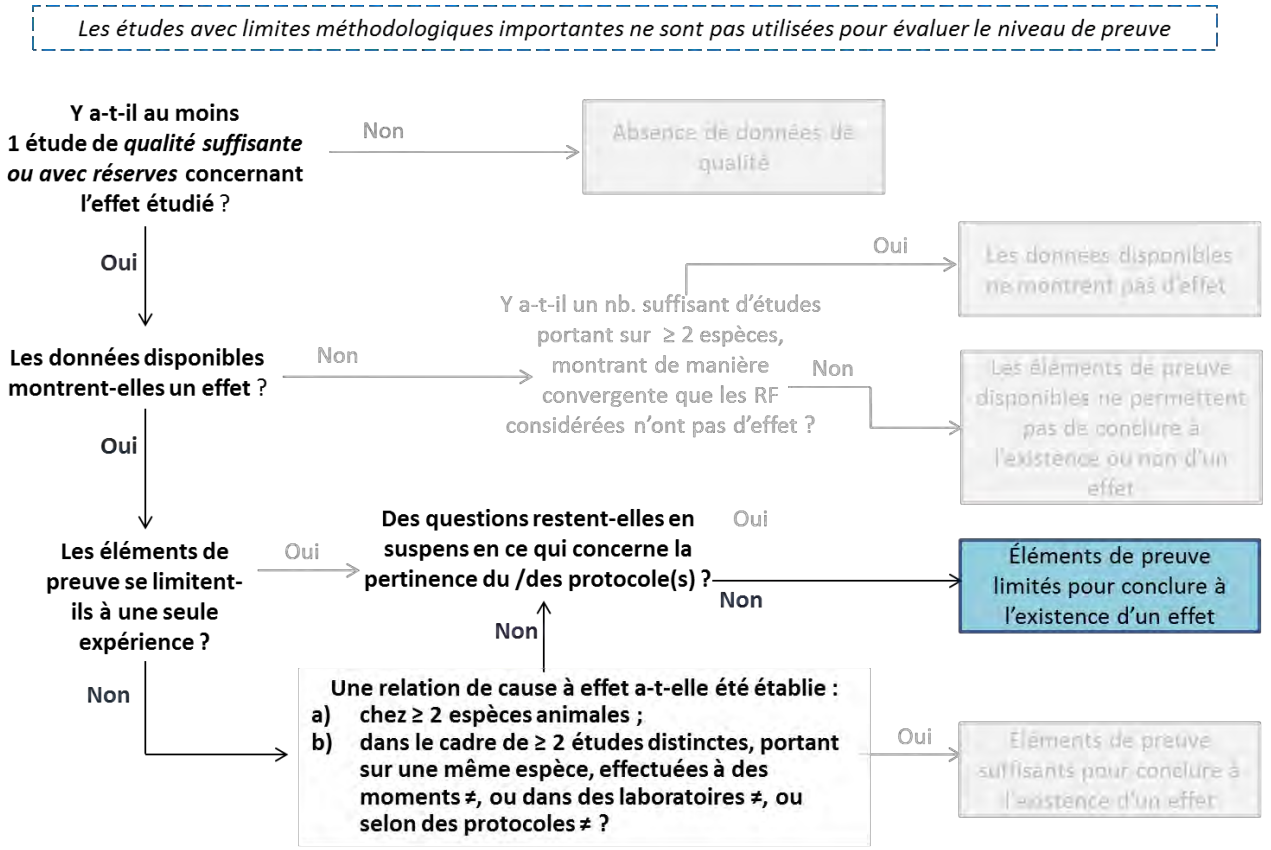


Figure 40 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions cognitives dans les études sur les modèles animaux

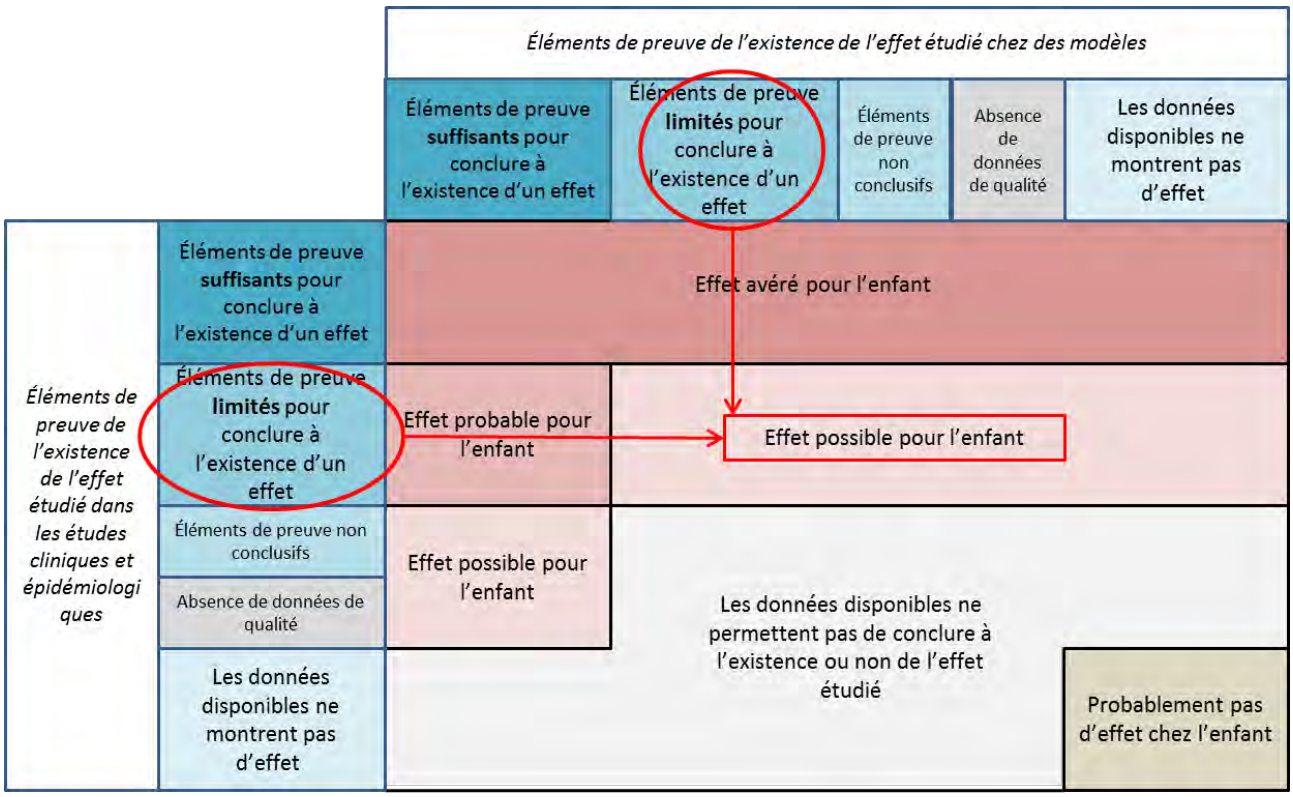


Figure 41 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives chez l'enfant.

5.5.3 Effets sur les fonctions auditives

5.5.3.1 Études chez l'Homme

Sudan *et al.* (2013a) 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 [IC 95% : 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 maitrisés, 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.

5.5.3.2 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*[43]) 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.

[43] Émissions oto-acoustiques évoquées par produit de distorsion.

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

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

Tableau 22 : 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 en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Étude	Type d'étude	Population	Effets étudiés	Caractérisation de l'exposition	Nombre de sujets	Résultats *(se référer au texte pour les commentaires)*
Sudan et al., (2013a)	Étude transversale	Exposition *in utero* et durant la petite enfance. Mères issues de la *Danish National Birth Cohort.* 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	52 680	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.

Tableau 23 : 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 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 *(se référer au texte pour les commentaires)*
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 *in utero* 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	À 1,0 – 2,0 kHz et 6,0 kHz, amplitude des DPOAE chez les exposés supérieure à celle des non exposés.

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

Chez l'enfant, Sudan *et al.,* (2013a) ont étudié les effets d'une exposition au téléphone mobile sur la fonction auditive de l'enfant (Sudan *et al.,* 2013a). 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 ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des radiofréquences sur la fonction auditive** (*cf.* Figure 42).

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 des limites méthodologiques, méritent d'être reproduites, notamment sur un rongeur (rat ou souris). Par conséquent, **les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des radiofréquences sur la fonction auditive** (*cf.* Figure 43).

En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des radiofréquences sur** la fonction auditive chez l'enfant (*cf.* Figure 44).

Les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient « les nombreuses données de la littérature permettent de considérer qu'il n'y a probablement pas d'effet à court terme d'une exposition aiguë sur l'audition. Le niveau de preuve avait été jugé ***insuffisant*** pour conclure à un effet des radiofréquences à court terme sur les fonctions auditives et en particulier sur les potentiels évoqués auditifs et l'apparition d'acouphènes chez l'Homme. Cependant, en raison de l'absence d'étude sur les effets d'une exposition chronique (à long terme) sur les fonctions auditives, un éventuel risque à long terme ne peut être exclu. De plus, la possibilité d'apparition de lésions auditives dues à une utilisation intensive du téléphone mobile et à une exposition au bruit (et non aux radiofréquences) ou à l'électronique du téléphone (batterie par exemple) ne peut pas non plus être négligée.

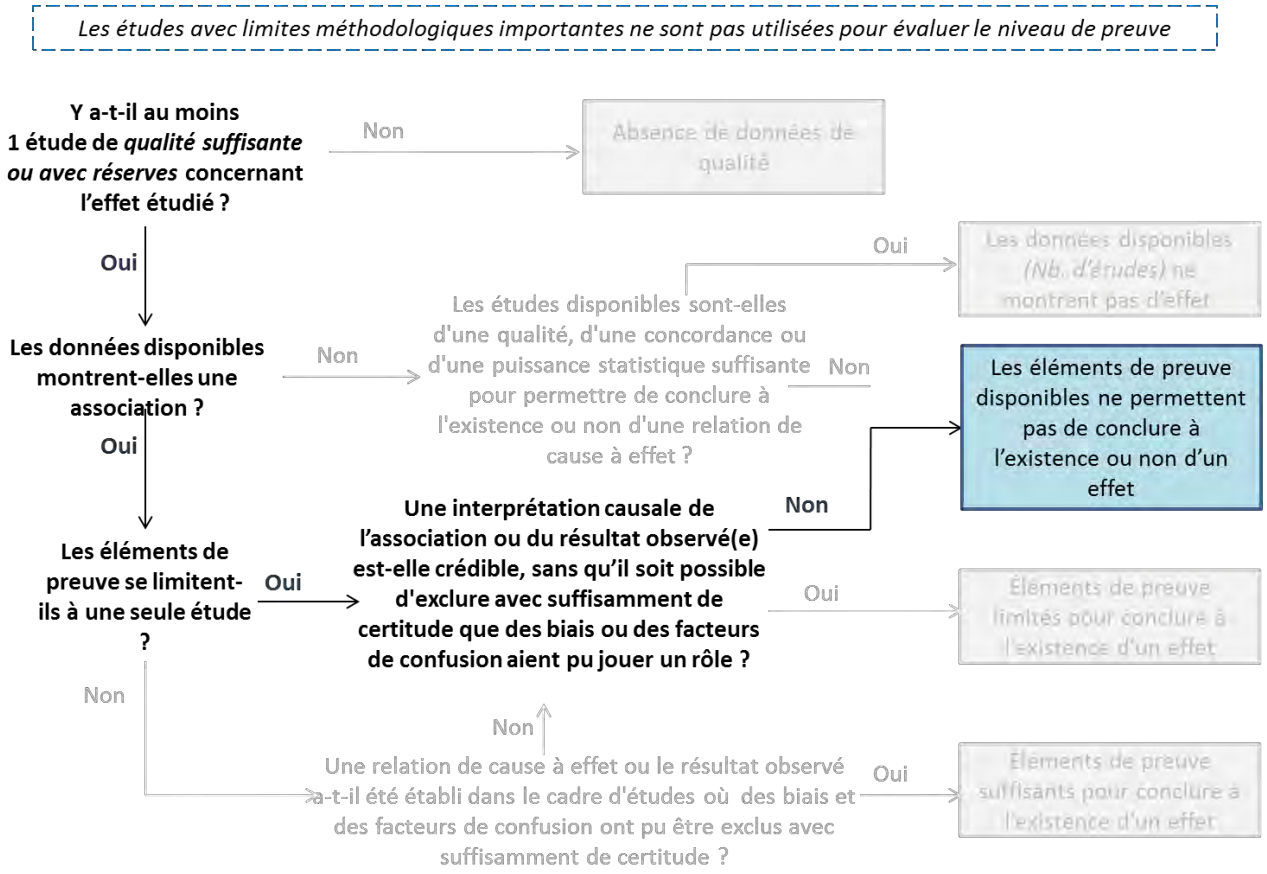


Figure 42 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions auditives dans les études épidémiologiques.

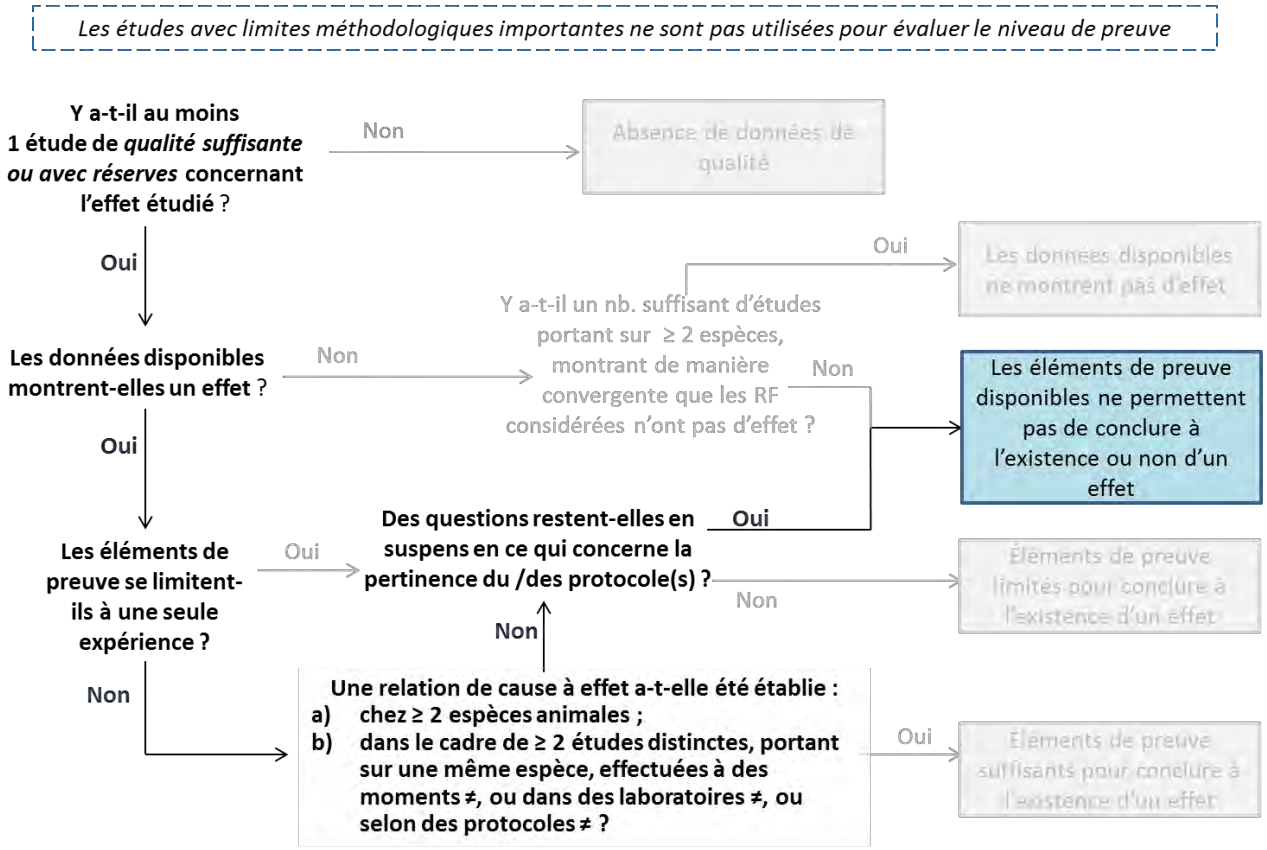


Figure 43 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux fonctions auditives dans les études sur les modèles animaux.

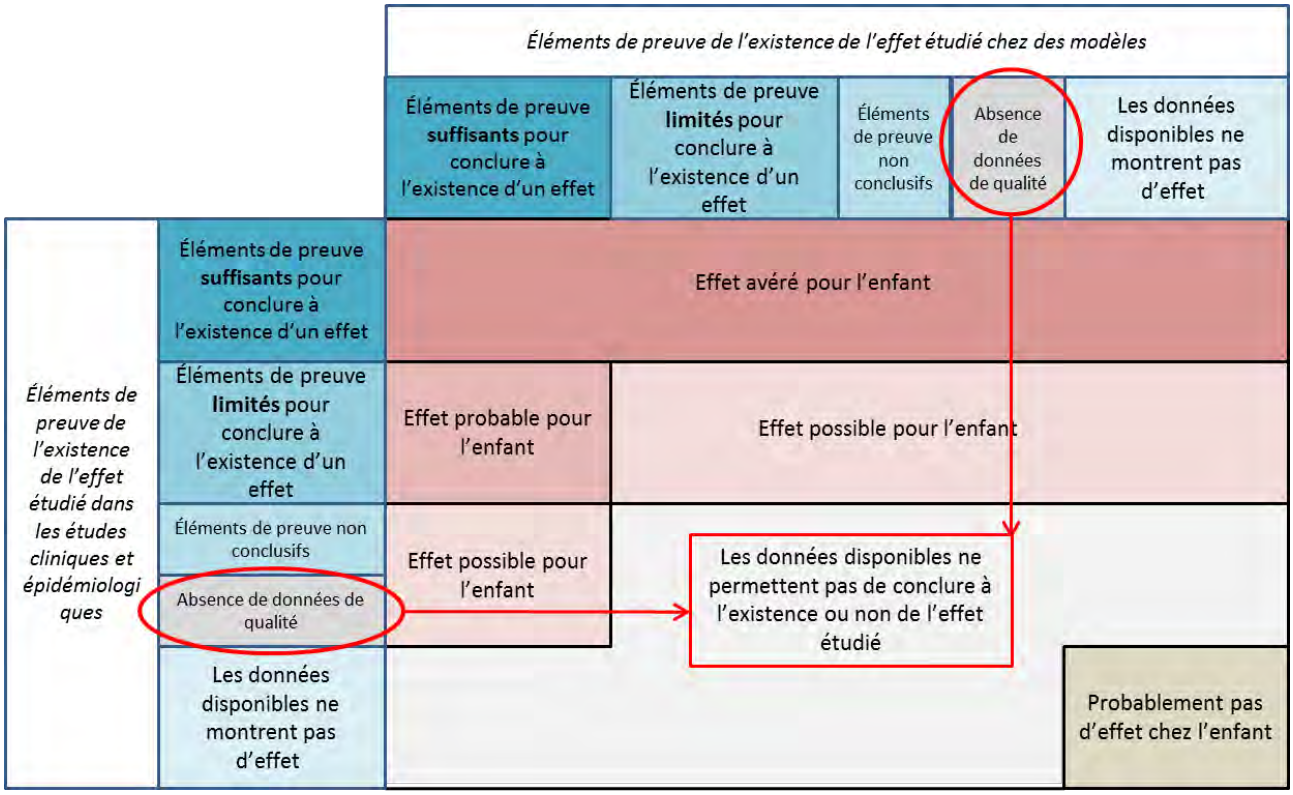


Figure 44 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur les fonctions auditives chez l'enfant.

5.5.4 Effets sur le sommeil

5.5.4.1 Chez l'Homme

L'étude transversale *MobileEe* a été menée en Allemagne auprès d'enfants (8-12 ans, n = 1 484) et d'adolescents (13-17 ans, n = 1 508) (voir description paragraphe 5.6). Les participants ont porté un dosimètre pendant 24 h. L'exposimètre nécessitant d'être en mouvement, seule la période où le participant était réveillé a produit des mesures exploitables. Les problèmes de sommeil sur les 6 derniers mois (évalués par le *Health Behaviour in School-aged Children*) ont été recueillis par les enquêteurs lors d'un entretien en face à face. L'analyse par quartile d'exposition et comparant les personnes du décile le plus exposé aux expositions inférieures à la médiane n'a pas montré plus de troubles du sommeil chez les enfants et chez les adolescents (Heinrich, *et al*. 2011). Les enfants du 3ème quartile d'exposition auraient même tendance à avoir moins de troubles du sommeil (OR = 0,63 [IC 95 % : 0,41–0,96]) que ceux des autres quartiles.

5.5.4.2 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 4ème semaine et la 5ème a été consacrée au repos. Les enregistrements des différents paramètres ont été effectués pendant la 6ème 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 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 nycthémère, 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.

Tableau 24 : études investiguant les effets des radiofréquences sur le sommeil des enfants.

Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Référence	Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	Population	Effets étudiés	Nombre de sujets	Outils utilisés	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
Heinrich *et al.,* 2011 (réanalyse de de Kühnlein *et al.*, 2009)	Étude transversale *German MobilEe-study*	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	**Symptômes chroniques** aspécifiques sur les 6 derniers mois : maux de tête, irritabilité, nervosité, étourdissements, fatigue, anxiété et troubles du sommeil.	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).

Tableau 25 : 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 *(se référer au texte pour les commentaires)*
Pelletier *et al.*, 2013	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.

5.5.4.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le sommeil.

Chez l'enfant, la seule étude disponible ne montre pas de troubles du sommeil (*cf.* Figure 45). Par conséquent, **les éléments de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des radiofréquences sur le sommeil chez l'enfant.**

Chez l'animal, une étude de bonne qualité rapporte une augmentation de la fréquence des épisodes de sommeil paradoxal chez les exposés (n = 5) par rapport aux non-exposés (n = 4), quelle que soit la température. Ce résultat mérite d'être reproduit.

Par conséquent, **les éléments de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur le sommeil chez l'animal** (*cf.* Figure 46).

En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet des radiofréquences sur le sommeil** chez l'enfant (*cf.* Figure 47)**.**

Les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient des données *insuffisantes* sur la macrostructure du sommeil chez l'Homme et des données *suffisantes* pour mettre en évidence une augmentation de la puissance spectrale de l'EEG. Chez l'animal, les résultats avaient abouti à un effet *limité* de l'exposition aux radiofréquences sur le sommeil. En conclusion, le groupe de travail « Radiofréquences et santé » avait jugé le niveau de preuve *insuffisant* pour conclure à l'existence d'un effet pathologique à court terme sur le sommeil.

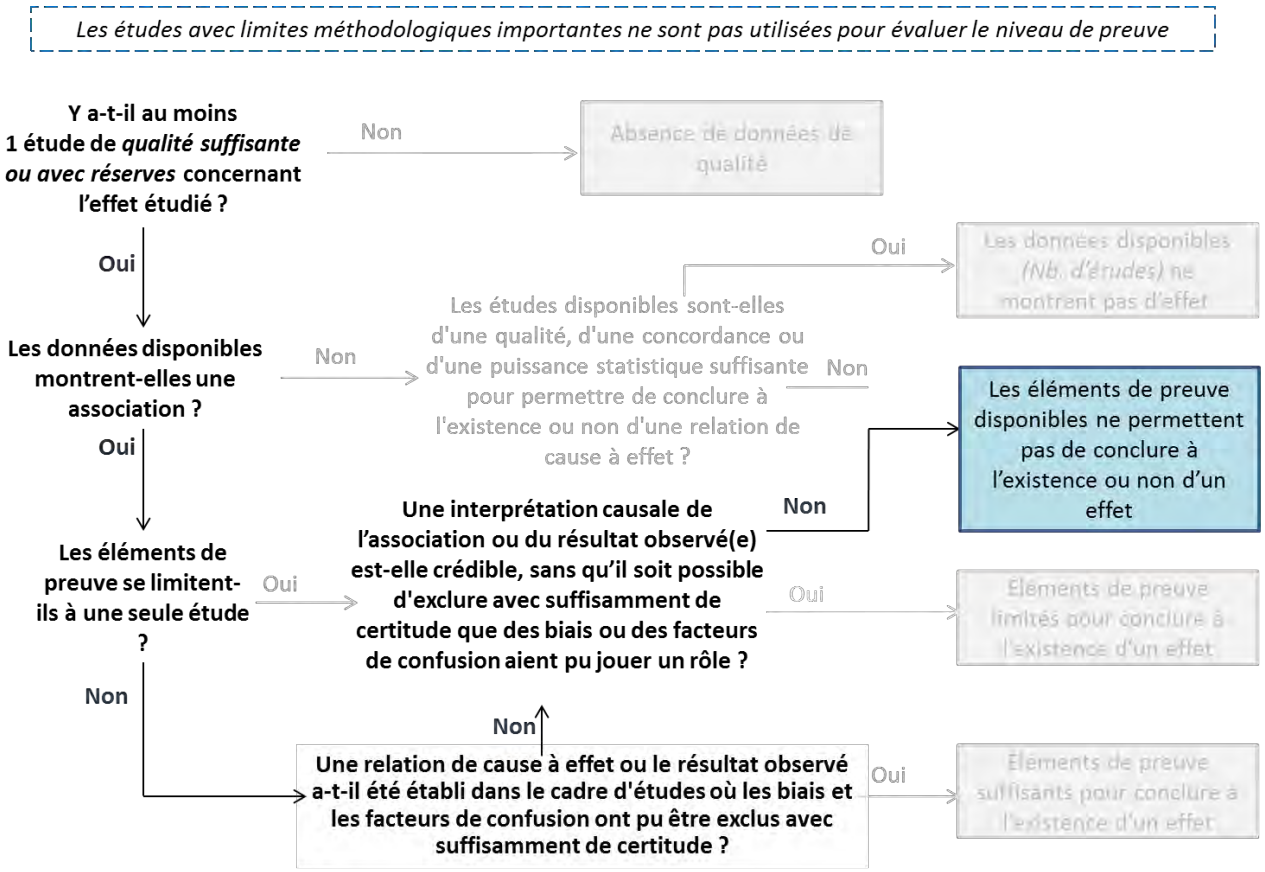


Figure 45 : évaluation des éléments de preuve relatifs au sommeil dans les études épidémiologiques.

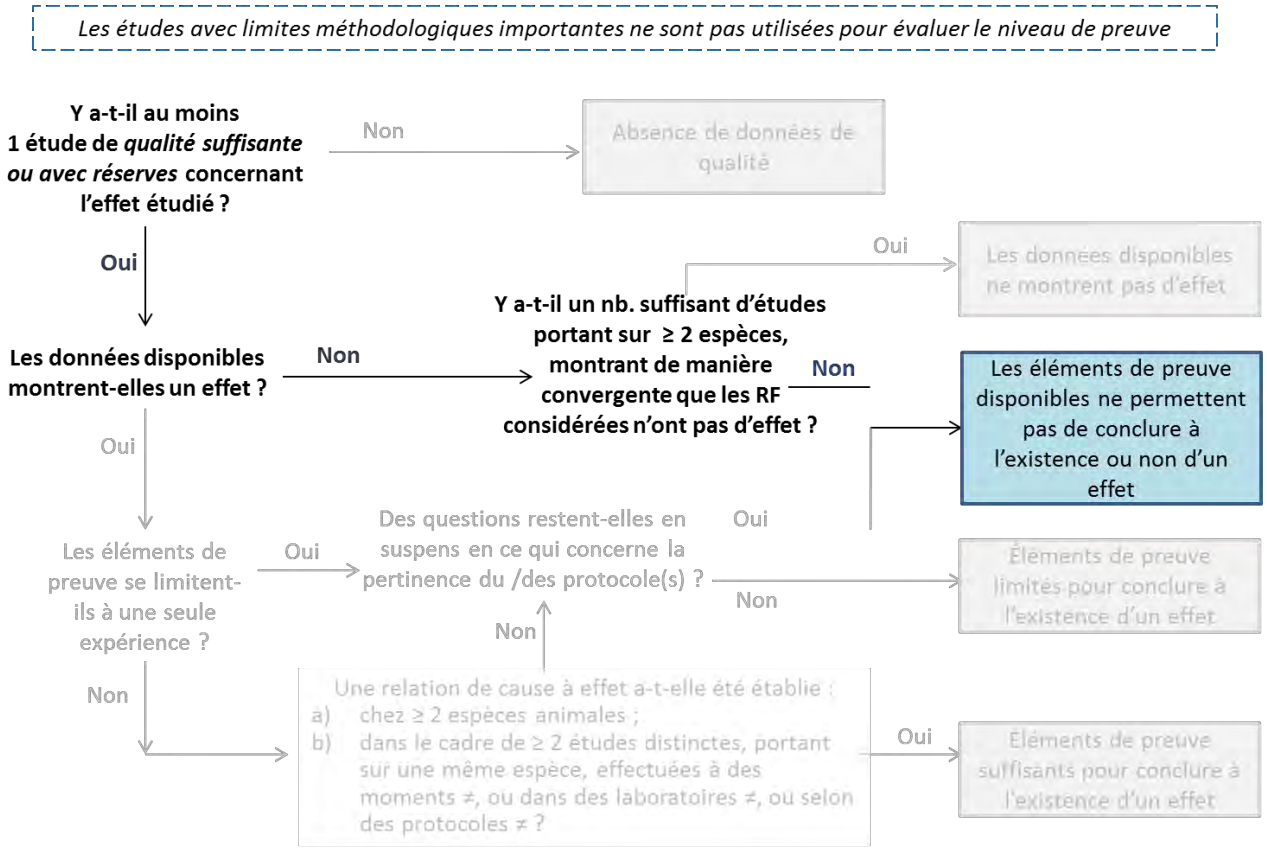


Figure 46 : évaluation des éléments de preuve relatifs au sommeil dans les études sur les modèles animaux.

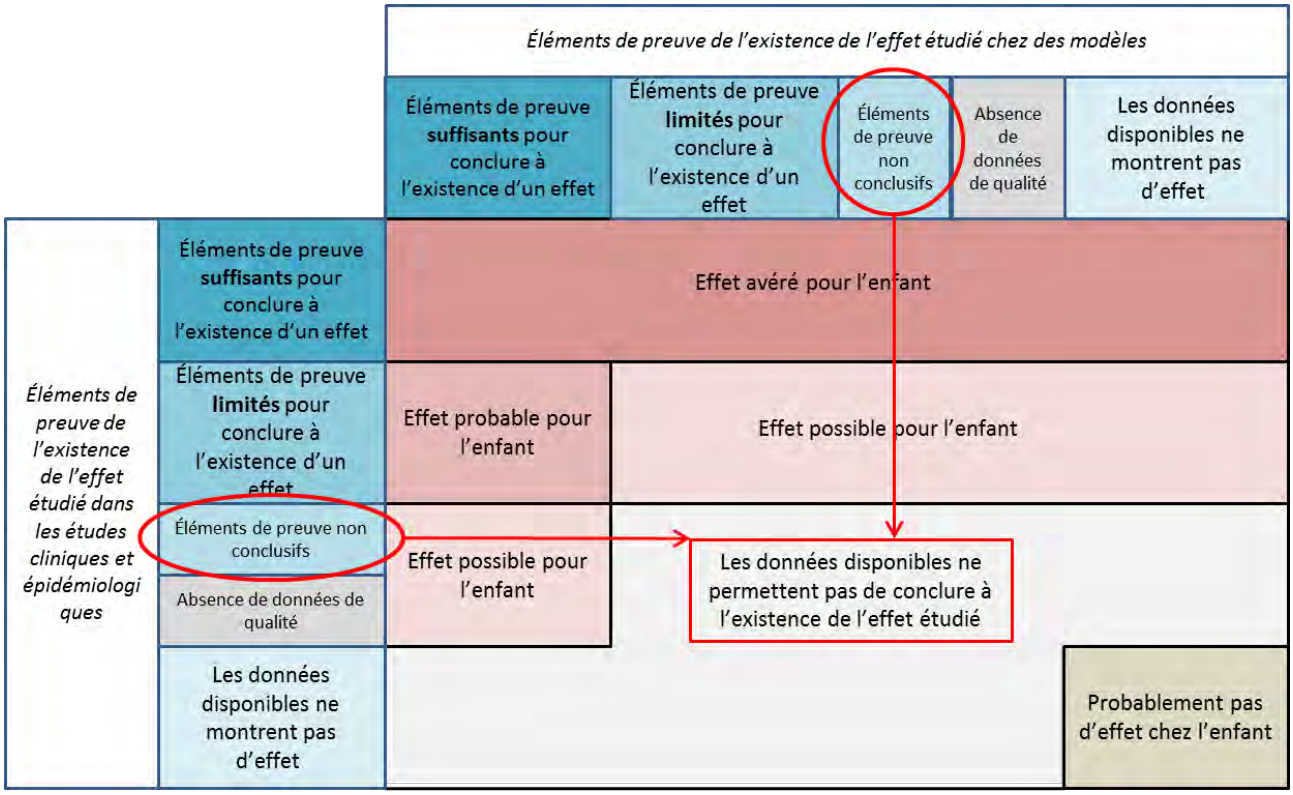


Figure 47 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le sommeil chez l'enfant.

5.6 Études sur le bien-être

Van den Bulck (2007) a mené une étude prospective de cohorte sur des enfants scolarisés en Belgique. Les données initiales proviennent de l'étude sur les médias et la santé des adolescents de Louvain (SOMAH) en février 2003, avec un premier suivi en février 2004 et un second en 2005. L'âge moyen était de 13,7 ans (écart-type = 0,68) dans le groupe le plus jeune et 16,9 ans dans le groupe le plus âgé. 28,8 % des participants ont été perdus de vus. Au total, 1 656 participants ont été inclus, comprenant 52,1 % de garçons et 47,9 % de filles. Au premier suivi, les participants ont répondu au questionnaire d'évaluation de l'utilisation du téléphone mobile qui comportait la fréquence d'utilisation du téléphone après le coucher (jamais, moins d'une fois par mois, moins d'une fois par semaine, environ une fois par semaine, plus d'une fois par semaine) et la période de réception ou d'envoi de messages texte (immédiatement après avoir éteint la lumière, entre minuit 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 an plus tard grâce à un questionnaire en 4 questions aboutissant à une échelle de 11 points allant de -5 (pas fatigué du tout) à +5 (très fatigué).

L'étude révèle que plus de la moitié des jeunes (tous âges confondus) utilisent le téléphone mobile après l'extinction de la lumière le soir, pour envoyer ou recevoir des messages texte. La majorité des jeunes utilisent leur téléphone mobile juste après avoir éteint la lumière (55,6 % pour les messages texte et 58 % pour les appels). Une proportion non négligeable l'utilise entre minuit et 3 h du matin (20,3 % envoie des messages et 17,3 % appelle), mais peu d'enfants utilisent le téléphone à partir de 3 h du matin. Cependant, environ 1/5ème des jeunes utilise le téléphone quelle que soit l'heure de la nuit.

Une analyse de régression logistique montre que le fait d'être modérément fatigué ainsi que le fait d'être très fatigué augmentent avec la fréquence d'utilisation du téléphone mobile. Les participants qui utilisent leur téléphone après avoir éteint la lumière une fois par semaine ont 3 fois plus de chance d'être très fatigués que ceux qui ne l'utilisent pas. Les participants qui utilisent plusieurs fois par semaine leur téléphone après avoir éteint la lumière ont 5 fois plus de chance d'être fatigué que ceux qui ne l'utilisent pas.

Cette analyse montre également que l'utilisation du téléphone mobile après avoir éteint la lumière double la probabilité d'être très fatigué un an plus tard. Chez ceux qui utilisent le téléphone quelle que soit l'heure de la nuit, la probabilité triple. Et chez les sujets qui envoient ou reçoivent des messages entre minuit et 3 h du matin, elle quadruple.

Dans le groupe qui est modérément fatigué, 7,5 % des cas est attribuable à l'utilisation du téléphone mobile, alors que dans le groupe très fatigué, 35 % des cas est attribué à l'utilisation du téléphone mobile.

Les auteurs concluent que les enfants utilisent de plus en plus le téléphone après avoir éteint la lumière, et que même une utilisation modérée double le risque de fatigue. Cependant, cette étude comporte quelques biais méthodologiques. Tout d'abord le fait que l'exposition et les troubles du sommeil aient été évalués par auto-questionnaire. Chez les adolescents, la source majeure de biais est la nécessité de donner des résultats « socialement souhaitables ». Les auteurs pensent qu'il serait improbable que les étudiants sous estiment leur comportement. Les estimations de la prévalence sont vraisemblablement surestimées, ce qui fait que l'erreur de classement entrainerait une estimation plus basse de la relation.

En 2008, Södeqvist *et al.* ont mené une étude transversale afin d'estimer l'utilisation du téléphone sans fil (DECT et téléphone mobile) par les adolescents et d'étudier l'association avec l'altération du bien-être reflétée par l'apparition de troubles généraux tels que les maux de tête, le larmoiment, l'anxiété et les troubles du sommeil. Un questionnaire a été envoyé à 2 000 adolescents suédois agés de 15 à 19 ans, sélectionnés à partir du registre de population selon un mode de sélection stratifiée.

Le taux de réponse était de 63,5 %. La plupart des participants ont utilisé un téléphone mobile (99,6 %) et le taux d'utilisation augmentait avec l'âge : 55,6 % des adolescents âgés de 15 ans

étaient utilisateurs, ce taux atteignant 82,2 % chez les adolescents âgés de 19 ans. Les filles utilisaient davantage le téléphone sans fil que les garçons. Environ 82 % des adolescents étaient utilisateurs de téléphone sans fil (défini par l'utilisation de plus de 2 min par jour). Le fait de regarder la télévision est associé avec l'utilisation fréquente du téléphone mobile, après ajustement sur l'âge et le sexe. Les symptômes les plus fréquents rapportés étaient la fatigue, le stress, les maux de tête, l'anxiété, les difficultés de concentration et les troubles du sommeil parmi les utilisateurs de téléphone mobile de plus de 15 min par jour. Les auteurs relèvent quelques limites à ces résultats, la première étant que ce type d'étude ne permet pas de mettre en évidence de relation causale. De plus, ils soulignent que la multiplicité des tests peut avoir influencé les résutlats.

Les données de l'étude « *the German MobilEe-study* » ont fait l'objet de plusieurs publications.

Les participants de cette étude ont répondu à un entretien individuel assisté par ordinateur. Pendant 24 h, les participants ont porté un dosimètre et ont renseigné la fréquence et le temps d'utilisation du téléphone mobile. L'exposimètre nécessitant d'être en mouvement, seule la période où le participant était réveillé a produit des mesures exploitables. En plus de l'évaluation de l'exposition par l'exposimètre individuel, les participants ont déclaré sur un journal-papier leur fréquence et la durée d'utilisation du téléphone mobile dans la journée sur cette même période de 24 heures.

Kühnlein *et al.* (2009) ont développé une analyse statistique de l'exposition de 1 433 enfants (sur les 1 484 inclus dans l'étude et ayant une mesure complète de l'exposition sur 24 heures). Les symptômes chroniques (maux de tête, irritation, nervosité, étourdissements, anxiété, troubles du sommeil, fatigue) ressentis au cours des 6 mois précédents ont été recueillis à l'aide du questionnaire *Health Behaviour in School-Aged Children* et leur intensité a été évaluée selon l'échelle de Likert (quasi quotidiennement, plusieurs fois par semaine, environ chaque semaine, environ une fois par mois, rarement, jamais). Aucune association entre l'exposition divisée en 2 catégories (les moins exposés (88 %) et les plus exposés (12 %)) et les symptômes chroniques ressentis au cours des 6 mois précédents n'a été observée.

Heinrich *et al.* (2010) ont également utilisé les données de l'étude « *the German MobilEe-study* » afin d'analyser l'association entre l'exposition aux radiofréquences et la survenue de symptômes aigus aspécifiques (maux de tête, irritabilité, nervosité, étourdissements, fatigue, problèmes de concentration, troubles du sommeil). Les symptômes aigus ressentis pendant cette période ont également été notés sur un journal papier à midi et le soir. Les symptômes pris en compte ont été extraits de la liste des plaintes somatiques de von Zerssen (von Zerssen *et al.,* 1974) et leur intensité évaluée selon l'échelle de Likert (intense, modéré, faible, pas du tout). Les principaux facteurs de confusion éventuels tels que les données socio-démographiques (recueillies en utilisant le questionnaire du *German Health Interview and Examination Survey for Children and Adolescents* (KIGGS)) et les préoccupations environnementales (évaluées par la version courte du questionnaire *Environmental Worry Scale*) ont été pris en compte.

Cette étude révèle que les niveaux d'exposition sont très faibles (0,13 à 0,92 % des limites préconisées par l'Icnirp pendant les heures d'éveil), et que l'utilisation de téléphone est faible : seuls 2,3 % des enfants et 14,3 % des adolescents déclarent utiliser le téléphone plus de 5 min au cours de l'après-midi.

Pour les enfants (8 - 12 ans) utilisant le plus le téléphone, les résultats sont les suivants :

- il existe une augmentation (non significative) de certains troubles lors des évaluations survenues à midi (maux de tête chez les enfants ayant eu plus de 5 min de conversation téléphonique OR = 2,33 [IC 95 % : 0,98-5,54] ; fatigue chez les enfants du quartile d'exposition supérieur OR = 1,36 [IC 95 % : 0,96-1,92]) ;

- des problèmes de concentration le soir sont associés à l'exposition des enfants les plus exposés (les 25 % les plus exposés, soit le 4ème quartile d'exposition mesurée) : OR = 1,55 [IC 95 % : 1,02-2,33].

Pour les adolescents (13 – 17 ans), les résultats sont les suivants :

- les maux de tête à midi sont plus fréquents chez les adolescents les plus exposés (4ème quartile : OR = 1,50 [IC 95 % : 1,03-2,19]) ;
- la fatigue est observée en relation avec des communications de plus de 5 mn le matin (OR = 1,76 [IC 95 % : 1,22-2,56]) ;
- l'irritation est également retrouvée associée à un usage de plus de 5 mn au cours de la matinée (OR = 1,64 [IC 95 % : 1,10–2,44]) ;
- l'irritation le soir est retrouvée associée au quartile d'exposition le plus élevé (OR = 1,79 [IC 95 % : 1,23–2,61].

Quand seuls les 10 % des participants les plus exposés (10ème décile) sont pris en considération, les résultats significatifs de l'analyse principale ne sont pas retrouvés, sans doute par perte de puissance statistique, car les *odds-ratios* restent élevés (du même ordre que ceux observés dans les analyses précédentes). Par ailleurs, les auteurs concluent que les quelques associations significatives observées pourraient être dues à la multiplication des tests effectués. D'autre part, le lien de causalité est difficilement vérifiable, la perturbation du sommeil pouvant être le facteur causal.

Poursuivant son analyse sur l'ensemble des 1 484 enfants et 1 508 adolescents, la même équipe a étudié les mêmes symptômes chroniques ressentis au cours des 6 mois précédents l'*interview* avec le même questionnaire (Heinrich *et al*., 2011). Quatre-vingt-deux pourcents des mesures étaient en dessous du seuil de détection du dosimètre (0,05 V/m). La moitié des enfants et 92 % des adolescents possédaient leur propre téléphone mobile, que la plupart des enfants et des adolescents (92 % et 75 % respectivement) utilisent moins de 5 min par jour. De même, 58 % des enfants et 31 % des adolescents déclarent utiliser le téléphone fixe moins de 5 min par jour Les symptômes les plus fréquemment rapportés sont : la fatigue (30 % des enfants et 51 % des adolescents), l'irritation (21 % des enfants et 32 % des adolescents), les problèmes de sommeil (19 % des enfants) et la nervosité (24 % des adolescents).

Aucune relation n'a pu être établie entre les niveaux d'exposition aux radiofréquences mesurés par les dosimètres personnels et les différents symptômes non spécifiques étudiés. Cependant, les enfants du 3ème quartile d'exposition auraient tendance à avoir moins de problème de sommeil (OR = 0,63 [IC 95 % : 0,41–0,96]) que ceux des autres quartiles.

Chez les adolescents uniquement, l'irritation est plus souvent rapportée (auto-questionnaire) parmi ceux qui utilisent quotidiennement un téléphone mobile (OR = 1,48 [IC 95 % : 1,13–1,93]) et ceux qui utilisent un téléphone sans-fil DECT (OR = 1,30 [IC 95 % : 1,02–1,64]). Il n'est cependant pas possible d'en conclure formellement à l'existence d'un excès de symptômes chroniques lié à l'exposition aux champs électromagnétiques, en raison des multiples tests réalisés (Heinrich *et al*., 2011).

Au Danemark, Sudan *et al.* (2012) ont étudié l'association entre l'exposition des mères au téléphone mobile au cours et après la grossesse et la survenue de migraine et de symptômes « reliés aux maux de tête » (céphalées, maux de ventre et autres maladies de l'enfant) chez l'enfant de 7 ans. Les données sont issues de la *Danish National Birth Cohort* qui a inclus 91 661 mères au Danemark entre 1997 et 1999. Lorsque les enfants ont atteint l'âge de 7 ans, les mères ont complété elles-mêmes, *via* internet, ou à défaut par courrier, un questionnaire évaluant la santé de leur enfant, leur comportement et les expositions environnementales auxquelles ils sont soumis. L'association entre les migraines et les maux de têtes des enfants et une exposition

prénatale seule, postnatale seule et pré- et post- natale a été étudiée. Au total, des données pour 52 680 enfants ont été récoltées.

L'étude révèle que les enfants qui ont été exposés de façon pré- et post- natale au téléphone mobile ont plus de migraines (OR = 1,30 ; [IC 95 % :1,01-1,68]) et de symptômes « reliés aux maux de tête » (OR = 1,32 ; [IC 95 % : 1,23-1,40]) que ceux qui n'ont pas été exposés. L'exposition prénatale seule et postnatale seule est également associée à la survenue de symptômes « reliés aux maux de tête » (OR = 1,16 ; [IC 95 % : 1,08–1,23] et OR =1,28 ; [IC 95 % : [1,19–1,37], respectivement).

L'interprétation des résultats est difficile en raison d'une évaluation imprécise de l'exposition et d'une estimation de l'effet étudié (maux de tête) par la mère. L'exposition a été évaluée 7 ans après, avec un risque de biais de mémorisation. Cependant, l'évaluation de l'exposition était assez simple pour éviter les erreurs (est-ce que l'enfant utilise le téléphone mobile plus ou moins qu'une heure par semaine ou pas du tout), le but n'étant pas d'avoir des données précises, mais justes.
Les auteurs reconnaissent également que l'exposition du fœtus aux radiofréquences pendant la grossesse est certainement faible, d'après des études de modélisation sur des fantômes numériques (Dimbylow *et al*. 2009), et que les enfants n'utilisent vraisemblablement pas de téléphone mobile avant l'âge de 7 ans. L'association mise en évidence est donc peut-être liée à d'autres facteurs sous-jacents plutôt qu'aux radiofréquences.

Ils évoquent également la possibilité d'un biais de sélection lors de l'étude. Une étude sur cette cohorte a mis en évidence que les mères « perdues de vue » ont un statut socioéconomique plus bas. Or, l'utilisation du téléphone mobile parmi les enfants et les adolescents est plus élevée dans les catégories socioprofessionnelles inférieures. Par conséquent, il est possible que les enfants les plus gros utilisateurs de téléphone mobile soient sous-représentés dans cette étude.

En Nouvelle-Zélande, Redmayne *et al.* (2013b) ont réalisé une étude transversale pour étudier le lien entre l'utilisation de téléphone mobile ou sans fil, l'usage d'internet et le bien-être des enfants et des adolescents. Les participants ont complété des questionnaires à l'école sur l'utilisation de téléphone mobile ou sans fil et leur bien-être. Un questionnaire rempli par les parents a fourni des données sur l'accession au Wi-Fi dans le foyer, la possession de son propre téléphone mobile par l'enfant et le modèle du téléphone.

Les auteurs rapportent que le tiers des adolescents qui possèdent un téléphone mobile le gardent près de leur lit la nuit ; un tiers d'entre eux disent être réveillés au moins une fois dans la semaine par un appel. Le nombre et la durée des appels avec un téléphone mobile ou sans fil est associé avec une augmentation du risque de maux de tête ($OR_{> 6 \text{ appels de plus de } 10 \text{ min par jour avec un téléphone mobile}}$ = 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]. L'utilisation d'un kit main libre était associé avec des acouphènes (OR = 1,8 ; [IC 95 % : 1,0-3,3], alors que l'utilisation d'un kit sans fil (type *bluetooth*) était associé avec des maux de têtes 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 fait d'être réveillé la nuit (OR = 2,4 ; [IC 95 % : 1,2–4,8]). Certaines bandes de fréquences de téléphone sans fil sont associés avec la présence d'acouphène, la sensation d'être déprimé, et la somnolence à l'école. Le fait d'être réveillé la nuit par le téléphone a été fortement associé avec la somnolence à l'école (OR = 3,49 ; [IC 95 % : 1,97-6,2]). Dans la mesure où il s'agit simplement d'une étude descriptive, cette étude ne peut servir dans l'analyse du lien causal (non prise en compte des facteurs confondants).

En raison d'importantes limites méthodologiques, les résultats de l'étude suivante n'ont pas pu être exploités :

Kücer *et al.,* (2014) ont réalisé une étude transversale sur 350 personnes âgées entre 9 et 80 ans afin d'étudier le lien entre les radiofréquences émises par l'usage du téléphone mobile ou de l'ordinateur et une série de symptômes (maux de tête, vertiges, fatigue, troubles du sommeil, anxiété, *etc*.). Aucune information n'est donnée sur la population de l'étude, (âge, *sex ratio*, provenance, *etc.*) et aucun facteur de confusion n'est pris en compte dans l'étude.

Tableau 26 : 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. • Association entre le fait d'être fatigué et l'usage après le coucher ○ 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 : ○ 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 *German MobilEe-study*	Exposition au téléphone mobile par une double approche : **Mesures des RF** pendant 24h avec	Enfants de 8 à 12 ans Adolescents de 13 à 17 ans	Kühnlein *et al.*, 2009	**Symptômes chroniques** aspécifiques sur les 6 derniers mois : maux de tête, irritabilité, nervosité, étourdissements,	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.

Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	Population	Publications	Effets étudiés	Nombre de sujets	Outils utilisés	Résultats *(se référer au texte pour les commentaires)*
	dosimètre individuel **<u>Exposition auto-déclarée</u>** : utilisation quotidienne du téléphone mobile ou du sans fil et estimation de la distance de l'habitation à une station de base		Heinrich *et al.,* 2011 (réanalyse de l'étude précédente)	fatigue, anxiété et troubles du sommeil.	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 *German MobilEe-study*	Exposition au téléphone mobile par une double approche : **<u>Mesures des RF</u>** pendant 24h avec dosimètre individuel **<u>Exposition auto-déclarée</u>** : 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 *et al.,* 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) Échelle de Lickert en 4 points (important, modéré, léger, pas du tout)	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 ○ 4ème 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		À midi : • Céphalées augmentées quelle que soit le mode d'exposition étudié ○ 4ème quartile d'exposition mesurée : OR = 1,50 [1,03-2,19]. • Irritabilité $OR_{\text{si plus de 5 mn}}$ = 1,64 [1,10-2,44] ; si expo mesurée OR_{Q4} = 1,44 [0,97 - 2,15]. • Fatigue $OR_{\text{si plus de 5 mn}}$ = 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.

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 rétrospective de la *Danish National Birth Cohort*	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 *et al*. 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 *et al.,* 2013b	Bien-être : maux de tête, baisse de moral/dépression, insomnie, réveil pendant la nuit, acouphène, mal au pouce, fatigue à l'école	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 fil et acouphène, sensation d'être déprimé et somnolence à l'école.

Par ailleurs, le groupe de travail « Radiofréquences et santé », à l'occasion de son travail sur la mise à jour des connaissances concernant les effets sanitaires des radiofréquences publié le 15 octobre 2013, avait identifié une autre étude qui n'a pas été retenue en raison de ses limites méthodologiques majeures (Mortazavi *et al.,* 2011).

5.6.1 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le bien-être.

Il n'existe pas de données sur les enfants de moins de 6 ans.

Les études investiguant les conséquences d'une exposition chronique aux radiofréquences sur le bien-être des enfants et des adolescents ne montrent pas d'association (Kühnlein *et al.,* 2009 ; Heinrich *et al.*, 2011).

Concernant les effets aigus, seule l'étude *German MobilEe-study* a objectivé l'exposition aux radiofréquences par la mesure de champs électromagnétiques, les autres études n'explorant que l'usage du téléphone mobile sans étudier la relation effet/dose. Cependant, en fonction de la méthode d'évaluation de l'exposition (mesurée ou auto-rapportée), certains résultats de l'étude *German MobilEe-study* ne sont pas cohérents. Les céphalées le midi et les troubles de la concentration le soir chez les enfants sont augmentées si l'exposition est auto-rapportée, mais pas si l'exposition est mesurée. En revanche, certaines associations sont cohérentes quel que soit le mode d'estimation de l'exposition : chez les adolescents les plus exposés, les céphalées, l'irritabilité et la fatigue sont augmentées le midi.

Les résultats des études de Van den Bulck, 2007, Heinrich *et al.,* 2010 et 2011 mettent en relation l'utilisation du téléphone mobile et des effets sur la fatigue des enfants, sans qu'il soit possible de différencier avec certitude l'effet des radiofréquences de l'effet de l'utilisation du téléphone mobile (voir discussion sur les facteurs de confusion au paragraphe 5.1). Bien que la part de l'effet des radiofréquences ne soit pas estimable dans cette association, il paraît plausible que des enfants ou des adolescents qui utilisent leur téléphone mobile après avoir éteint la lumière et entre minuit et 3 h du matin (Van den Bulck, 2007) soient plus fatigués, irritables et aient des maux de tête le lendemain ou dans l'année qui suit.

De fait, si la relation de cause à effet ne peut pas être établie, elle reste néanmoins possible.

Par conséquent, les éléments de preuves disponibles à ce jour sont **limités** pour conclure à un effet des radiofréquences sur le bien-être des enfants (*cf.* Figure 48). D'autres études, présentant une mesure de l'exposition aux radiofréquences, sont nécessaires pour confirmer ces résultats.

Chez l'animal, les données sont **inexistantes** (*cf.* Figure 49).

En conclusion, les données disponibles permettent de conclure à un effet **possible** des radiofréquences sur le bien-être des enfants (*cf.* Figure 50).

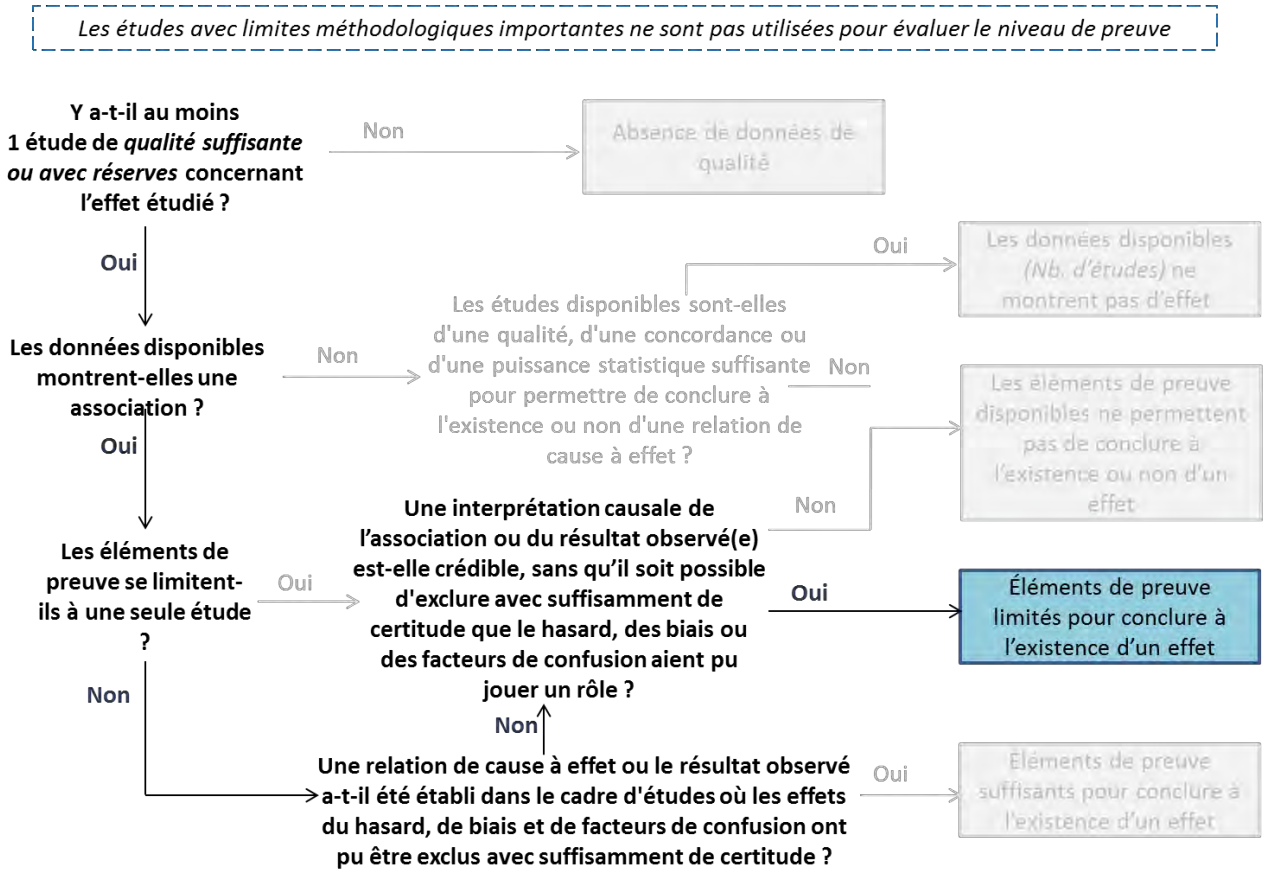


Figure 48 : évaluation des éléments de preuve relatifs au bien-être dans les études épidémiologiques.

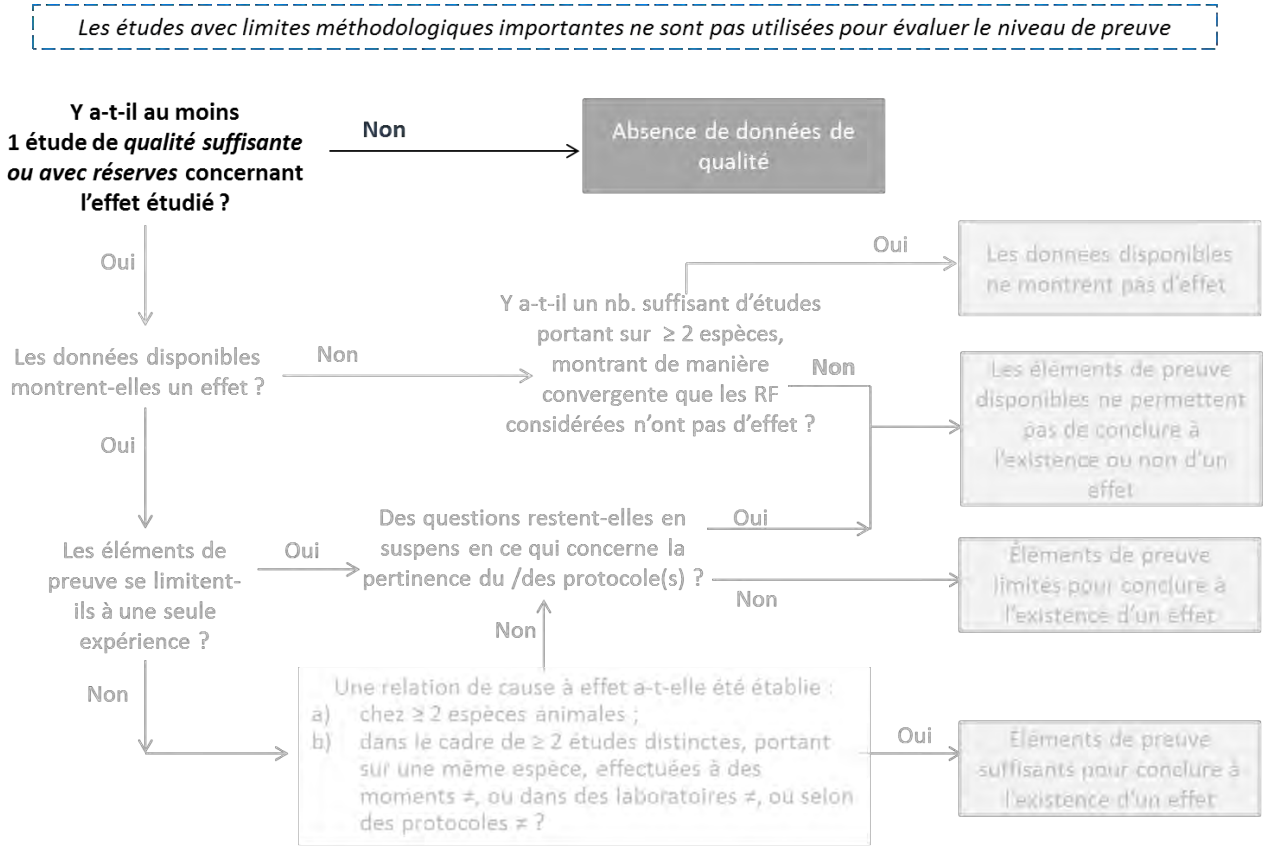


Figure 49 : évaluation des éléments de preuve relatifs au bien-être dans les études sur les modèles

animaux.

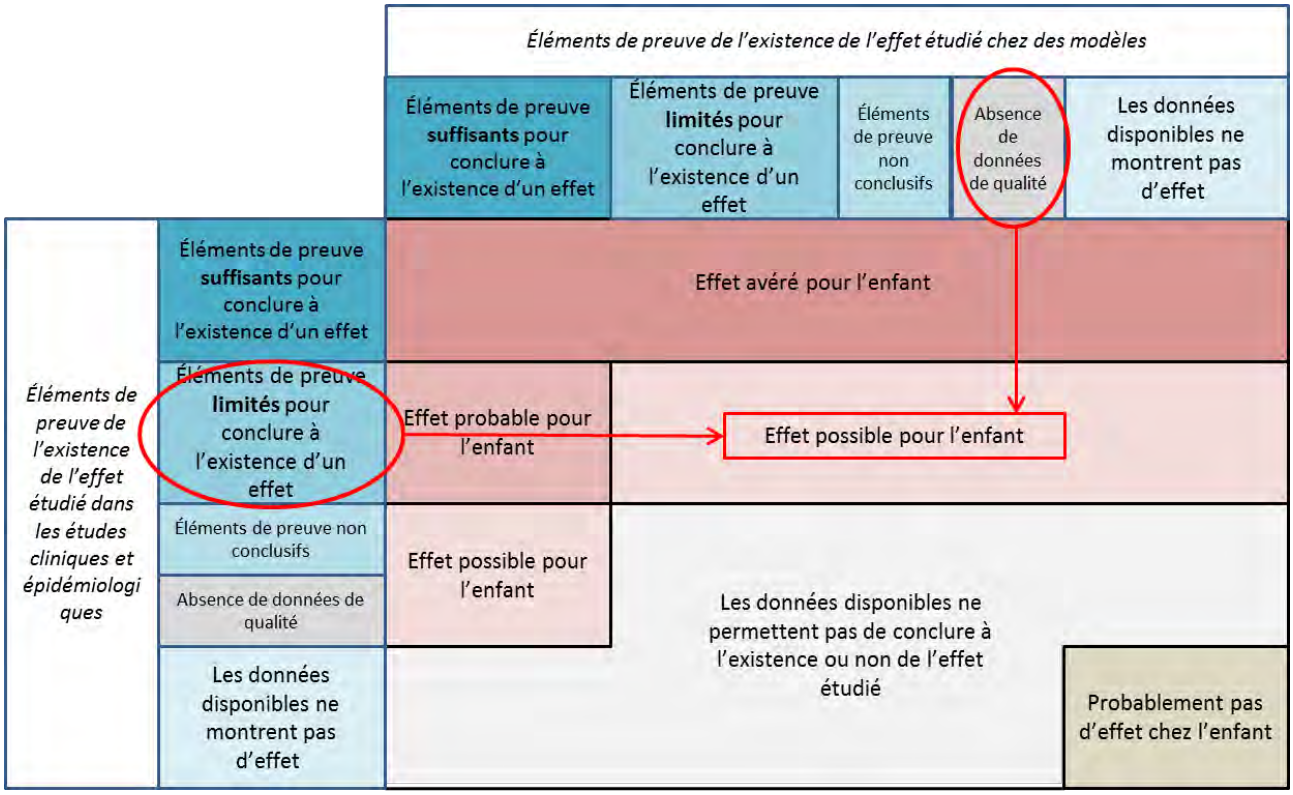


Figure 50 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le bien-être chez l'enfant

5.7 Études sur le système reproducteur et le développement

5.7.1 Chez l'Homme

Il n'existe pas d'études de qualité suffisante sur le système reproducteur ou le développement chez l'enfant.

Le groupe de travail « Radiofréquences et santé », à l'occasion de son travail sur la mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences publié en 2009, avaient identifié une étude chez l'enfant, (Rezk *et al.,* 2008) qui ne peut pas être utilisée pour évaluer les effets des radiofréquences sur le développement en raison des nombreux biais méthodologiques (absence de dosimétrie, absence de groupe contrôle,

5.7.2 Chez l'animal

5.7.2.1 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 18ème 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).

Poulletier 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 (Poulletier 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).

5.7.2.2 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). Trois groupes ont été réalisés : un groupe exposé, un groupe contrôle négatif et un groupe contrôle positif auquel une solution de plomb a été administrée dans l'eau de boisson (voir § 1.2.1, 1.2.4 et 1.3 pour autres résultats de l'étude). Les nouveau-nés F1 qui ont été exposés de façon prénatale ont été examinés quotidiennement (taille de la portée, *sex-ratio*, poids, date d'apparition du pelage, des dents, de l'ouverture des yeux, et réflexe de redressement). Les auteurs montrent que les mâles exposés *in utero* s'accouplent moins fréquemment que les animaux du groupe témoin, mais aucune différence n'a été constatée sur leur fertilité et sur le nombre de petits à la naissance par rapport au groupe témoin. Aucun effet sur le développement postnatal de la génération F2 n'a été observé. Aucune différence entre les groupes exposés et non exposés n'a été observée.

L'étude de Sommer *et al.*, (2009) a porté sur l'exposition chronique (24 h / 24 h ; vie entière) de souris C57BL à un signal UMTS (1 966 MHz, DAS de 0 ; 0,08 ; 0,4 et 1,3 W/kg) sur 4 générations grâce à 8 guides d'ondes localisés dans une même pièce. Un rat mâle (128 au total à la 1ère génération) et 2 femelles (256 au total) ont été placés dans une même cage. Dix-huit jours après accouplement, une des 2 femelles est euthanasiée et les fœtus sont comptés, pesés et les malformations sont recherchées. Chez la femelle, le nombre de corps jaunes résiduels et le poids de l'utérus sont évalués. Les petits de la deuxième femelle sont utilisés pour l'analyse de la 2ème génération. Après reproduction, les animaux parents sont sacrifiés et les organes reproducteurs sont pesés et inspectés (analyse histologique). Les petits sont pesés à intervalles réguliers et le taux de survie est calculé. Cette expérience est répétée jusqu'à la 4ème génération (fœtus des

animaux F3). Toute l'expérimentation est effectuée en aveugle. Les résultats mettent en évidence une tendance à une moindre consommation de nourriture chez les exposés, mais sans différence dans la consommation d'eau. Aucun effet sur les paramètres de la fertilité chez les mâles ni chez les femelles n'a été rapporté. Concernant le développement et le comportement des souriceaux, aucune différence dans le poids, ni dans la date d'ouverture des yeux, ni dans le test de réflexe, ni dans le taux de survie pendant la période de sevrage n'a été notée entre les 2 groupes de souris. Les auteurs concluent à une absence d'effet des ondes UMTS sur la reproduction et le développement des souris. Dans une étude précédente, ces même auteurs, utilisant un protocole similaire, n'avaient également pas noté d'effet d'une exposition chronique aux radiofréquences (signal UMTS à 1 966 MHz) chez des souris adultes ARK/J sur l'évolution du poids corporel (Sommer *et al.* 2007).

Takahashi *et al*. (2010) ont exposé des rats à un signal de type W-CDMA de fréquence 2,14 GHz, 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 plus forte, et entre 0,026 et 0,067 W/kg pour l'exposition la plus faible. Les générations F1 et F2 ont été examinées. De nombreux paramètres ont été étudiés (voir § 1.4.2, 1.2.4). Le développement sexuel et la fertilité ont été examinés, ainsi que divers paramètres de gestation de la génération F1 et les caractéristiques des fœtus F2. Les résultats ne montrent pas d'effet des radiofréquences sur la fertilité des mâles et des femelles, ni sur l'apparence macroscopique des organes sexuels, ni sur la gestation en général (poids), quel que soit le DAS. L'examen des femelles F1 en gestation montre une diminution du nombre de *corpora lutea* et une augmentation du poids des fœtus F2 vivants dans le groupe exposé au DAS faible seulement. Cependant, ces observations ne modifient pas l'issue de la gestation. Malgré ces observations, les auteurs concluent à une absence d'effets délétères de l'exposition sur la génération F1 et F2.

Lee *et al.* (2010) ont étudié sur des rats mâles âgés de 30 jours les effets d'une exposition chronique aux radiofréquences (CDMA, 848,5 MHz, DAS = 2 W/kg) sur la fertilité et la spermatogenèse. L'exposition s'est déroulée par tranches de 2 séquences quotidiennes de 45 min séparées de 15 min, 5 jours par semaine pendant 12 semaines. L'exposition est contrôlée, homogène et reproductible et le nombre d'animaux suffisant (n = 20 dans chaque groupe). Pendant l'exposition, aucun effet n'a été noté sur l'évolution du poids corporel, ni sur celui des testicules et de l'épididyme. Les rats ont été euthanasiés à 16 semaines. Un spermogramme est réalisé à la fin de l'exposition, ainsi qu'une mesure de la peroxydation lipidique (quantité de malondialdéhyde) dans les testicules et dans l'épididyme. Une analyse histologique des testicules est effectuée, avec une étude des étapes de la spermatogénèse, et un comptage des cellules germinales. Des paramètres de l'apoptose ont également été investigués (apparition de corps apoptotiques, mesure de l'expression de la protéine p53, bcl-2, caspase-3, p21 et PARP). Aucun effet n'a été observé concernant le spermogramme. Aucune anomalie n'a été détectée sur la morphologie et l'histologie des organes reproducteurs. Les paramètres d'apoptose mesurés dans les testicules et l'épididyme ne montrent pas de différence significative entre les exposés et les témoins.

Imai *et al.* (2011) ont exposé des rats mâles de 35 jours (3 groupes de 24 animaux chacun : témoins et 2 niveaux d'exposition) à des radiofréquences de type GSM à 1 950 MHz (5 h par jour pendant 5 semaines, à deux valeurs de DAS différentes, 0,08 et 0,4 W/kg). Au terme de l'expérimentation, le poids du corps et des organes reproducteurs (testicule, épididyme, vésicule séminale, prostate), le nombre de spermatozoïdes, leur motilité et les anomalies morphologiques ont été examinés. L'étude conclut à une absence d'effets délétères sur le développement du système reproducteur. L'étude a été conduite sur un nombre d'animaux suffisant (n = 24). Au terme de l'expérimentation, le poids du corps et des organes reproducteurs (testicule, épididyme, vésicule séminale, prostate) n'était pas différent entre les groupes exposés aux radiofréquences et le groupe contrôle. Il est intéressant de noter que le nombre de spermatozoïdes dans le groupe exposé à un DAS de 0,4 W/kg est significativement augmenté par rapport à celui observé dans le groupe contrôle.

Ozlem Nisbet *et al* (2012) ont étudié les effets d'une exposition chronique aux radiofréquences (90 jours, 2 h / j, 7 j / 7 j, GSM 900 ou 1 800 MHz) à partir du 2ème jour post-natal chez des rats mâles Wistar sur la fonction et structure testiculaire. Les rats ont été euthanasiés 24 h après la dernière exposition. Les valeurs de DAS pour l'exposition à 900 MHz sont de 3,0, 2,7, 2,2 et 1,2 mW/kg pour 10, 20, 50 et 70 jours alors que pour l'exposition à la fréquence de 1 800 MHz, ces valeurs sont respectivement de 0,053, 0,046, 0,011 et 0,011 mW/kg. Les résultats montrent, chez les rats de 92 jours (13 semaines), une augmentation significative des concentrations circulantes de testostérone dans les 2 groupes exposés aux radiofréquences (+ 4,5 et + 4,9 %). De plus, à une fréquence d'exposition de 1 800 MHz, les rats exposés présentent une augmentation de la motilité des spermatozoïdes, sans atteinte de leur concentration, avec une augmentation du pourcentage d'anomalies histologiques de l'épithélium séminifère. En revanche, 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. Les auteurs proposent que les radiofréquences entraîneraient une stimulation de l'axe hypothalamo-pituito-gonadique, qui pourrait être une cause de puberté précoce chez les rats. Les résultats sont à prendre avec réserves à cause de limites méthodologiques importantes concernant l'exposition (valeur réelle du champ électrique non mesurée), et la partie biologie (exposition des ratons de 2 jours sans leur mère, étude non en aveugle dans les analyses). De plus, les coupes histologiques de l'épithélium séminifère qui montrent une absence criante de spermatozoïdes due à la dégénérescence du tissu semblent contradictoires avec les valeurs de numération des spermatozoïdes qui ne montrent pas de variation de la concentration spermatique.

Lee *et al.* (2012) ont étudié les effets de l'exposition simultanée aux champs électromagnétiques CDMA et W-CDMA (DAS de 2 W/kg chacun (4 W/kg au total), 45 min par jour, 5 jours par semaine pendant 12 semaines) sur la fonction testiculaire du rat. Les paramètres mesurés comprenaient la concentration en testostérone du sérum, le nombre et la morphologie des spermatozoïdes dans l'épididyme, et des indicateurs de la péroxydation lipidique et de l'apoptose dans les testicules (méthode TUNEL et paramètres biochimiques en lien avec le processus apoptotique). La température rectale des animaux a également été contrôlée. Les auteurs concluent à l'absence d'effet de l'exposition combinée CDMA / WCDMA-RF sur le système reproducteur mâle chez le rat.

Au cours d'une étude sur l'immunité (voir paragraphe 5.9.1), Aït-Aïssa *et al*. (2012) ont évalué les effets d'une exposition *in utero* sur certains paramètres généraux de la santé de rats nouveau-nés (poids, comportement et posture), et sur la distance ano-génitale. Les animaux ont été exposés *in utero* (GD 6 – GD 21) ou de façon pré- et post- natale (GD 6 – PND 35) à un signal Wi-Fi (2 450 MHz, DAS = 0,08, 0,4 ou 4 W/kg) 2 heures par jour, 5 jours par semaine. L'exposition est bien contrôlée. Les résultats ne mettent en évidence ni de modification de la croissance ou du comportement, ni d'effet sur la distance ano-génitale. La méthodologie est très sérieuse car elle comporte une habituation des animaux au système d'exposition, la présence de contrôles positifs, d'une exposition factice et de contrôles cage.

Poulletier de Gannes *et al.* (2013) ont évalué les effets de l'exposition à un signal Wi-Fi de 2,45 GHz sur la reproduction de jeunes rats. Les rats mâles âgés de 7 semaines ont été exposés pendant 3 semaines tandis que les femelles, âgées de 8 semaines, ont été exposées pendant 2 semaines à raison d'1 h / j, 6 j / semaine. Lorsque les animaux ont atteint 10 semaines, un mâle et une femelle ont été regroupés à raison d'un couple par cage (12 couples), et l'exposition a encore duré 3 semaines. À la fin de l'exposition, les animaux sont euthanasiés. Chez les mâles, les testicules, épididymes, glandes séminales et la prostate ont été prélevés, examinés macroscopiquement puis soumis à une analyse histologique. Chez les femelles, les animaux ont été anesthésiés entre le 19ème et le 21ème jour de la gestation, et l'utérus et les ovaires ont été prélevés. Les ovaires ont été examinés pour déterminer le nombre de corps jaunes de chaque ovaire. L'utérus a été analysé pour déterminer le nombre de fœtus vivants et morts ainsi que le nombre et la distribution de chaque site d'implantation. Un examen des fœtus a été réalisé, avec examen macroscopique, poids et *sex-ratio*.

Les résultats, aux niveaux macroscopique et microscopique, ne montrent aucun effet de l'exposition aux radiofréquences sur le système reproducteur mâle chez le rat. Aucun effet de l'exposition aux radiofréquences n'est observé sur le système reproducteur femelle, que ce soit au niveau de l'histologie des ovaires ou en nombre et sites d'implantation des fœtus. Aucune différence n'a été constatée entre les différents groupes d'exposition concernant les fœtus.

En raison d'importantes limites méthodologiques, les résultats des études suivantes n'ont pas pu être exploités :

- Hancı *et al.,*(2013) ont exposé des rats *in utero* (GD 13 – GD21) à une antenne dipôle 900 MHz 1 h par jour. Le DAS n'est pas renseigné. À 21 jours post-natals, le testicule est prélevé. Les niveaux de peroxydation lipidique, d'oxydation de l'ADN, l'index apoptotique, les scores de dommages histopathologiques sont analysés. Le nombre de mère est trop faible, et le groupe d'exposition factice est en réalité un groupe contrôle cage, ce qui rend difficile l'interprétation des résultats.

- Sangun *et al.* (2014) ont étudié chez le rat les effets sur la croissance et le développement pubertaire d'une exposition à un signal Wi-Fi (2 450 MHz, 0,1 W/kg, 1 h / j). Ils ont réalisé 2 types d'exposition ; de GD 0 à la naissance, puis de PND 21 à la puberté et de PND 21 à la puberté. Des examens histologiques sont réalisés, les indicateurs du stress oxydant sont mesurés dans les organes reproducteurs et le cerveau (voir § 1.3.1.2.2), et les hormones sériques (LH, FSH, E2 et IGF-1) sont dosées. L'absence de groupe contrôle cage est regrettable, car les paramètres évalués (prise alimentaire, prise de poids) et les conditions d'exposition (contention dans un carrousel d'exposition) sont très impactés par le stress. De plus, les animaux ne semblent pas avoir été habitués préalablement au carrousel. L'interprétation des résultats n'est pas rigoureuse (comparaison avec d'autres travaux exposant des rats à des champs électromagnétiques basses fréquences).

Le groupe de travail « Radiofréquences et santé », à l'occasion de son travail sur la mise à jour des connaissances concernant les effets sanitaires des radiofréquences publié le 15 octobre 2013, avait identifié des études qui ne peuvent pas être utilisées pour évaluer les effets des radiofréquences sur la reproduction et le développement en raison des nombreux biais méthodologiques. Ces études sont : Gul *et al*. 2009, Fragopoulou *et al.* 2010, Lyaginskaja *et al.* 2010, Atasoy *et al.* 2013.

Tableau 27 : 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 *(se référer au texte pour les commentaires)*
Exposition *in utero*					
Lee *et al.*, 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 *in utero*	Mortalité maternelle Effets tératogènes	n = 4 ou 5	Absence de surmortalité maternelle. Absence d'effets tératogènes.
Ogawa *et al.*, 2009	W-CDMA 1 950 MHz DAS = 0,67 ou 2 W/kg 90 min/jour (GD 7 – GD 17)	Rat *in utero*	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 *sex-ratio*, le poids ou les anomalies viscérales ou squelettiques des fœtus viables.
Poulletier de Gannes *et al.*, 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 *in utero*	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.

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge lors de l'exposition	Effets étudiés	Nombre d'animaux / groupe	Résultats *(se référer au texte pour les commentaires)*
Exposition pré- et post- natale					
Cobb *et al.,* 2000	Signal pulsé UWB DAS = 45 mW/kg 24 h/24, 7 j/7 GD 3 – GD 18 ou GD 3 - PND 10 ou PND 1 – PND 10	Rat *in utero*	Capacité reproductrice	6 animaux par groupe	Diminution de la fréquence d'accouplement des petits mâles exposés *in utero* sans conséquence sur leur fertilité et sur le nombre de petits à la naissance. Aucun effet sur le développement postnatal.
Sommer *et al.*, 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 fœtale Développement génération F1	n = 128 mâles et 256 femelles	Absence d'effet sur la reproduction et le développement des souris.
Takahashi, *et al*., 2010	W-CDMA 2,14 GHz DAS_1 = 0,068 - 0,146 W/kg DAS_2 = 0,026 et 0,067 W/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 *(se référer au texte pour les commentaires)*
Lee *et al.* 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	20 rats / groupe	Aucun effet sur la fonction testiculaire (spermogramme, concentration en MDA, stades de maturation des spermatozoïdes, numération des cellules germinales, nombre de cellules apoptotiques).
Imai *et al.* 2011	GSM 1 950 MHz 5 h par jour pendant 5 semaines DAS = 0,08 et 0,4 W/kg	Rat 35 jours	Poids des organes reproducteurs (testicule, épididyme, vésicule séminale, prostate) Spermogramme Détection d'anomalies morphologiques	24 rats / groupe	Absence d'effet sur la fertilité et la qualité du sperme.
Ozlem Nisbet *et al.,* 2012	GSM 900 ou 1 800 MHz À 10, 20, 50 et 70 jours, pour 900 MHz : DAS = 3,0, 2,7, 2,2, 1,2 mW/kg pour 1800 MHz : DAS = 0,053, 0,046, 0,011, 0,011 mW/kg 2 h/j, 7 j/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 *(se référer au texte pour les commentaires)*
Lee *et al*. 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	20 animaux / groupe (témoin négatif et exposés) 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 *et al*. 2012	Wi-Fi à 2 450 MHz DAS = 0,08, 0,4 ou 4 W/kg 2 h/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.
Poulletier de Gannes *et al.* 2013	Wi-Fi à 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, épididyme, 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.

Référence	Exposition DAS Durée d'exposition	Espèce Âge lors de l'exposition	Effets étudiés	Nombre d'animaux / groupe	Résultats *(se référer au texte pour les commentaires)*
Sangun *et al.,* 2014	Wi-Fi 2 450 MHz DAS = 0,1 W/kg 1 h / 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 *in utero.* Augmentation du statut oxydant dans les tissus cérébraux chez les exposés *in utero.* 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.

5.7.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le système reproducteur mâle et femelle chez l'Homme et l'animal

- Concernant les effets tératogènes et le développement

Chez l'enfant, les données sont **inexistantes** (*cf.* Figure 51).

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 ; Poulletier 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 (*cf.* Figure 52).

En conclusion, les **données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet tératogène des radiofréquences ou sur le développement de l'enfant.** (*cf.* Figure 53).

Les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient un niveau de preuve insuffisant pour conclure à l'existence d'un effet tératogène ou sur le développement fœtal des radiofréquences chez l'Homme.

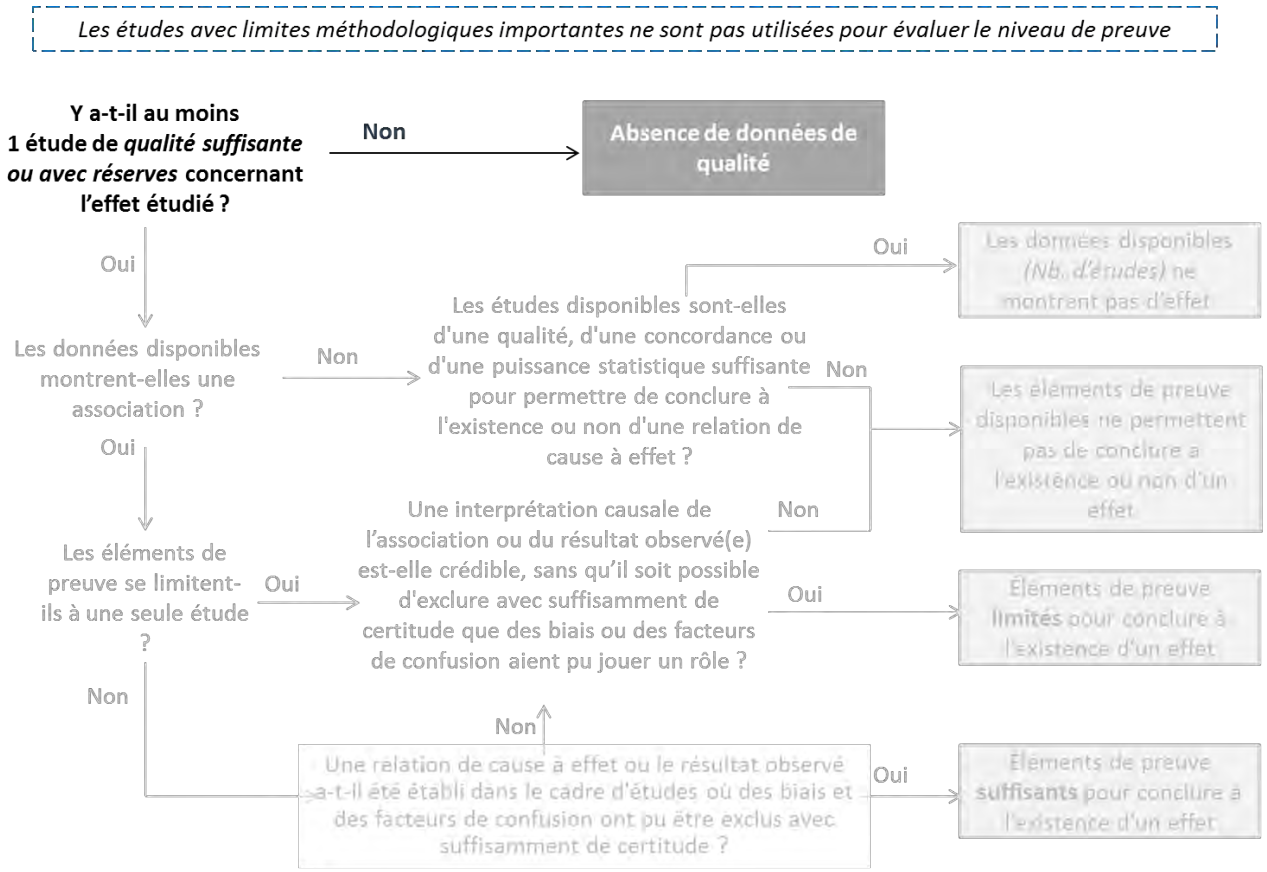


Figure 51 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets tératogènes dans les études épidémiologiques.

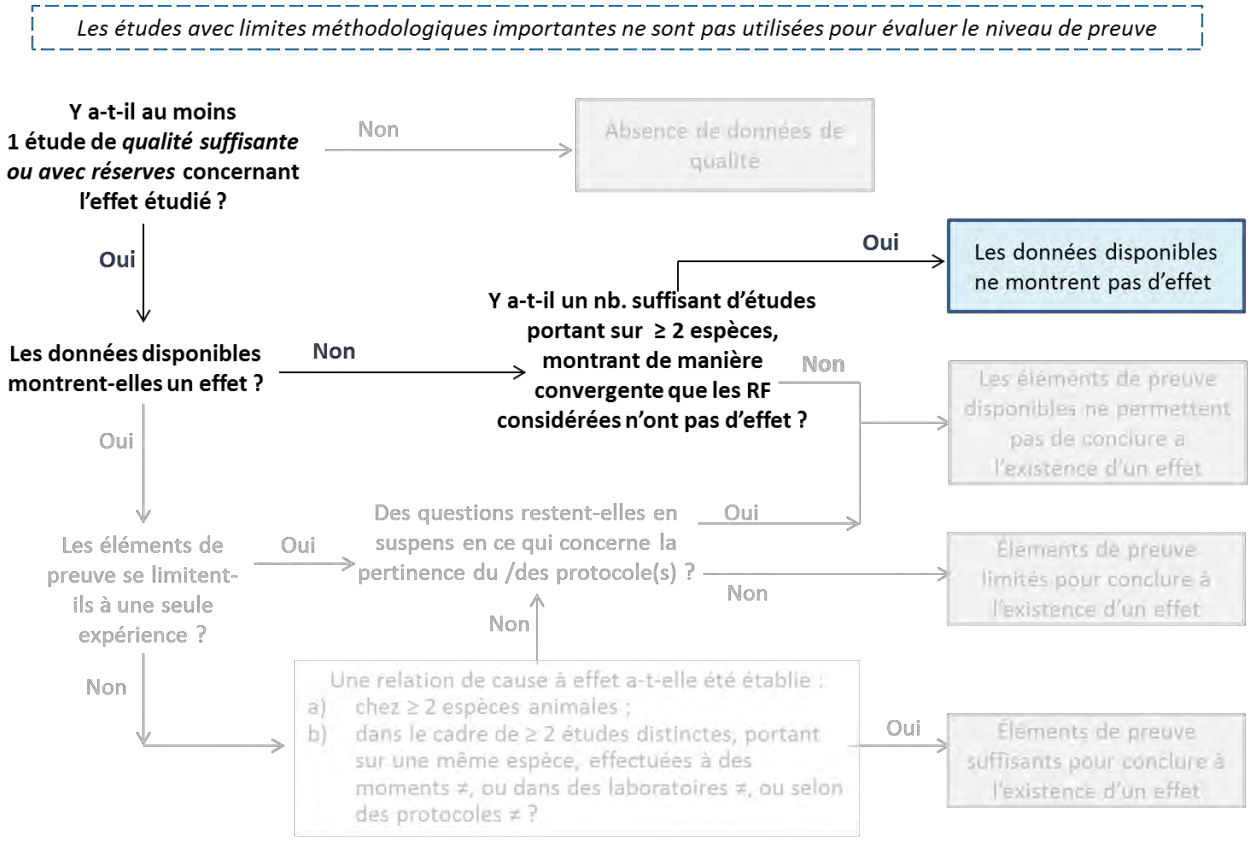


Figure 52 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets tératogènes dans les études sur les modèles animaux.

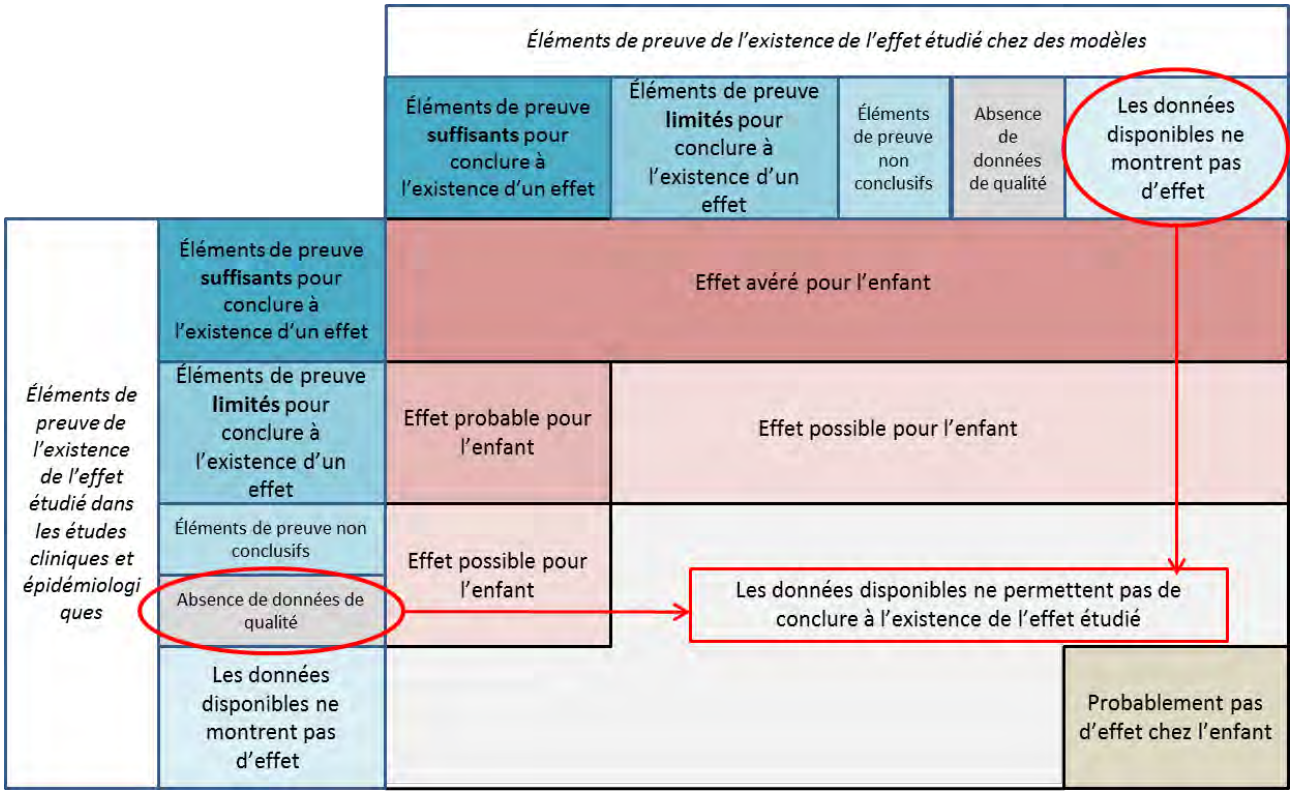


Figure 53 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur la tératogénicité et le développement chez enfant.

- Concernant le système reproducteur femelle

Chez l'enfant, les données sont **inexistantes** (*cf.* Figure 54).

Chez l'animal, quatre études se sont intéressé aux effets des radiofréquences sur le développement des organes reproducteurs féminins. Deux études ne rapportent pas d'effet (Sommer *et al.,* 2009 ; Poulletier de Gannes *et al.,* 2013). Takahashi *et al.,* (2010) montrent une diminution des corps jaunes chez les femelles F1 en gestation exposées au DAS le plus faible de l'expérience. Cependant, cette diminution ne semble pas affecter l'issue de la gestation. Sangun *et al.,* (2014) rapportent une puberté plus tardive et une augmentation de la LH circulante chez les animaux exposés à la fois en pré-natal et en post-natal à partir du 21ème jour et jusqu'à la puberté. Ces résultats ne semblent pas cohérents avec ceux de Takahashi *et al*. (2010), car une augmentation de la LH circulante aurait pour effet une augmentation des corps jaunes. Par conséquent, **les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet** des radiofréquences sur les organes reproducteurs femelles (*cf.* Figure 55).

En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des radiofréquences sur le système reproducteur femelle** de l'enfant (*cf.* Figure 56)**.**

Les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient que le niveau de preuve était *insuffisant* pour conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur la fertilité féminine.

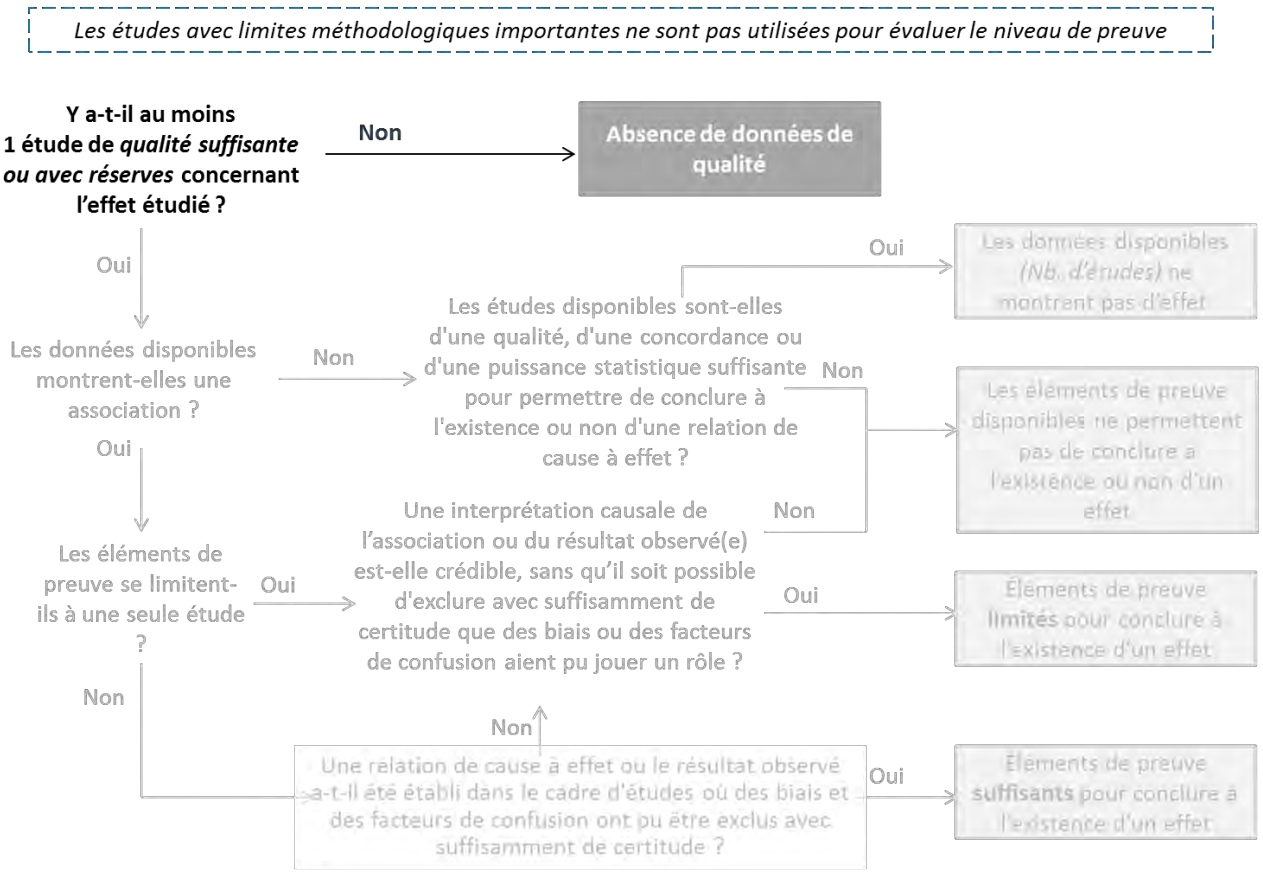


Figure 54 : évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur femelle dans les études épidémiologiques.

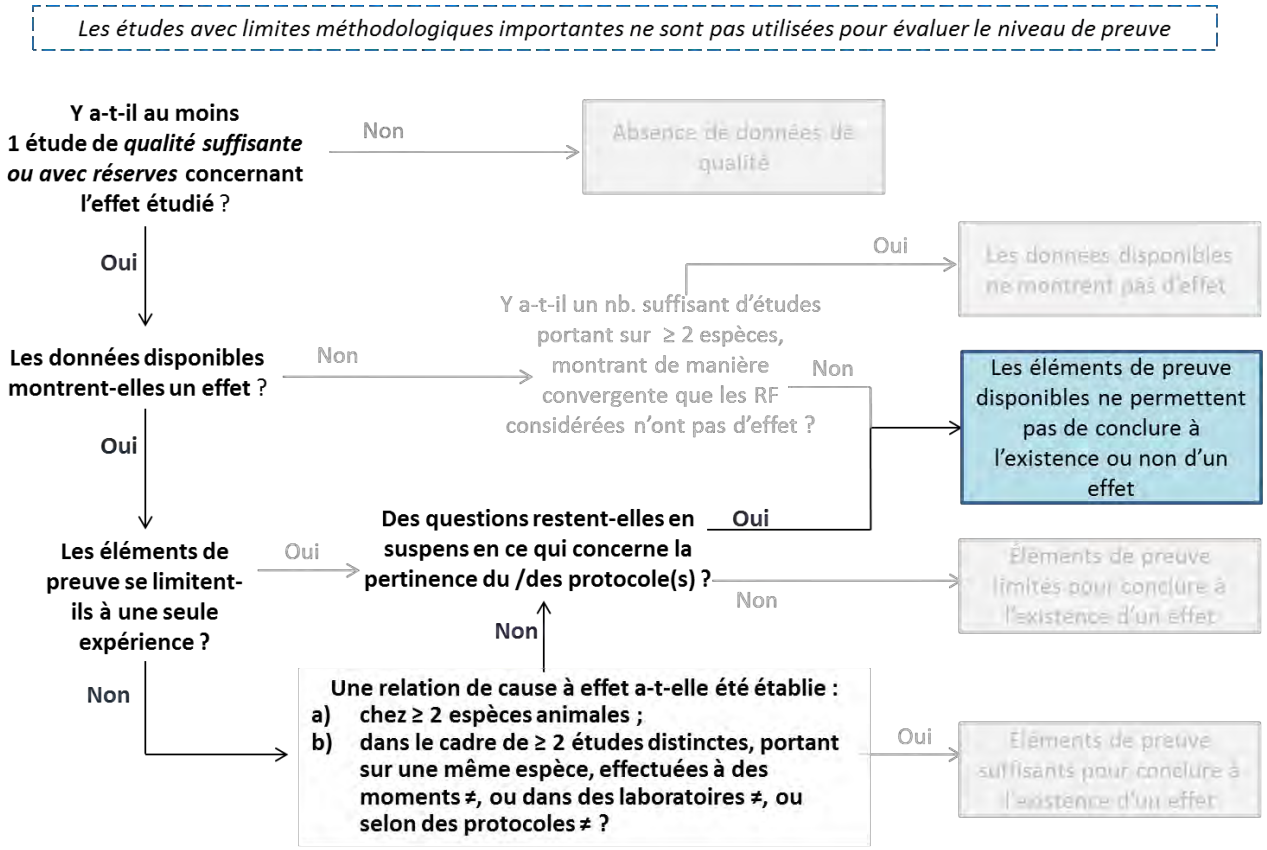


Figure 55 : évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur femelle dans les études sur les modèles animaux.

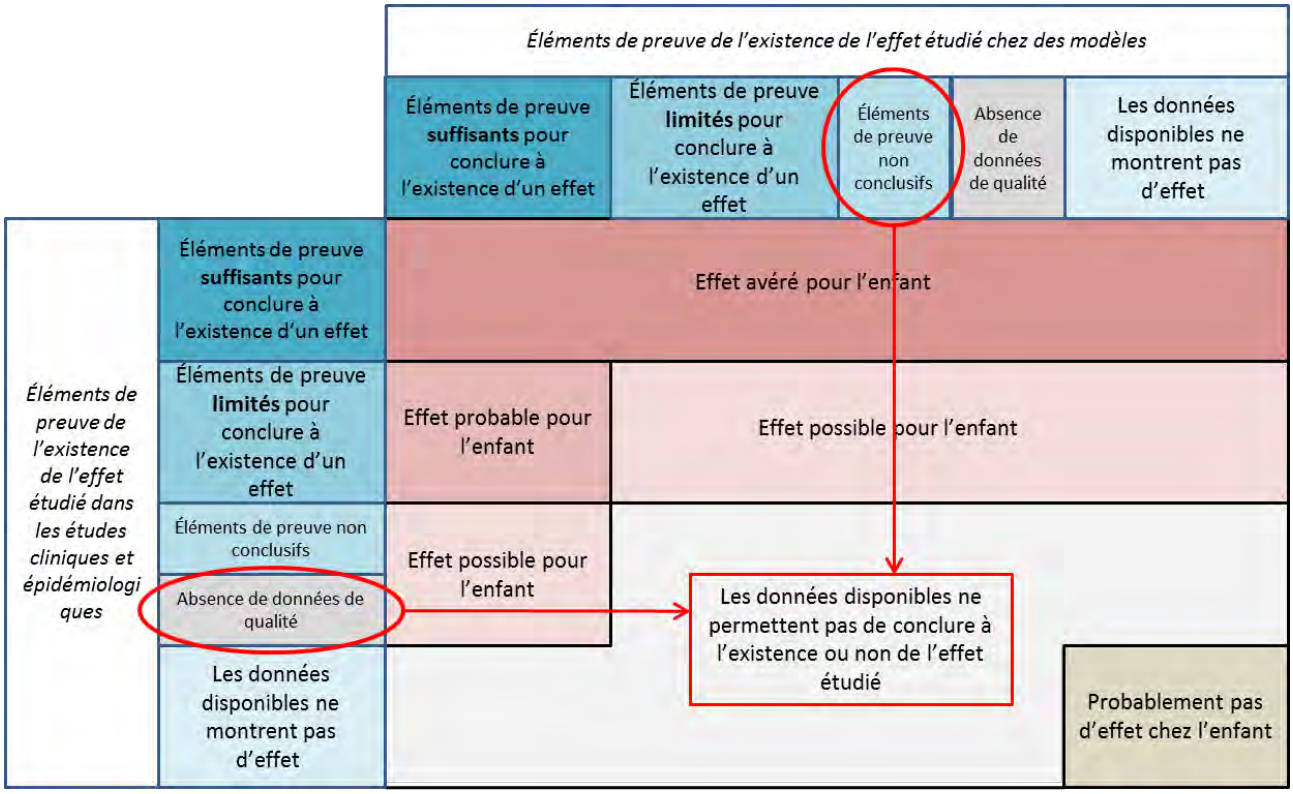


Figure 56 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le système reproducteur femelle chez l'enfant.

- Concernant les effets sur le système reproducteur mâle

Chez l'enfant, les données sont **inexistantes** (*cf.* Figure 57).

Chez l'animal, huit études ont évalué les effets de l'exposition aux radiofréquences sur le système reproducteur mâle. Quatre études ont réalisé un spermogramme. L'équipe de Lee (Lee *et al.,* 2010 et 2012) n'a pas trouvé d'anomalie sur la concentration et la morphologie spermatique après une exposition post-natale (à partir du 28ème jour). En revanche, pour les 2 autres études, les résultats ne sont pas concordants. En effet, Ozlem Nisbet *et al.,* (2012) rapportent chez le rat exposé à partir du 2ème jour postnatal une augmentation de la motilité des spermatozoïdes sans atteinte de leur concentration, mais avec un pourcentage d'anomalies histologiques augmenté. Imai *et al.,* eux, trouvent une augmentation de la concentration spermatique dans le groupe exposé à un DAS de 0,4 W/kg à partir du 35ème jour post-natal, sans anomalie dans la motilité des spermatozoïdes ni dans l'histologie des tubes séminifères.

Les autres études qui ont concerné une exposition prénatale et / ou postnatale ne rapportent aucune différence entre les groupes exposés et les non-exposés sur les paramètres investigués du système reproducteur mâle (Sommer *et al.,* 2009 ; Takahashi *et al.,* 2010 ; Lee *et al.,* 2011 ; Poulletier de Gannes *et al.,* 2013).

Par conséquent, **les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet des radiofréquences** sur le système reproducteur mâle chez l'animal (*cf.* Figure 58).

En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet des radiofréquences sur le système reproducteur mâle** de l'enfant (*cf.* Figure 59).

Les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient que le niveau de preuve était ***insuffisant*** pour conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur la fertilité masculine.

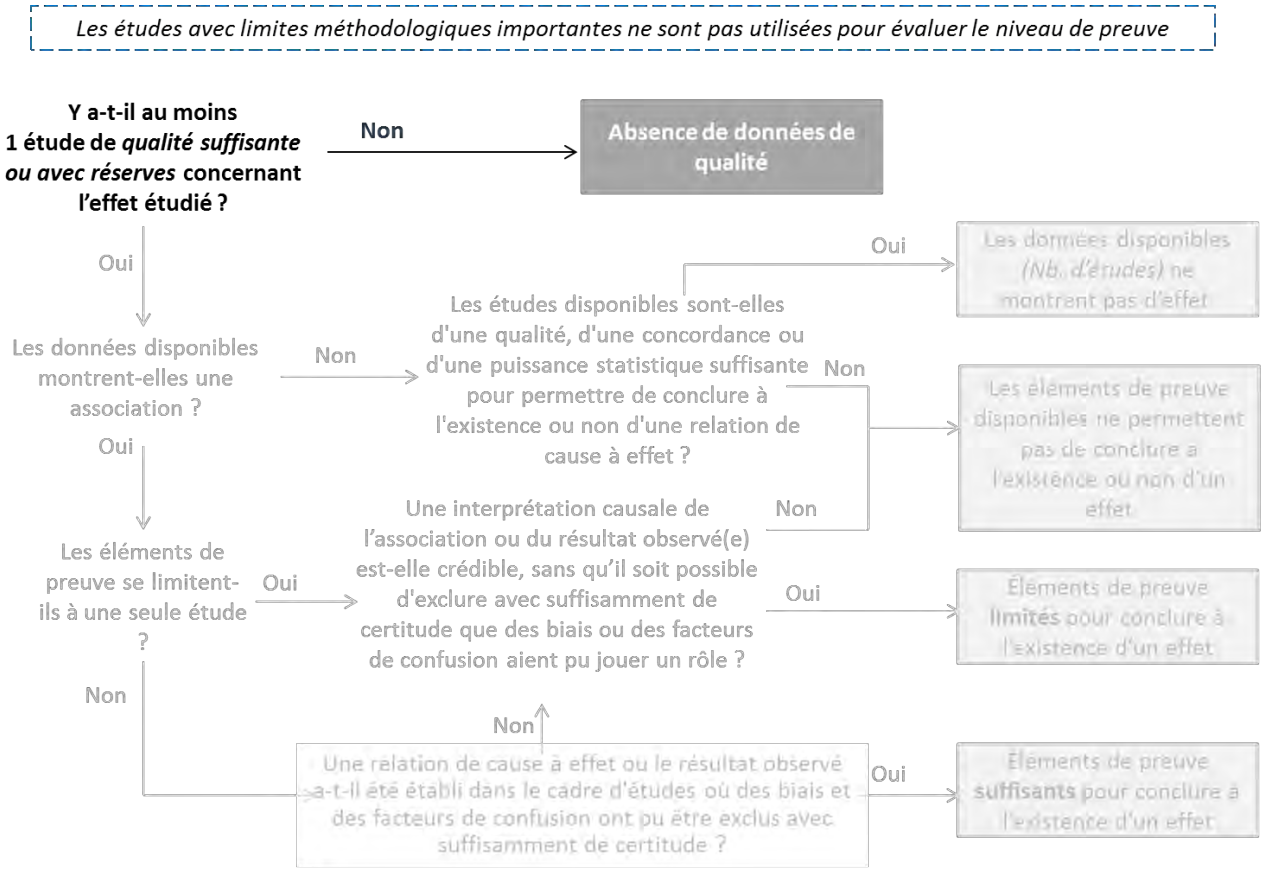


Figure 57 : évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur mâle dans les études épidémiologiques.

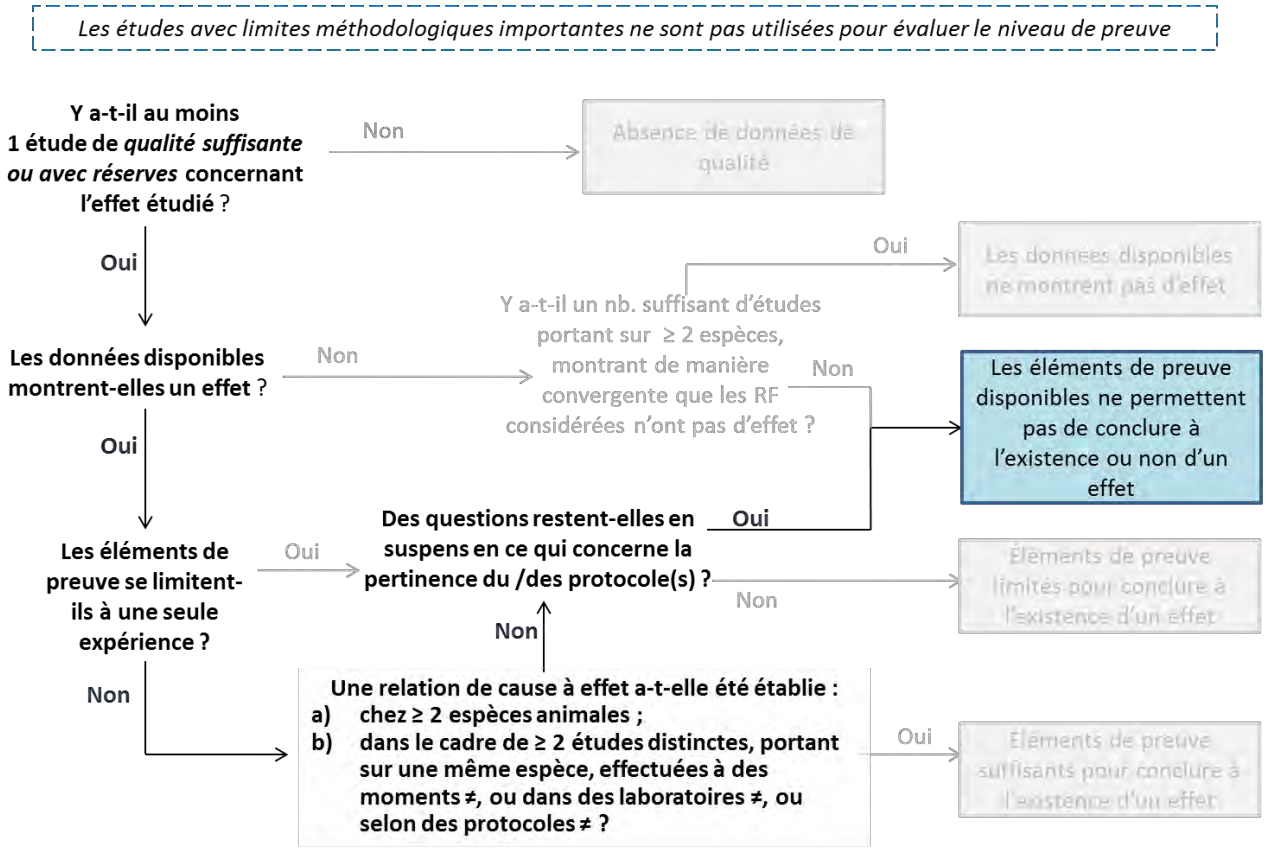


Figure 58 : évaluation des éléments de preuve relatifs au système reproducteur mâle dans les études sur les modèles animaux.

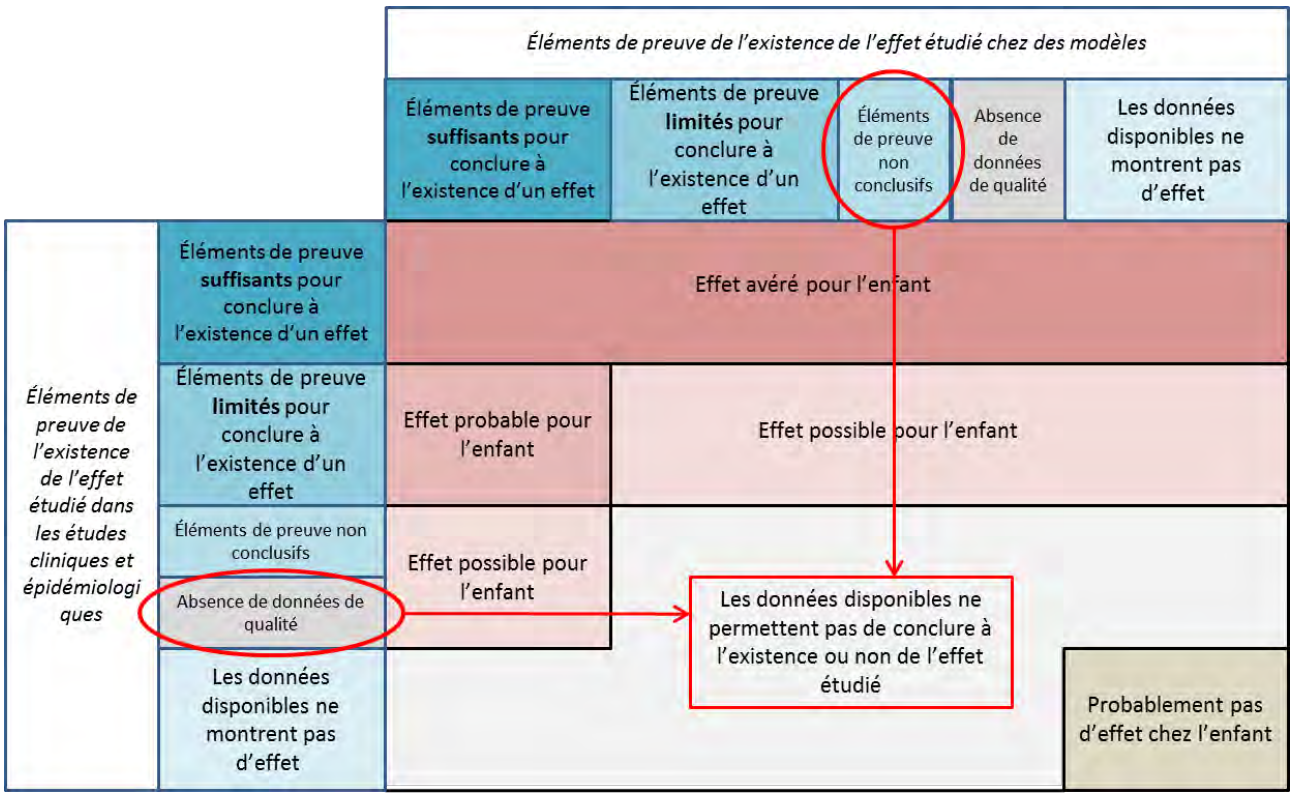


Figure 59 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le système reproducteur mâle chez l'enfant

5.8 Études sur la cancérogenèse

5.8.1 Chez l'Homme

5.8.1.1 Exposition aux tours d'émissions de radio et télédiffusion et stations de base de téléphonie mobile

Nous ne reprenons pas dans le détail les études anciennes, australienne [Hocking, 1996], radio-vatican [Michelozzi, 2001] et anglaise [Dolk, 1997a, 1997b], évoquées dans le rapport 2009. Elles avaient trouvé une augmentation de l'incidence des cancers dans les populations proches des tours d'émission de radio et télédiffusion. Ces études de type écologique ne permettent pas d'étudier le lien de causalité. De plus, elles souffraient de faibles effectifs, de biais probables et de l'absence de relation dose-effet. Une autre étude ancienne (Maskarinec *et al.,* 1994) a exploré un cluster de cas de leucémies infantiles à Hawai ; basé sur 12 cas, l'excès de risque associé au fait d'habiter à moins de 2,6 *miles* d'une tour d'émissions de radio FM ne peut pas être considéré comme significatif (OR = 2,0 ; [IC 95 % : 0,06–8,3]).

Park et al (2004) ont analysé, également dans une étude écologique, réalisée en Corée du Sud, les taux de mortalité par cancer sur la période 1994-1995 dans dix zones estimées exposées aux radiofréquences dans la bande FM de tours de radio de plus de 100 kW et dans 40 zones témoins (4 par zone exposée) (pas de tour de radio dans la zone ou dans les 2 km autour de chaque zone), appariées sur un certain nombre de critères administratifs (même région, même taille de population, même indice socioéconomique). Le ratio du taux de mortalité par leucémie, ajusté sur l'âge est plus élevé chez les enfants de 0-14 ans (MRR = 2,29 ; [IC 95 % : 1,05–5,98]) et 15-19 ans (MRR = 2,44 ; [IC 95 % : 1,07–5,24]) dans les zones exposées. Le manque de puissance (petit nombre de cas) ne permet pas de mettre en évidence une association avec les tumeurs du cerveau. Il n'existe pas de tendance quand on analyse les zones en fonction de la puissance des antennes. Cette étude écologique n'a pas pris en compte de facteurs confondants.

Ha *et al.*, (2007) se sont intéressés à la relation entre la survenue d'une tumeur cérébrale ou d'une leucémie infantile et le fait d'habiter dans l'entourage d'une des 31 tours de diffusion radiophonique AM (modulation d'amplitude) dans le cadre d'une étude cas-témoins en Corée du Sud (Ha *et al.*, 2007). L'étude a porté sur 1 926 cas et 3 082 témoins, âgés de moins de 15 ans, recrutés entre 1993 et 1999 dans l'un des 14 hôpitaux de Corée du Sud participant au système d'assurance publique. Les témoins ont été recrutés dans le même hôpital, parmi les enfants consultant pour des problèmes respiratoires la même année que le cas correspondant. Ils ont été appariés aux cas sur l'âge et le sexe. Les facteurs de confusion pris en compte sont le statut socioéconomique des parents et la densité de population autour des tours, en vue de prendre en compte le niveau d'industrialisation et de pollution environnementale. L'exposition a été évaluée d'une part à partir de la distance, et d'autre part à partir d'un modèle de propagation des champs à côté du domicile de chaque enfant, en tenant compte de la puissance des antennes, des conditions météorologiques moyennes et d'un certain nombre de caractéristiques géographiques locales. Ce modèle a été validé par des mesures de champs radiofréquences générés par les transmetteurs d'ondes radio AM (de fréquence comprise entre 540 kHz et 90 500 kHz), réalisées en points fixes et mobiles. Les résultats de cette étude mettent en évidence :

- un excès de leucémies (tous types) dans le périmètre le plus proche des tours (< 2 km) (OR = 2,15 ; [IC95 % : 1,00–4,67]). Cependant, pour le quartile supérieur d'exposition, un OR égal à 0,83 [IC95 % : 0,63-1,10], ce qui ne va pas dans le sens d'une relation entre les leucémies et l'exposition ;
- pour les leucémies lymphoïdes, les *odds-ratios* pour les quartiles 25 - 50 et 50 - 75 étaient supérieurs à 1 (respectivement 1,39 [IC 95 % : 1,04-1,86] et 1,59 [IC 95 % : 1,19–2,11], sans que la tendance avec le niveau d'exposition ne soit significative ;
- pour les leucémies myéloïdes, un *odds-ratio* supérieur à 1, à la limite de la significativité, a été observé (OR = 1,53 ; [IC 95 % :0,99–2,35] dans le quartile de l'exposition la plus élevée ;

- aucune association entre les tumeurs cérébrales et l'exposition aux champs électromagnétiques n'a été mise en évidence.

L'auteur relève certaines limites à l'étude, en particulier la non prise en compte des expositions antérieures, de l'exposition pendant la grossesse, et de l'exposition concomitante à d'autres sources de radiofréquences (téléphones mobiles et stations de base), cependant, les téléphones mobiles ont été introduits en Corée du Sud vers la fin des années 90, leur contribution à l'exposition ne doit donc pas être importante. Le choix de témoins ayant eu des problèmes respiratoires pourrait également être discuté. L'interprétation des résultats de cette étude, dans laquelle aucune relation dose-effet n'a été mise en évidence, doit également envisager la présence de facteurs de confusion qui n'auraient pas été pris en compte.

Merzenich *et al.* (2008) ont réalisé une étude cas-témoins portant sur les hémopathies malignes de l'enfant de 3 à 14 ans (leucémies lymphoïdes chroniques, leucémies myéloïdes chroniques, syndromes myéloprolifératifs, myélodysplasies) dans l'entourage de 24 tours d'émission radio et TV (16 tours AM et 8 FM/TV). De plus, 312 tours de transmission émettant un champ radiofréquence d'une puissance inférieure ou comparable aux principaux émetteurs des zones d'études ont également été intégrées dans la modélisation de l'exposition. L'identification des cas a été réalisée sur une période allant de 1984 à 2004 à partir des registres des cancers. Trois témoins appariés sur le sexe, l'âge et la zone d'étude ont été attribués à chaque cas. Les témoins ont été choisis de manière aléatoire dans la population générale vivant autour des tours de transmission au moment du diagnostic. L'étude porte sur 1 959 cas et 5 848 témoins. L'exposition individuelle aux champs radiofréquences a été calculée grâce à un logiciel initialement développé pour assurer une bonne couverture radiophonique et télévisuelle aux ménages allemands. Un système d'information géographique intégré, basé sur les coordonnées cartésiennes, utilisé en aveugle, a permis l'évaluation de l'exposition au niveau des lieux de résidence des cas et des témoins. L'évaluation de l'exposition des populations a été réalisée à partir des calculs des champs radiofréquences provenant de la télévision et des ondes radio AM et FM ; ce système de modélisation a été validé par comparaison avec des mesures environnementales de radiofréquences et les résultats ont montré que les champs mesurés et calculés sont très fortement corrélés. L'analyse a été effectuée par régression logistique conditionnelle. Les résultats observés sont les suivants :

- pas d'association entre l'exposition aux radiofréquences émises par les antennes de radio-télédiffusion et la fréquence de survenue de leucémies infantiles ;
- une stratification sur le temps (1983 - 1991 et 1992 - 2002) n'a pas mis en évidence une différence avant et après l'introduction du téléphone mobile ; cependant, cette dernière analyse est peu pertinente car rien ne permet d'assurer que les leucémies dues au téléphone mobile seraient susceptibles de se développer dès la date de développement du téléphone mobile (pas de prise en compte de l'exposition progressive, et de la latence attendue pour ce type de pathologie). L'analyse des seuls enfants âgés de 0 à 4 ans n'a pas changé les résultats.

La limite la plus importante de cette étude repose sur le fait que seule l'adresse au moment du diagnostic du cas a été prise en compte. Or, les enfants ont pu vivre à d'autres adresses, la dernière pouvant être assez récente pour ne pas contribuer à l'exposition en cause.

Elliott *et al.* (2010) ont étudié en Grande-Bretagne, de 1999 à 2001, l'exposition *in utero* aux stations de base pour 1 397 enfants de moins de 4 ans, atteints de cancers (tumeurs solides et leucémies) de l'enfant (73 % des cas éligibles, identifiés dans le registre des cancers), et de 5 588 témoins appariés sur la date de naissance et le sexe (90 % des témoins éligibles, identifiés dans les registres de naissances) (Elliott *et al.* 2010). L'exposition aux stations de base (81 781 antennes GSM à 900 MHz et 1 800 MHz) a été estimée par une modélisation basée sur des mesures sur le terrain (à l'extérieur des habitations) et tenant compte de plusieurs paramètres : distance entre l'adresse du domicile au moment de la naissance et l'antenne la plus

proche, directivité et densité de puissance de cette antenne. S'agissant des tumeurs du cerveau et du système nerveux central (251 cas), les observations sont les suivantes :

- absence d'association avec la distance : OR (0 - 612 m) = 1,0 ; [IC 95 % : 0,7-1,4] ;
- absence d'association avec la densité de puissance : OR (> 0,017 mW/m^2) = 0,8 ; [IC 95 % : 0,5-1,1].

Dans cette étude cas-témoin, les sources d'exposition aux radiofréquences autres que les antennes-relais au domicile n'ont pas été prises en compte. De plus, l'adresse à la naissance n'est pas forcément l'adresse lors de la grossesse (nombreux déménagements en fin de grossesse en raison de l'arrivée prochaine d'un enfant), ce qui limite la portée des conclusions.

Hauri *et al,* (2014) ont investigué l'association entre l'exposition aux radiofréquences émises par les tours d'émissions de radio (FM) ou de télévision et les cancers de l'enfant, enregistrés dans le registre suisse des tumeurs de l'enfant. Deux types d'analyse ont été réalisés : une analyse de Cox sur la période 2000-2008 (*time to event*) et une analyse de densité d'incidence dans la population des jeunes suisses habitant dans le pays entre 1985 et 2008. Aucun effet de l'exposition n'a été retrouvé, ni sur le risque de cancers en général, ni sur les leucémies. En revanche, sur les tumeurs cérébrales, un OR augmenté est retrouvé dans la première étude (test de tendance significatif) chez les sujets ayant l'exposition la plus forte, mais pas dans la deuxième analyse. Cependant, lorsqu'une stratification sur la période d'exposition est réalisée (avant et après l'introduction du téléphone mobile), le résultat de l'analyse de densité d'incidence sur les tumeurs du cerveau est significatif pour la première période (1985-1995). De très nombreux facteurs de confusion sont pris en compte dans la première analyse, mais pas dans la seconde : les auteurs montrent cependant que l'effet de confusion est très faible, et qu'il est légitime de ne pas en avoir tenu compte dans la deuxième analyse. Les auteurs mentionnent également que dans la première analyse (*time to event*), les résultats semblent « tirés » par deux valeurs extrêmes de l'exposition, il est regrettable qu'une analyse excluant ces deux cas n'ait pas été présentée afin d'évaluer cet effet. Il faut signaler que l'exposition au téléphone mobile personnel n'est pas prise en compte et pourrait jouer un rôle de confusion sur la période la plus récente (1995-2008). Cette étude présente une méthodologie très soignée et très solide ; les auteurs signalent cependant que les résultats sur les tumeurs du cerveau ne sont pas totalement cohérents. Néanmoins, il est difficile de les suivre dans leur affirmation que la seconde analyse serait plus légitime que la première, par le fait notamment que dans la première étude, les expositions aux adresses antérieures au diagnostic ont été prises en compte, alors que dans la seconde seule l'adresse au moment du diagnostic est intégrée.

5.8.1.2 Exposition *via* le téléphone mobile

5.8.1.2.1 Analyse des tendances temporelles

Les analyses de l'incidence des tumeurs du cerveau chez les jeunes montrent :

- une légère diminution du taux d'incidence chez les 7-19 ans en Suède, pour des données disponibles jusqu'en 2008 (Aydin et al., 2011) ;
- une stabilité des taux d'incidence des tumeurs cérébrales malignes en Angleterre dans les groupes d'âges 0-9 et 10-19 ans, explorée jusqu'en 2007 (de Vocht et al. 2011a) ;
- une stabilité des taux d'incidence des tumeurs cérébrales aux États-Unis chez les enfants et adolescents de 5-19 ans analysée entre 1996 et 2007 (Boice & Tarone 2011) ;
- une stabilité des taux de tumeurs cérébrales en Gironde (France) sur la période 2000-2007 (Baldi et al. 2011) pour les moins de 25 ans.

La Figure 60 montre deux projections de la courbe d'évolution de l'incidence des gliomes dans l'étude d'Aydin *et al.,* (2011) sous deux hypothèses du niveau du risque relatif : l'hypothèse haute (OR = 2,15) semble peu compatible avec les données d'incidence observées, contrairement à la seconde hypothèse (OR = 1,36), compte-tenu de l'incertitude liée aux différents calculs.

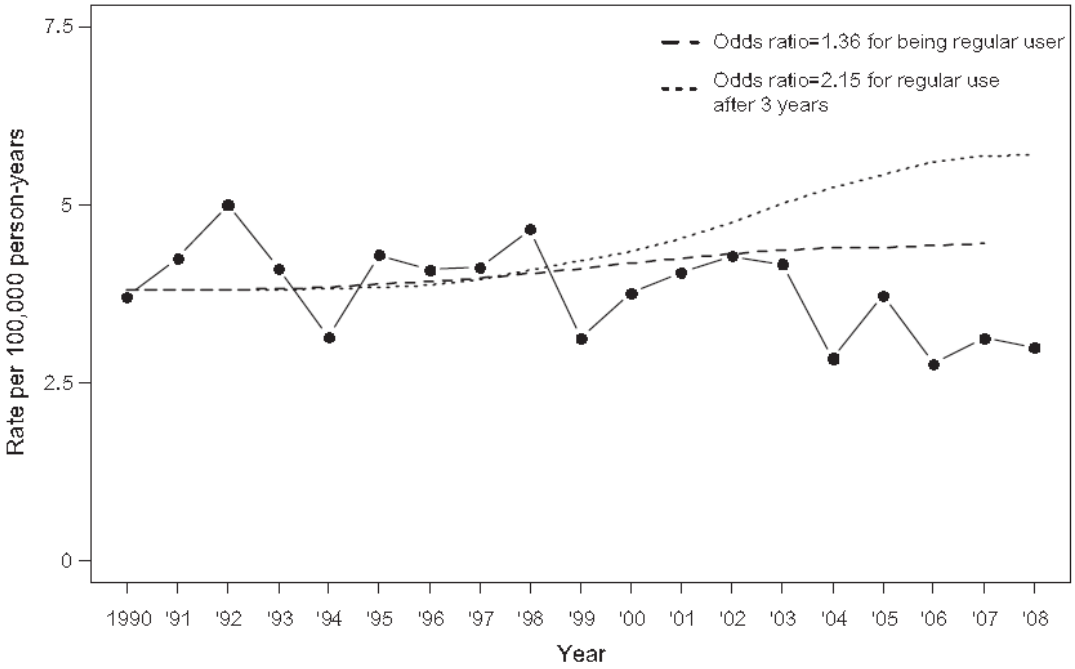


Figure 60 : taux de gliomes standardisés sur l'âge et le sexe parmi les enfants et adolescents suédois âgés de 5 à 19 ans entre 1990 et 2008 (d'après Aydin *et al.,* 2011).

Lignes discontinues : tendance des taux d'incidence projetés sous l'hypothèse que le risque augmenterait l'incidence de 36 % [OR = 1,36] (tirets larges) ou de 115 % [OR = 2,15] (tirets fins) après 3 ans de latence. Ligne continue : taux d'incidence observés.

Kundi a commenté les résultats d'Aydin *et al.*, objectant que l'augmentation de l'utilisation du téléphone mobile entre 1985 et 2003 ne pouvait pas conduire à une augmentation notable des taux de tumeurs cérébrales pour la période 1998 - 2007, même si le téléphone mobile était associé à une augmentation du risque de tumeurs, à cause de la longue latence d'apparition de ces tumeurs (Kundi 2011). Il a émis l'hypothèse qu'une partie de l'augmentation d'incidence des tumeurs de localisation temporale pouvait néanmoins être attribuée à l'exposition aux radiofréquences. Ces commentaires ont motivé une analyse plus approfondie de l'incidence des tumeurs cérébrales (de Vocht *et al*. 2011b), qui n'a pas mis en évidence de tendance temporelle depuis 1979 quels que soit le sexe ou la classe d'âge. Des augmentations annuelles des taux de tumeurs du lobe temporal (0,04 nouveau cas/an chez l'homme et 0,02 nouveau cas par an chez la femme) sont observées, ainsi que des diminutions des taux de tumeur du lobe pariétal, du cerveau et du cervelet chez l'homme seulement. Si l'augmentation du taux de tumeur du lobe temporal est due à l'exposition au téléphone mobile, elle ne constituerait qu'un cas sur 100 000 entre 1998 et 2007. Les auteurs concluent donc que l'augmentation de l'utilisation du téléphone mobile entre 1985 et 2003 n'a pas entraîné de changement notable dans l'incidence des tumeurs cérébrales en Angleterre entre 1998 et 2007. Ils recommandent toutefois de répéter ce type d'analyse comme outil de surveillance de santé publique.

5.8.1.2.2 Études cas-témoins

L'étude cas-témoin multicentrique CEFALO (Danemark, Norvège, Suède et Suisse) a été réalisée chez des enfants et adolescents de 7 à 19 ans : les 352 cas ont été sélectionnés sur le diagnostic d'une tumeur du cerveau entre 2004 et 2008 ; les 646 témoins ont été sélectionnés à partir de registres de population, et appariés par âge, sexe, et régions géographiques. Un questionnaire sur les habitudes d'utilisation des téléphones mobiles a été complété avec les parents. L'exposition a été évaluée grâce aux données du questionnaire, mais certaines données des opérateurs

téléphoniques disponibles ont aussi été incluses dans l'étude (Aydin et al. 2011). Les résultats de l'étude montrent que :

- l'excès de risque de survenue d'une tumeur cérébrale en comparaison avec les non-utilisateurs, observé pour les utilisateurs réguliers, n'est pas statistiquement significatif (OR = 1,36 ; [IC 95 % : 0,92-2,02]) ;
- les enfants qui ont commencé à utiliser un téléphone mobile au moins 5 ans auparavant ne présentent pas d'excès de risque significatif par rapport à ceux qui ne l'ont jamais régulièrement utilisé (OR = 1,26 ; [IC 95 % : 0,70-2,28]) ;
- si les risques relatifs globaux augmentent avec la quantité d'usage pour plusieurs indicateurs, aucune relation significative « exposition-réponse » n'apparaît par localisation de la tumeur cérébrale. Le risque relatif de tumeur n'est pas supérieur dans l'aire cérébrale la plus proche du téléphone (lobe temporal), de fait la plus exposée.

Pour les participants ayant donné leur accord et ayant fourni leur numéro de téléphone, la comparaison entre leurs déclarations et les données de trafic fournies par 2 opérateurs suédois et 3 opérateurs danois pour 48 cas et 86 témoins (environ 34 % des participants danois et suédois) a montré une fréquence d'erreurs et de biais de rappel encore plus importante que chez les adultes de l'étude Interphone, ce qui pourrait refléter la difficulté des participants à évaluer correctement leur niveau d'usage passé. Pour ce sous-ensemble de sujets pour lesquels les données des opérateurs étaient disponibles au Danemark et en Suède, l'analyse du risque en fonction du temps depuis la première souscription a montré :

- un OR augmenté (OR = 2,15 ; [IC 95 % : 1,9-4,3]) pour plus de 2,8 ans d'abonnement (basé sur 24 cas) ; cependant, la probabilité de survenue n'augmente pas avec la durée cumulée des appels ;
- des OR élevés mais non significatifs pour les autres indicateurs d'exposition obtenus *via* les données fournies par les opérateurs, et sans relation dose-effet (Aydin, et al. 2011a).

L'étude CEFALO a une puissance limitée, ce qui pourrait expliquer que certains *odds-ratios* soient augmentés mais non significatifs. De plus, les données auto-rapportées telles que le nombre d'appels et leur durée peuvent induire des biais de classement. L'utilisation des données des opérateurs pour déterminer l'exposition a probablement été utile pour réduire ce biais, mais ces données ne sont pas disponibles pour tout l'échantillon et leur disponibilité n'est pas aléatoire (Aydin *et al*., 2011). Les données stratifiées sur les pays participant à l'étude sont très disparates et évoquent la possibilité d'un biais de sélection très important dans certains pays (OR utilisateur régulier Suède : OR = 1,73 ; [IC 95 % : 0,87-3,41] / Norvège : OR = 0,51 ; [IC 95 % : 0,18-1,41]) : la réalisation d'études de sensibilité aurait été sans doute intéressante.

Söderqvist *et al.* ont contesté la conclusion d'Aydin *et al.* dans un commentaire publié en 2011 (Soderqvist et al. 2011). Ils ont considéré que les données contenaient plusieurs indications d'une augmentation de risque, en dépit de la faible exposition, de la courte période de latence et des limites de la conception, des analyses et de l'interprétation de l'étude.

Dans leur réponse, Aydin *et al.* notent que Söderqvist *et al.* n'expliquent pas comment une augmentation notable de risque correspondrait à une tendance temporelle relativement stable de l'incidence des tumeurs cérébrales chez les enfants et les adolescents dans les pays nordiques et dans d'autres pays, et montrent pourquoi la vérification de la cohérence entre les résultats des études cas-témoins et les tendances temporelles des taux d'incidence est essentielle, compte tenu des limites des études cas-témoins et de l'augmentation rapide de l'utilisation de téléphone mobile par les enfants et les adolescents au cours des dix dernières années. Toutefois, ils notent qu'*une augmentation de risque restreinte à une utilisation importante du téléphone mobile, à une exposition très tôt dans la vie, ou à de rares sous-types de tumeurs cérébrales, peut être compatible avec la stabilité des tendances d'incidence actuelles*, impliquant la poursuite d'une étroite surveillance des taux d'incidence des tumeurs cérébrales de l'enfant (Aydin *et al*. 2012).

L'étude Mobi-Kids est une étude cas-témoins en cours dans 13 pays. Sur une période de 5 ans seront inclus dans l'étude près de 2 000 patients de 10 à 24 ans atteints de tumeurs cérébrales et 4 000 témoins du même âge. Elle utilise des données validées sur l'exposition chez les enfants et les jeunes adultes et prend en compte de nombreux facteurs potentiellement confondants. Ses résultats devraient permettre d'apporter un certain nombre d'éclaircissements.

5.8.1.3 Autres expositions des enfants aux radiofréquences

Il n'existe pratiquement aucune étude évaluant la relation entre des expositions aux radiofréquences autres (veille-bébé, jouets, *etc.*) que celles liées aux stations de base, aux antennes et au téléphone mobile.

Une seule analyse réalisée par Aydin *et al.* (2011) dans le cadre de l'étude CEFALO s'est intéressée à la relation entre usage du veille-bébé et tumeurs cérébrales. Aucun excès de risque n'a été mis en évidence ($OR_{usage\ de\ babyphone}$ = 0,96 ; [IC 95 % :0,50-1,86]). Cependant, ne s'agissant pas de l'objet principal de l'étude, il n'est pas possible de connaître les conditions de l'usage et la qualité du recueil de cette information (Aydin *et al.*, 2011).

Tableau 28 : 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 *et al*., 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]
Merzenich *et al*., 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 (≥ 95 %/0,701 V/m) et bas (<90%/0,504 V/m) OR = 0,86 [0,67– 1,11]
Elliott *et al.,* 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	À 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]

Étude	Type d'étude	Population	Pathologie étudiée	Caractérisation de l'exposition	Nombre de sujets	Mesure d'association (avec IC à 95%)
Aydin *et al.*, 2011	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]
Hauri *et al.,* 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	1ère 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]
					2ème 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]

5.8.2 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 (Ptcl$^{+/-}$)* 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 *Ptcl$^{+/-}$* et 200 souriceaux non mutés (*wild type Ptcl$^{+/+}$)* 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 2ème 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 medulloblastomes, 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 aigue 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.

Cette étude a utilisé un protocole très rigoureux et un nombre très important d'animaux, ce qui lui donne un poids et une puissance statistique particulièrement forts.

L'étude de Tillmann *et al.* (2010) s'est intéressée à l'effet cancérogène des radiofréquences au cours d'une co-exposition en présence d'ENU[44]. Dans cette expérimentation, 5 groupes de souris sont utilisés : 1) témoin, 2) témoin-cage, 3) exposé *in utero* à l'ENU puis de manière chronique (20 h / j durant 2 ans) à un rayonnement électromagnétique de type 3G (UMTS) à 4,8 W/m^2, 4) exposé à l'ENU uniquement et 5) exposé aux rayonnements UMTS à 48 W/m^2 uniquement. Les résultats de ces travaux mettent en évidence des augmentations significatives de l'incidence des tumeurs chez les animaux co-exposés aux radiofréquences par rapport à ceux exposés à l'ENU seul. En effet, les incidences du carcinome bronchoalvéolaire multiple et de l'adénome hépatocellulaire multiple sont significativement augmentées chez les animaux co-exposés (ENU + radiofréquences) par rapport au groupe ENU seul. En revanche, aucun effet n'est observé chez les animaux exposés aux radiofréquences uniquement (Tillmann *et al.,* 2010). Cette étude bien menée ne met pas en évidence un effet cancérogène des radiofréquences seules, mais les présente comme un potentiel cofacteur cancérogène.

Jin *et al.* (2011) ont suivi des rats Sprague-Dawley (50 % de mâles et 50 % de femelles, n = 20 par groupe). Les animaux, âgés de 5 semaines, ont été exposés à des radiofréquences (signal de type CDMA à 849 MHz et W-CDMA à 1,95 GHz simultanément, DAS de 2,0 W/kg chacun, soit un total de 4 W/kg) pendant 45 min / j, 5 jours par semaine pendant 1 an. Une analyse histopathologique de la majorité des organes a été réalisée (cerveau, thymus, cœur, foie, rate, rein, ovaires, testicules, ganglions lymphatiques). Aucune différence statistiquement significative n'a été mise en évidence entre les groupes exposés et le groupe témoin.

La même équipe s'est intéressé à l'effet cancérogène des radiofréquences en exposant des souris de manière chronique (42 semaines), à des signaux de type CDMA et WCDMA simultanément pour un DAS total de 4 W/kg. Ils ont étudié la survie, l'apparition de tumeurs, les diffusions métastatiques, les paramètres immunohistochimiques. Aucune différence significative n'a pu être mise en évidence entre les groupes exposés et témoins (Lee *et al.,* 2011).

Şekeroğlu *et al*. (2012) ont également étudié les effets cytotoxiques et génotoxiques d'une exposition de 45 jours (2 h / j) sur les cellules de la moelle osseuse issues de jeunes rats exposés à partir de l'âge 15 jours post-natal ou de rats adultes exposés à partir de l'âge de 10 semaines. De plus, les auteurs ont testé la possibilité d'une récupération au cours des 15 jours suivant la fin de l'exposition. L'étude a porté sur 6 groupes de rats (n = 8 / groupe), 3 groupes par catégorie d'âge (immature *vs* mature) avec 2 groupes de rats contrôle cages), 2 groupes de rats exposés pendant 45 jours (DAS = 0,37 W/Kg pour rats immatures, DAS = 0,49 W/kg pour les rats adultes) et 2 groupes de rats exposés et testés après un délai de 15 jours post-exposition. Immédiatement après exposition, les résultats montrent une augmentation significative de la fréquence des aberrations chromosomiques (CA), et des micronoyaux (MN) chez les rats exposés, juvéniles ou matures, avec une fréquence plus élevée chez les animaux jeunes. Le type de lésion d'ADN le plus retrouvé est la fragmentation des brins. Chez les rats juvéniles, la période de récupération diminue la formation de CA et de MN. L'index mitotique (IM) et le rapport des érythrocytes polychromatiques (PCEs) sont significativement diminués chez les rats exposés (matures et immatures) et restent bas même après la période de récupération. Les auteurs concluent sur la nécessité d'études complémentaires pour comprendre les effets des radiofréquences sur l'ADN et les mécanismes de réparation et pour déterminer les limites d'exposition environnementale, en particulier pour les enfants. L'exposition semble homogène pour tous les rats, et bien que la puissance soit élevée, les niveaux de champs ne donnent pas d'effets thermiques.

[44] ENU : N-nitroso-N-éthylurée est un initiateur de tumeur, c'est-à-dire un agent génotoxique qui induit une lésion définitive de l'ADN.

La limite méthodologique majeure est l'absence de groupe d'exposition factice, l'étude possédant seulement un groupe contrôle cage. L'intégration d'un groupe d'exposition factice est d'autant plus cruciale que les animaux exposés sont en contention, occasionnant un stress important. L'absence de contrôle positif est également regrettable, alors qu'il n'aurait pas été très contraignant d'en inclure un en administrant un agent cancérigène.

Tableau 29 : études investiguant les effets cancérogènes 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 *(se référer au texte pour les commentaires)*
Shirai *et al.,* 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	Pas d'effet cancérogène ni d'effet co-cancérogènes.
Saran *et al.,* 2007	GSM 900 MHz DAS = 0,4 W/kg 2x30 min/jour pendant 5 jours	Souris mutée $Ptcl^{+/-}$ PND 2 – PND 7	Effet cancérogène	200 animaux par groupe	Pas d'effet cancérogène. Pas d'effet sur la survie des animaux.
Ziemann *et al.,* 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 *et al*., 2010	UMTS 1966 MHz DAS = 4,8 et 48 W/m² 20 h/jour, 7 j/semaine, pendant plus de 2 ans	Souris *In utero*	Effet cancérogène et co-cancérogène avec l'administration d'un initiateur de tumeur (ENU)	50 à 60 animaux pour les petits exposés	Pas d'effet cancérogène des RF seules. Signal UMTS potentiellement co-cancerogène : augmentation de l'incidence et de la multiplicité du carcinome malin bronchoalvéolaire et de l'incidence de l'adénome hépatocellulaire.
Jin *et al.,* 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 cancérogène	20 animaux par groupe	Pas d'effet cancérogène (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 *(se référer au texte pour les commentaires)*
Lee *et al.,* 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 *et al.,* 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.

5.8.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet cancérigène des radiofréquences

Si parmi les études anciennes de type écologique quelques-unes ont trouvé une augmentation de l'incidence pour certains cancers de l'enfant (leucémies, tumeurs du cerveau dans des zones exposées aux champs radiofréquences), il n'est pas possible d'en tenir compte dans l'évaluation de la relation causale, du fait des caractéristiques inhérentes à ce type d'études.
Sur les 4 études les plus récentes 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 dans la bande FM et les leucémies de l'enfant, alors que les tumeurs du cerveau sont augmentées chez les plus exposés. 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.

Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet cancérogène des radiofréquences chez l'enfant (Figure 61)**.**

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-cancerogène 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'objetl 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 ou non d'un effet** cancérogène ou co-cancérogène chez l'animal (Figure 62).

En conclusion, les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'**un effet cancérogène** des radiofréquences chez l'enfant (*cf.* Figure 63).

Toutefois, rappelons que dans le rapport publié par l'Agence en 2013 sur les effets des radiofréquences sur la santé, un effet possible des radiofréquences sur l'apparition des gliomes avait été déterminé pour les utilisateurs « intensifs » de téléphone mobile, c'est-à-dire ayant cumulé plus de 1640 h d'exposition. Une augmentation du risque de gliome 1) faible, 2) limitée à de petit sous-groupes d'utilisateurs (les utilisateurs intensifs par exemple), 3) associée uniquement à un ou des types rares de tumeurs gliales, 4) pour des durées d'induction supérieures à 15 ans (aucune donnée n'étant disponible au-delà) ne pouvait être exclue.

Dans la mesure où les tumeurs de l'enfant ne sont pas comparables aux tumeurs de l'adulte, les conclusions du rapport de 2013 montrant un effet limité des radiofréquences chez l'adulte sont difficilement extrapolables à l'enfant. Ceci ne permet cependant pas d'exclure que les enfants exposés ne développeront pas de tumeurs ultérieurement. Les résultats de l'étude Mobikids sont, dans ce contexte, particulièrement attendus.

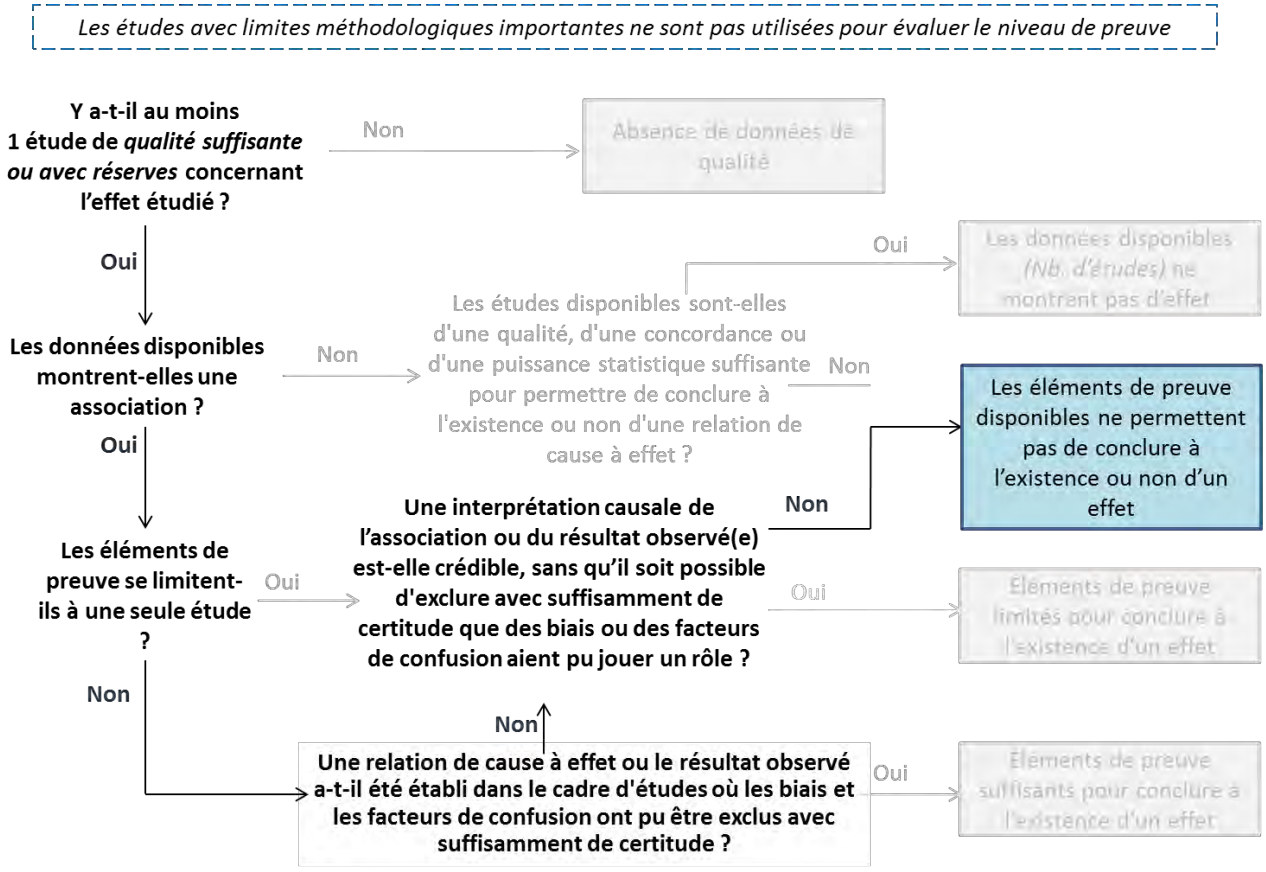


Figure 61 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets cancérogènes dans les études épidémiologiques.

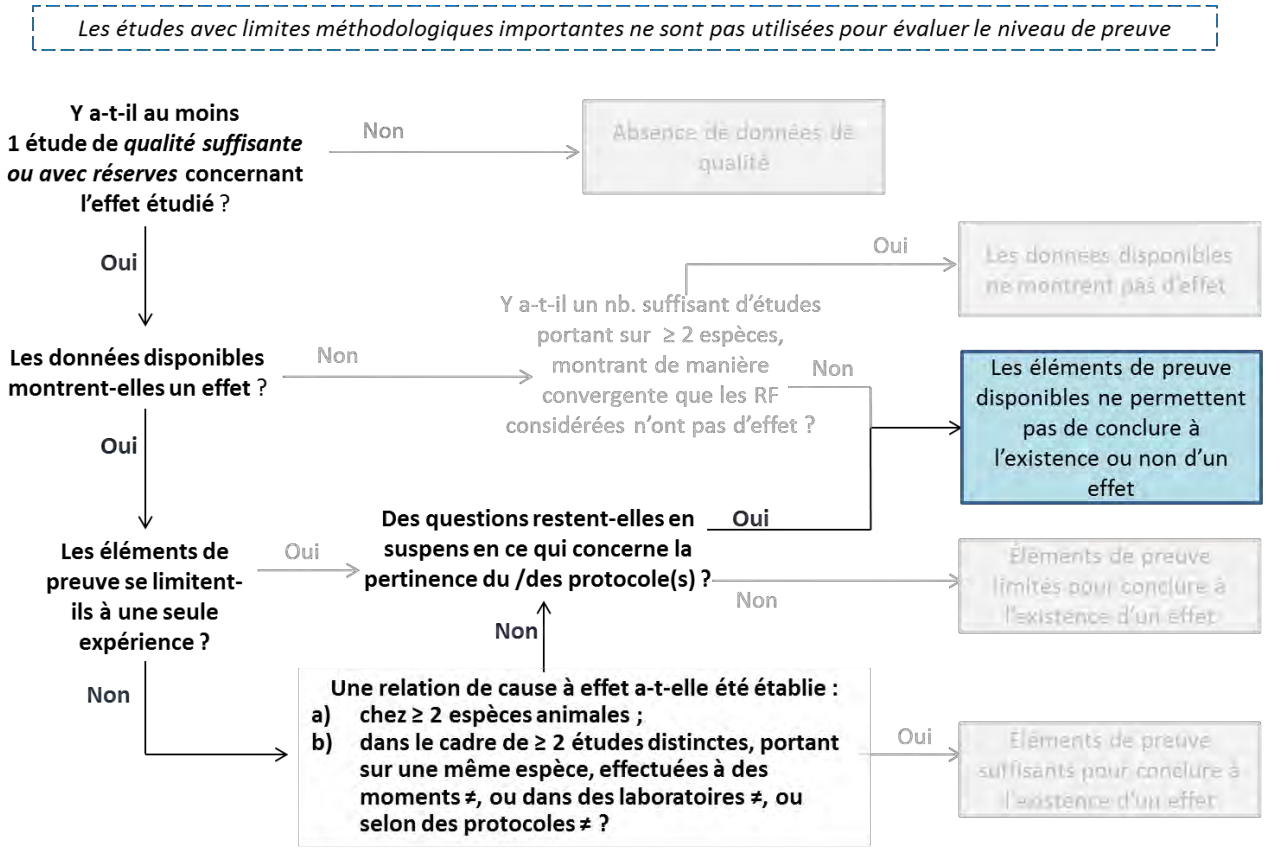


Figure 62 : évaluation des éléments de preuve relatifs aux effets cancérogènes dans les études sur les modèles animaux.

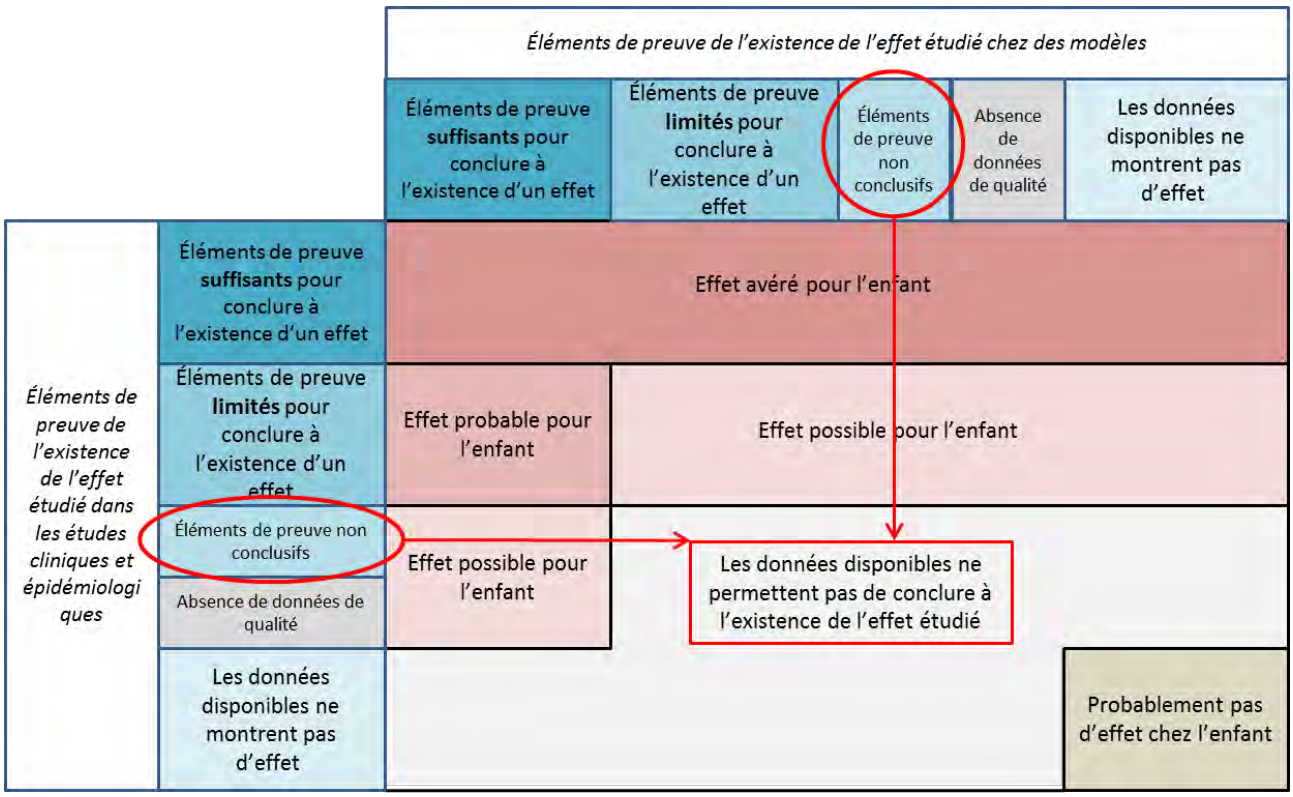


Figure 63 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur la cancérogénèse chez l'enfant.

5.9 Autres effets

Les études sur l'électrohypersensibilité chez les enfants sont analysées dans l'expertise collective de l'Anses menée sur ce sujet.

5.9.1 Système immunitaire

5.9.1.1 Exposition *in utero*

Sambucci *et al*. (2010) ont exposé des souris en gestation (16 souris par groupe) 2 h par jour, du 5ème au 19ème jour après l'accouplement, à un signal Wi-Fi de 2 462 MHz (DAS de 4 W/kg). Les DAS corps entier chez les mères exposées ont été évalués quotidiennement. Le DAS a été mesuré par la méthode du bilan de puissance. Une validation numérique a été effectuée sur des fantômes numériques. La taille et le poids des souris numériques ont été modélisés en fonction des variations journalières mesurées sur les souris. Les animaux exposés ont été comparés à des animaux témoins négatifs et témoins-cage. À 5 et 26 semaines après la naissance, différents paramètres du système immunitaire ont été analysés : 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. L'étude ne montre aucun effet des radiofréquences sur les sujets exposés comparativement aux sujets témoins ; en revanche, les auteurs mettent en évidence un effet du stress sur le système immunitaire, qualifié d'« effet cage », en enregistrant des différences significatives des concentrations en immunoglobulines entre les animaux du groupe témoin-cage (dits « zéro stress ») et les animaux témoins ou exposés.

L'année d'après, la même équipe a exploré les conséquences d'une exposition *in utero* à un signal Wi-Fi sur les lymphocytes T (Laudisi *et al*. 2012). Le protocole d'exposition est le même que celui décrit précédemment. Aucune différence n'a été constatée entre les animaux témoins et les animaux exposés quel que soit l'âge (5 ou 26 semaines), concernant la numération et la prolifération des cellules du thymus, et après stimulation, la prolifération des lymphocytes T et la production de cytokines.

5.9.1.2 Exposition pré- et post- natale

Sambucci *et al.* (2011) ont étudié les effets des radiofréquences sur le système immunitaire de souriceaux nouveau-nés exposés à un signal Wi-Fi (DAS = 0,08 ou 4 W/kg) pendant 5 semaines consécutives (2 h par jour, 5 jours par semaine). L'exposition a débuté le jour suivant la naissance. L'expérience a été réalisée en aveugle et le groupe exposé comparé à un groupe témoin. Aucune différence n'a été observée entre les 2 groupes, quels que soient le sexe des animaux et le DAS utilisé, en ce qui concerne le poids et le développement des nouveau-nés, la maturation des thymocytes, la numération des lymphocytes T dans le compartiment périphérique, ainsi que la prolifération des lymphocytes B et la concentration des anticorps dans le sérum. Seule la production d'IFN-γ dans les cellules de la rate est augmentée chez les mâles exposés au plus haut DAS. Ce résultat isolé mérite d'être vérifié.

Selon une méthode développée par leur propre équipe, Aït-Aïssa *et al*. (2012) ont dosé des marqueurs immunitaires reflétant d'une manière indirecte les altérations pathologiques et la capacité de la formation ultérieure de néoantigènes. Les rats ont été exposés *in utero* (GD 6 – GD 21) ou de façon pré- et post- natale (GD 6 – PND 35) à un signal Wi-Fi (2 450 MHz, DAS = 0,08, 0,4 ou 4 W/kg) 2 h par jour, 5 jours par semaine. L'exposition est bien contrôlée. Les marqueurs sériques d'antigènes, de stress oxydant et d'inflammation ont été dosés dans le sérum de rats 35 jours après la naissance. L'exposition n'a pas révélé d'effet sur la production de néoantigènes relatifs à des processus pathologiques. La méthodologie est rigoureuse : les animaux sont habitués au système d'exposition, un contrôle positif est présent, les expositions sont réalisées en aveugle.

Tableau 30 : 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 *(se référer au texte pour les commentaires)*
Sambucci *et al*. 2010	Signal à la fréquence de 2 462 MHz DAS de 4 W/kg 2 h/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 *et al.* 2012	Signal à la fréquence de 2 462 MHz DAS de 4 W/kg 2 h/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 *et al.* 2011	Signal à la fréquence de 2 450 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 *et al*. 2012	Signal à la fréquence de 2 450 MHz DAS = 0,08, 0,4 ou 4 W/kg 2 h/j, 5 j/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.

5.9.1.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur le système immunitaire

Chez l'enfant, les données sont **inexistantes** (*cf.* Figure 64).

Chez l'animal, le seul effet observé est l'augmentation de l'IFNγ mis en évidence dans l'étude de Sambucci *et al.*, 2011, qui ne peut pas être interprété comme un effet sanitaire. Ce résultat doit être vérifié par d'autres études.

Les 3 autres études ne montrent pas d'effet de l'exposition aux signaux Wi-Fi sur le système immunitaire, que l'exposition survienne avant ou après la naissance. Les études sont rigoureuses et bien menées (*cf.* Figure 65). Cependant, 3 des 4 études disponibles proviennent de la même équipe (Sambucci *et al.,* 2010 et 2011 et Laudisi *et al.,* 2012)

Par conséquent, chez l'animal, les éléments de preuve **disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet** sur le système immunitaire.

Les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient un niveau de preuve *insuffisant* pour conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur le système immunitaire.

En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des radiofréquences sur le système immunitaire** de l'enfant (*cf.* Figure 66).

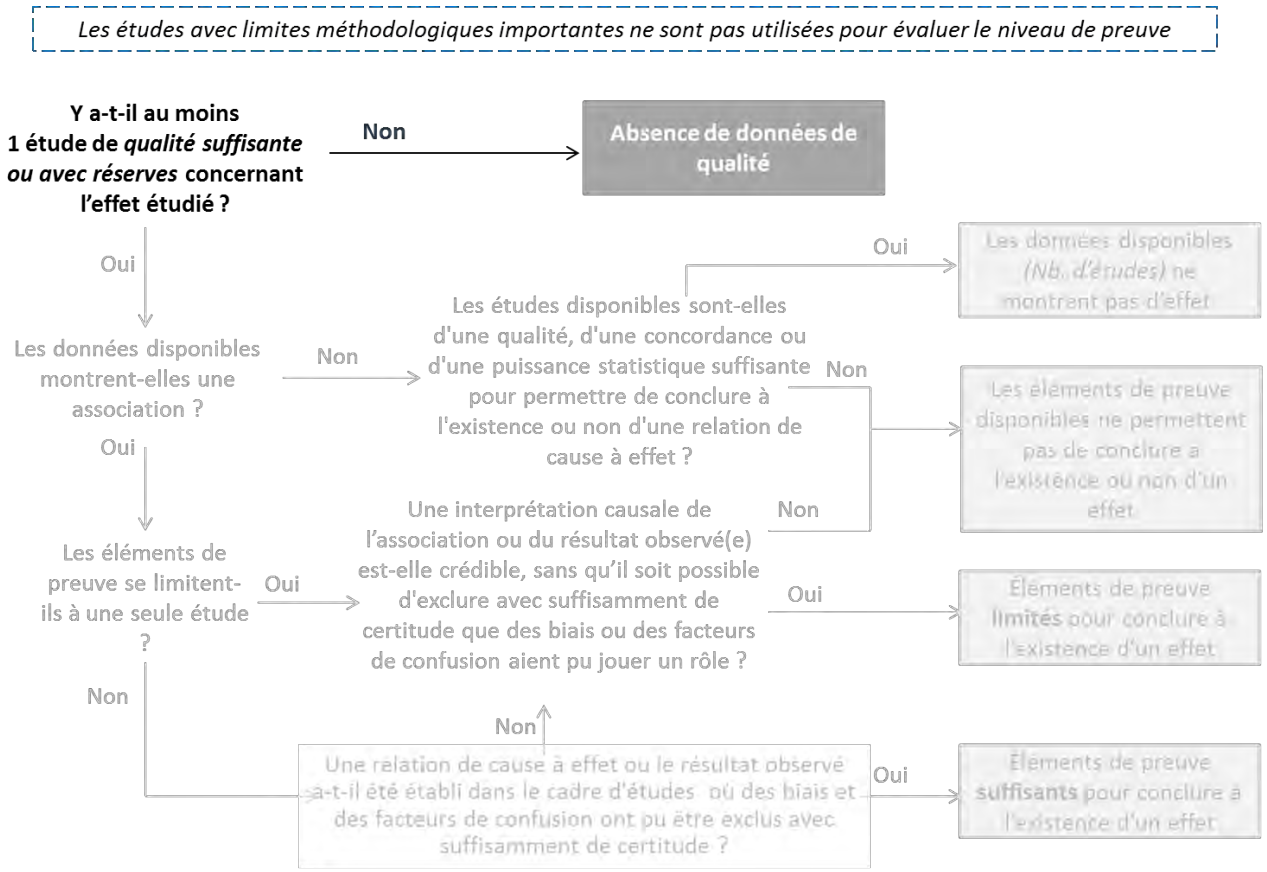


Figure 64 : évaluation des éléments de preuve relatifs au système immunitaire dans les études épidémiologiques.

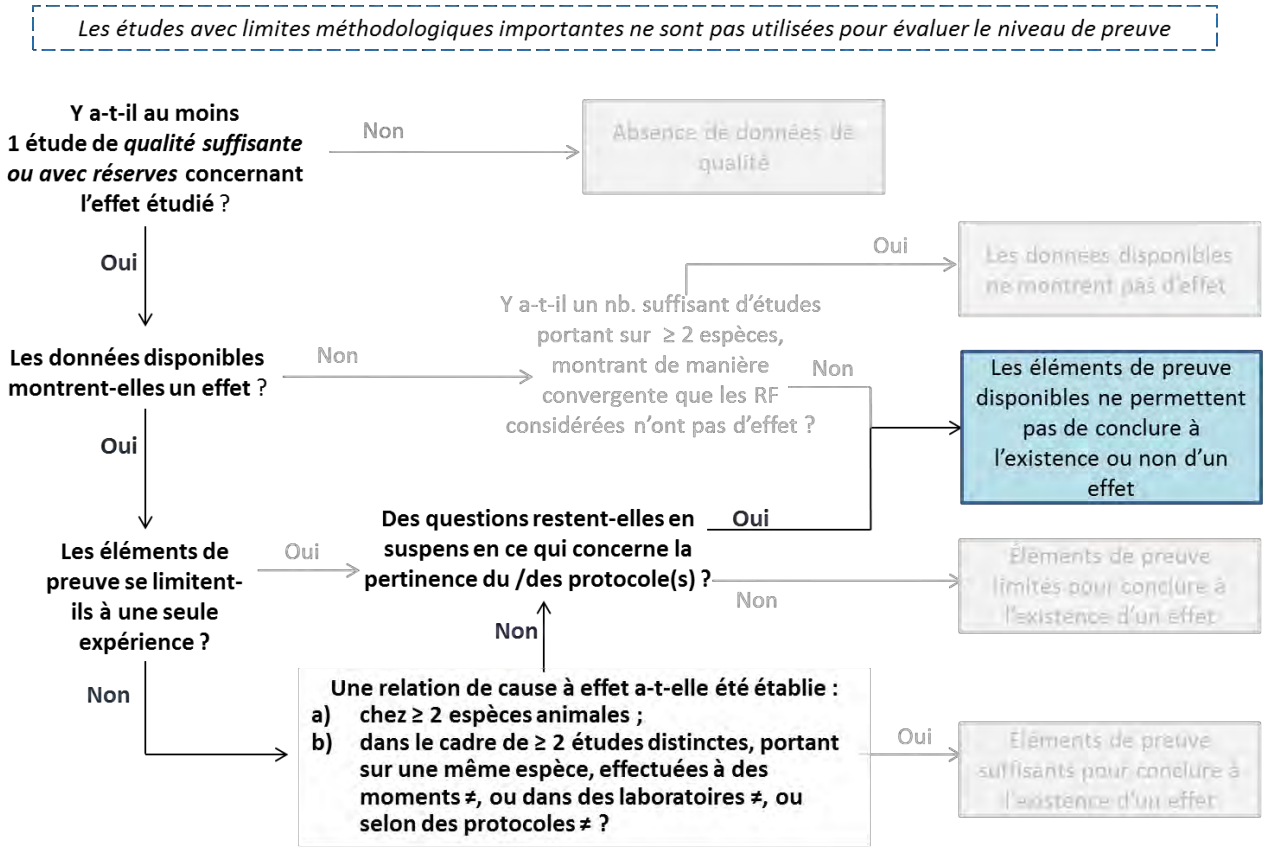


Figure 65 : évaluation des éléments de preuve relatifs au système immunitaire dans les études sur les modèles animaux.

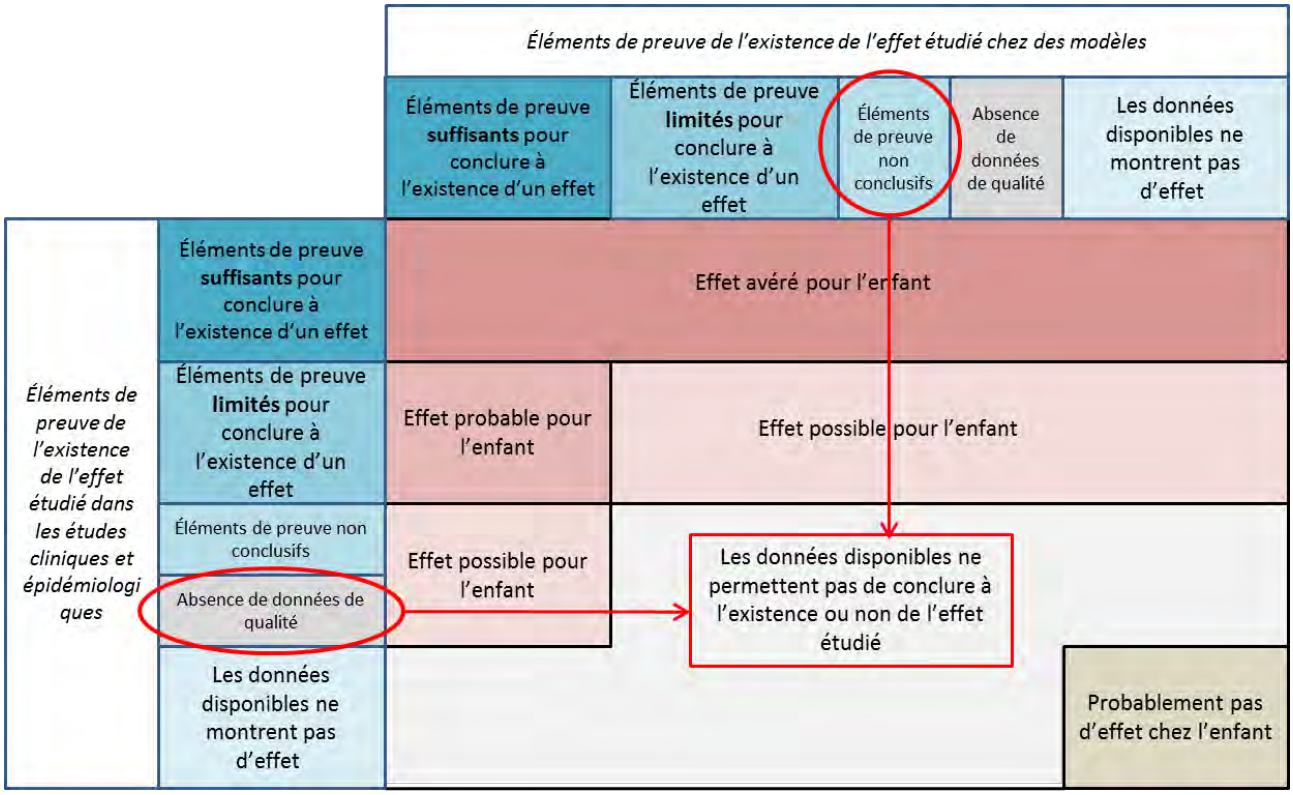


Figure 66 : évaluation globale de l'effet des radiofréquences sur le système immunitaire chez l'enfant.

5.9.2 Toxicité systémique

Jin *et al.* (2011) ont suivi des rats Sprague-Dawley (50 % de mâles et 50 % de femelles, n = 20 par groupe). Les animaux, âgés de 5 semaines, ont été exposés à des radiofréquences (signal de type CDMA à 849 MHz et W-CDMA à 1,95 GHz simultanément, DAS de 2,0 W/kg chacun, soit un total de 4 W/kg) pendant 45 min / j, 5 jours par semaine pendant 1 an. Le poids du corps et des organes a été mesuré à la fin de l'exposition. Des analyses urinaires, hématologiques, biochimiques, ainsi qu'un examen histopathologique de la majorité des organes ont été réalisés (cerveau, thymus, cœur, foie, rate, rein, ovaires, testicules, ganglions lymphatiques). Les résultats suggèrent qu'une co-exposition chronique aux radiofréquences CDMA et W-CDMA n'accroît pas les maladies chroniques chez le rat, bien que certains paramètres hématologiques et biochimiques soient modifiés, mais n'ont pas été considérées par les auteurs comme liés à l'exposition aux radiofréquences.

Furtado *et al., (*2014) ont évalué les effets d'une exposition aux radiofréquences (950 MHz) sur les marqueurs de stress oxydant dans le foie des animaux. Des rates en gestation ont été exposées 30 min par jour pendant toute la durée de leur gestation, puis les nouveau-nés ont été exposés pendant 0, 6, 15 ou 30 jours post-natal. Six animaux ont été inclus par condition d'exposition. Le DAS a été évalué à 1,3 – 1,0 W/kg. Les lésions des lipides, protéines et ADN ont été respectivement identifiées par TBARS (*thiobarbituric acid reactive substances*), par dosage des proteines carbonylées et par le test des comètes. Les acides gras insaturés et la catalase ont également été recherchés. Les nouveau-nés ont des niveaux plus bas de TBARS et des concentrations plus basses d'acides gras insaturés après exposition. Aucune différence n'a été notée entre les différents groupes pour les protéines carbonylées. Les dommages à l'ADN étaient plus importants chez les animaux exposés 30 jours post-natals. Les nouveau-nés exposés ont des niveaux réduits de catalase.

En raison de ses limites méthodologiques, les résultats de l'étude suivante n'ont pas pu être exploités : Özorak *et al.,*, 2013 ont exposé pendant 60 min / jour, 5 jours par semaine des rats *in utero* du premier jour de la gestation jusqu'à 6 semaines post natales à des champs électromagnétiques à 3 fréquences différentes : 2,45 GHz, 900 MHz, 1 800 MHz (DAS = 0,01–1,2 W/kg). Ils ont étudié les paramètres du stress oxydant (peroxydation lipidique, glutathion, glutathion peroxydase, statut antioxydant total) dans le rein et les testicules. Les taux de fer, de cuivre, de magnésium, de manganèse, de chromium, de sélénium, de zinc, de vitamine A, de vitamine E et de β-carotène ont également été déterminés dans le rein et les testicules. La méthode d'évaluation du DAS n'est pas décrite. Il semblerait qu'un groupe contrôle cage ait été inclus, sans qu'aucun résultat ne soit présenté pour ce groupe, alors même que l'animal est exposé en système contraignant, occasionnant un niveau de stress non négligeable. Les résultats ne fournissent pas un tableau cohérent qui pourrait être soumis à interprétation.

5.9.2.1 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des radiofréquences sur la toxicité systémique

Chez l'enfant, les données sont **inexistantes** (*cf.* Figure 67).

Chez l'animal**,** les études ne sont pas comparables car elles n'ont pas investigué les mêmes paramètres de toxicité. Par conséquent, **les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des radiofréquences sur la toxicité systémique** (*cf.* Figure 68).

En conclusion, **les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'une toxicité systémique des radiofréquences** chez l'enfant (*cf.* Figure 69).

Les conclusions du rapport « Radiofréquences et santé », publié le 15 octobre 2013, indiquaient un niveau de preuve *insuffisant* pour conclure à l'existence d'un effet des radiofréquences sur la santé globale.

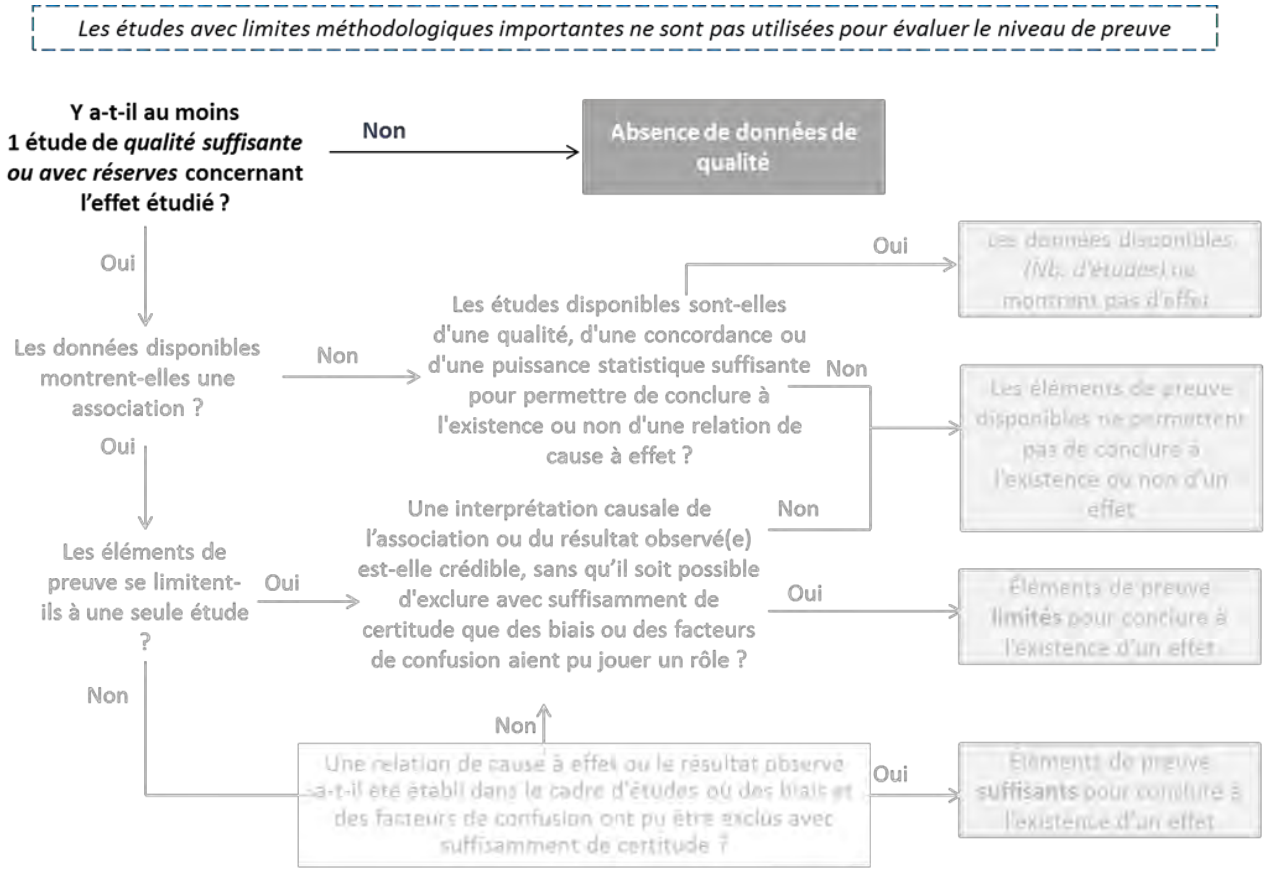


Figure 67 : évaluation des éléments de preuve relatifs à la toxicité systémique dans les études épidémiologiques.

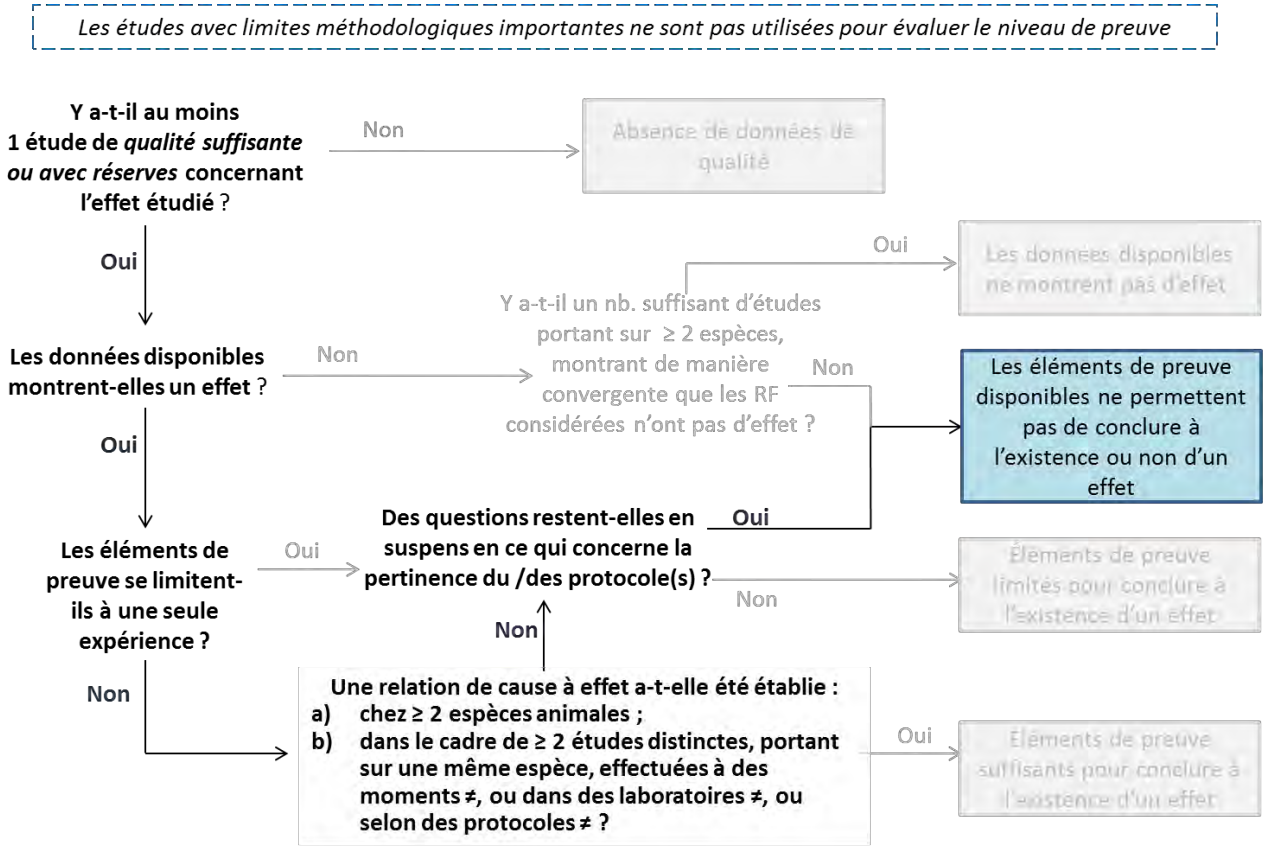


Figure 68 : évaluation des éléments de preuve relatifs à la toxicité systémique dans les études sur les

modèles animaux.

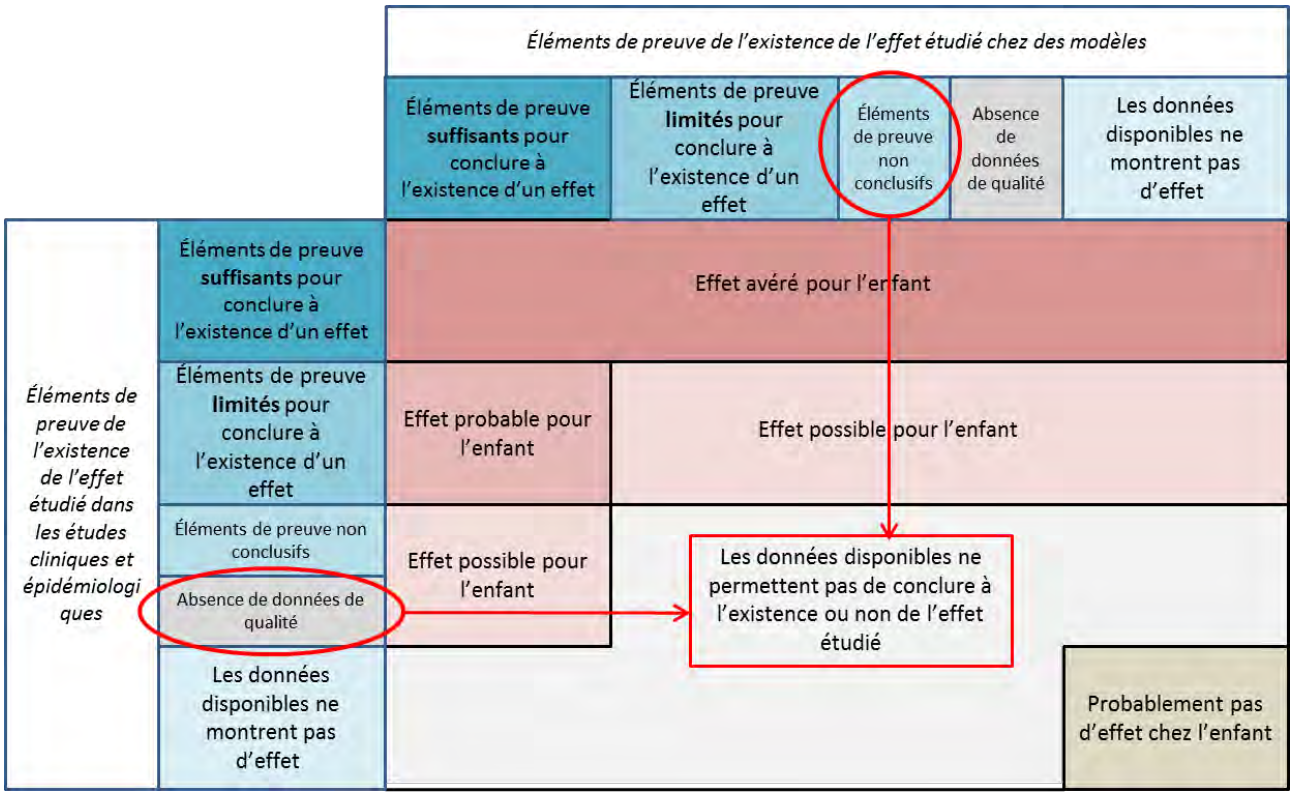


Figure 69 : évaluation globale de l'effet systémique des radiofréquences chez l'enfant.

Tableau 31 : 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)*
Jin *et al.,* 2011	CDMA (849 MHz) et W-CDMA (1 950 MHz) simultanément DAS = 2 W/kg 45 min/jour, 5 j/semaine, pendant 1 an	Rat De l'âge de 5 semaines pendant 1 an	Toxicité systémique chronique : mortalité, morbidité, analyse urinaire, et plasmatique, histopathologie (cerveau, cœur, poumons, rein, intestin, foie, organes reproducteurs, thymus)	20 animaux par groupe	Aucun effet secondaire, aucune influence sur l'apparition spontanée de tumeurs ou sur la toxicité chronique n'a été relevée.
Furtado *et al*., 2014	UHF 950 MHz DAS = 1,3 – 1,0 W/kg 30 min/jour pendant la gestation + 0, 6, 15 ou 30 jours après la naissance	Rat *In utero*	Stress oxydant	6 animaux par groupe	Diminution des niveaux de TBARS et d'acides gras insaturés chez les nouveau-nés exposés. Absence de différence entre les groupes d'exposition pour les protéines carbonylées. Diminution des dommages à l'ADN chez les rats exposés 15 jours post natal et augmentation chez les rats exposés 30 jours post natal. Diminution de l'expression de la catalase chez les nouveau-nés exposés

6 Conclusions

L'analyse des données de la littérature et la prise en compte du rapport d'expertise publié en 2013 permettent d'émettre les conclusions suivantes :

S'agissant de l'exposition des enfants et des adolescents, les données disponibles montrent une forte expansion des nouvelles technologies chez ces populations. De nombreux jouets connectés arrivent sur le marché. Les enfants possèdent leur propre téléphone mobile de plus en plus précocement, même si l'âge de la première utilisation se situe actuellement rarement avant 7 ans.

Des modélisations numériques de l'exposition de la tête montrent que, pour des raisons anatomiques ou liées aux propriétés diélectriques des tissus jeunes ou immatures, les enfants peuvent être plus exposés que les adultes, dans certaines bandes de fréquences, en particulier au niveau des aires cérébrales les plus proches de la boite crânienne.

Par ailleurs, des mesures récentes du DAS de certains modèles de téléphone mobile, positionné au contact du corps, ont montré que l'exposition résultante peut être particulièrement élevée.

D'autre part, les études ayant évalué le DAS pour le « corps entier » rapportent des niveaux d'exposition plus élevés chez les enfants que chez les adultes, en particulier dans 2 gammes de fréquence : vers 100 MHz et autour de 1 à 4 GHz. Elles montrent que le DAS peut dépasser les valeurs limites réglementaires (restrictions de base) de 40 % dans des conditions de type pire-cas, c'est-à-dire lorsque les personnes sont exposées à des champs électriques dans l'environnement égaux aux valeurs limites exprimées en niveaux de référence. Ceci signifie que pour des personnes de petite taille (inférieure à 1,30 m), les valeurs limites d'exposition réglementaires exprimées en niveaux de référence (exposition aux champs électromagnétiques dans l'environnement) ne seraient pas suffisamment protectrices pour éviter un dépassement des restrictions de base (DAS).

S'agissant des études sur les effets sanitaires des radiofréquences sur les enfants, les données actuelles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet sur :

- le comportement ;
- les fonctions auditives ;
- les effets tératogènes et le développement ;
- le système reproducteur mâle et femelle ;
- les effets cancérogènes ;
- le système immunitaire ;
- la toxicité systémique.

Les données actuelles permettent de conclure à un effet possible des radiofréquences chez l'enfant sur :

- les fonctions cognitives : les résultats montrant des effets aigus se basent sur des études expérimentales dont la méthodologie est bien maîtrisée ;
- le bien-être : ces effets pourraient cependant être liés à l'usage du téléphone mobile plutôt qu'aux radiofréquences qu'ils émettent.

7 Bibliographie

7.1 Publications

Abbott, N.J., Patabendige, A.A.K., Dolman, D.E.M., Yusof, S.R., and Begley, D.J. (2010). Structure and function of the blood-brain barrier. Neurobiol. Dis. 37, 13–25.

Abramson, M.J., Benke, G.P., Dimitriadis, C., Inyang, I.O., Sim, M.R., Wolfe, R.S. and Croft, R.J., (2009) Mobile telephone use is associated with changes in cognitive function in young adolescents. Bioelectromagnetics **30**, 678–686.

Ackerman, M.J., (1998) The Visible Human Project: a resource for anatomical visualization. Stud Health Technol Inform **52 Pt 2**, 1030–1032.

Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement (Afsse), (2003) Téléphonie mobile et santé

Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement (Afsse), (2005) Rapport à l'Afsse sur téléphonie mobile et santé.

Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset), (2009) Les radiofréquences : mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences.

Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset), (2009) Les systèmes d'identification pas radiofréquences (RFID). Evaluation des impacts sanitaires.

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), (2013) Radiofréquences et santé (No. 978-2-11-138450-7).

Aït-Aïssa, S., Billaudel, B., De Gannes, F.P., Hurtier, A., Haro, E., Taxile, M., Ruffie, G., Athane, A., Veyret, B. and Lagroye, I., (2010) In situ detection of gliosis and apoptosis in the brains of young rats exposed in utero to a Wi-Fi signal. Comptes Rendus Physique **11**, 592–601.

Aït-Aïssa, S., Billaudel, B., Poulletier de Gannes, F., Ruffié, G., Duleu, S., Hurtier, A., Haro, E., Taxile, M., Athané, A., Geffard, M., Wu, T., Wiart, J., Bodet, D., Veyret, B. and Lagroye, I., (2012) In utero and early-life exposure of rats to a Wi-Fi signal: screening of immune markers in sera and gestational outcome. Bioelectromagnetics **33**, 410–420.

Aït-Aïssa, S., de Gannes, F.P., Taxile, M., Billaudel, B., Hurtier, A., Haro, E., Ruffié, G., Athané, A., Veyret, B. and Lagroye, I., (2013) *In Situ* Expression of Heat-Shock Proteins and 3-Nitrotyrosine in Brains of Young Rats Exposed to a WiFi Signal *In Utero* and In Early Life. Radiation Research **179**, 707–716.

Albert E et Sherif M., (1988), Morphological changes in cerebellum of neonatal rats exposed to 2.45 GHz microwaves, Prog Clin Biol Res. **257**:135-51.

Aldad, T.S., Gan, G., Gao, X.-B. and Taylor, H.S., (2012) Fetal Radiofrequency Radiation Exposure From 800-1900 Mhz-Rated Cellular Telephones Affects Neurodevelopment and Behavior in Mice. Sci Rep **2**.

Aldenkamp AP, Weber B, Overweg-Plandsoen WC, Reijs R, van Mil S (2005) Edicational underachievement in children with epilepsy: a model to predict the effects of epilepsy on educational achievement. J Child Neurol 20: 175-180

Alling, C., (1985) Biochemical maturation of the brain and the concept of vulnerable periods, in: Alcohol and the Developing Brain. Raven Press New York, pp. 5–10.

Ammari, M., Gamez, C., Lecomte, A., Sakly, M., Abdelmelek, H. and De Seze, R., (2010) GFAP expression in the rat brain following sub-chronic exposure to a 900 MHz electromagnetic field signal. Int. J. Radiat. Biol. **86**, 367–375.

Anderson, V., (2003) Comparisons of peak SAR levels in concentric sphere head models of children and adults for irradiation by a dipole at 900 MHz. Phys Med Biol **48**, 3263–3275.

Atasoy, H.I., Gunal, M.Y., Atasoy, P., Elgun, S. and Bugdayci, G., (2013) Immunohistopathologic demonstration of deleterious effects on growing rat testes of radiofrequency waves emitted from conventional Wi-Fi devices. Journal of Pediatric Urology **9**, 223–229.

Aydin, D., Feychting, M., Schüz, J., Tynes, T., Andersen, T.V., Schmidt, L.S., Poulsen, A.H., Johansen, C., Prochazka, M., Lannering, B., Klæboe, L., Eggen, T., Jenni, D., Grotzer, M., Von der Weid, N., Kuehni, C.E. and Röösli, M., (2011) Mobile phone use and brain tumors in children and adolescents: a multicenter case-control study. J. Natl. Cancer Inst. **103**, 1264–1276.

Aydin, D., Feychting, M., Schüz, J., Röösli, M. (2012) Childhood brain tumours and use of mobile phones: comparison of a case–control study with incidence data. Environmental Health **11**, 35.

Bit-Babik, G., Guy, A.W., Chou, C.-K., Faraone, A., Kanda, M., Gessner, A., Wang, J. and Fujiwara, O., (2005) Simulation of Exposure and SAR Estimation for Adult and Child Heads Exposed to Radiofrequency Energy from Portable Communication Devices. Radiation Research **163**, 580–590.

Bakker, J.F., Paulides, M.M., Christ, A., Kuster, N. and van Rhoon, G.C., (2010) Assessment of induced SAR in children exposed to electromagnetic plane waves between 10 MHz and 5.6 GHz. Phys Med Biol **55**, 3115–3130.

Bakker, J.F., Paulides, M.M., Neufeld, E., Christ, A., Chen, X.L., Kuster, N. and van Rhoon, G.C., (2012) Children and adults exposed to low-frequency magnetic fields at the ICNIRP reference levels: theoretical assessment of the induced electric fields. Phys Med Biol **57**, 1815–1829.

Baldi, I., Gruber, A., Alioum, A., Berteaud, E., Lebailly, P., Huchet, A., Tourdias, T., Kantor, G., Maire, J.P., Vital, A., Loiseau, H., Champeaux, K., Dhauteribes, M., Eimer, S., Gimbert, E., Liguoro, D., Monteil, P., Penchet, G., San-Galli, F. and Vignes, J., (2011) Descriptive epidemiology of CNS tumors in France: results from the Gironde Registry for the period 2000-2007. Neuro Oncol **13**, 1370–1378.

Bas, O., Odaci, E., Mollaoglu, H., Ucok, K. and Kaplan, S., (2009) Chronic prenatal exposure to the 900 megahertz electromagnetic field induces pyramidal cell loss in the hippocampus of newborn rats. Toxicol Ind Health **25**, 377–384.

Beard, B.B., Kainz, W., Onishi, T., Iyama, T., Watanabe, S., Fujiwara, O., Wang, J., Bit-Babik, G., Faraone, A., Wiart, J., Christ, A., Kuster, N., Lee, A.-K., Kroeze, H., Siegbahn, M., Keshvari, J., Abrishamkar, H., Simon, W., Manteuffel, D. and Nikoloski, N., (2006) Comparisons of computed mobile phone induced SAR in the SAM phantom to that in anatomically correct models of the human head. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility **48**, 397–407.

Bennett, M.R., (2011) Schizophrenia: susceptibility genes, dendritic-spine pathology and gray matter loss. Progress in Neurobiology **95**, 275–300.

Berg AT, Shinnar S, Levy SR, Testa FM (1999) Newly diogniosed epilepsy in children : presentation at diagnosis. Epilepsia 40: 445-452.

Bianchi, A. and Phillips, J.G., (2005) Psychological predictors of problem mobile phone use. Cyberpsychol Behav **8**, 39–51.

Böhler, E. and Schüz, J., (2004) Cellular telephone use among primary school children in Germany. European journal of epidemiology **19**, 1043–1050.

Boice, J.D. and Tarone, R.E., (2011) Cell Phones, Cancer, and Children. JNCI J Natl Cancer Inst **103**, 1211–1213.

Bouji, M., Lecomte, A., Hode, Y., de Seze, R. and Villégier, A.-S., (2012a) Effects of 900 MHz radiofrequency on corticosterone, emotional memory and neuroinflammation in middle-aged rats. Experimental Gerontology **47**, 444–451.

Bouji, M., Lecomte, A., Hode, Y., de Seze, R. and Villégier, A.-S., (2012b) Effects of 900 MHz radiofrequency on corticosterone, emotional memory and neuroinflammation in middle-aged rats. Exp. Gerontol. **47**, 444–451.

Brillaud, E., Piotrowski, A. and de Seze, R., (2007) Effect of an acute 900MHz GSM exposure on glia in the rat brain: a time-dependent study. Toxicology **238**, 23–33.

Budak, G.G., Muluk, N.B., Budak, B., Oztürk, G.G., Apan, A. and Seyhan, N., (2009) Effects of GSM-like radiofrequency on distortion product otoacoustic emissions of rabbits: comparison of infants versus adults. Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol. **73**, 1143–1147.

Budak, G.G., Muluk, N.B., Budak, B., Öztürk, G.G., Apan, A. and Seyhan, N., (2009) Effects of intrauterine and extrauterine exposure to GSM-like radiofrequency on distortion product otoacoustic emissions in infant male rabbits. International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology **73**, 391–399.

Bulteau C, Jambaque I, Viguier D, Kieffer V, Dellatolas G, Dulac O (2000) Epilepstic syndromes, cognitive assessment and school placement: a study of 251 children. Dev Med Child Neurol 42: 319-327

Van den Bulck, J., (2007) Adolescent Use of Mobile Phones for Calling and for Sending Text Messages After Lights Out: Results from a Prospective Cohort Study with a One-Year Follow-Up. Sleep **30**, 1220–1223.

Byun, Y.-H., Ha, M., Kwon, H.-J., Hong, Y.-C., Leem, J.-H., Sakong, J., Kim, S.Y., Lee, C.G., Kang, D., Choi, H.-D. and Kim, N., (2013) Mobile Phone Use, Blood Lead Levels, and Attention Deficit Hyperactivity Symptoms in Children: A Longitudinal Study. PLoS ONE **8**, e59742.

Camfield P, Camfield C (2015) Incidence, prevalence and aetiology of seizures and epilepsy in children. Epileptic Disord 17: 117-123.

Camfield P, Camfield C, Gordon K, Smith B, Dooley J (1993) Outcome of childhood epilepsy: a population-based study with a simple predictive scoring system for those treated with medication. J Pediatr 122: 861-868.

Carrubba, S., Frilot, C., Chesson, A.L. and Marino, A.A., (2010) Mobile-phone pulse triggers evoked potentials. Neurosci. Lett. **469**, 164–168.

Casey BJ, Galvan A, Hare TA. (2005) Changes in cerebral functional organizationduring cognitive development. Curr Opin Neurobiol. Apr;15(2):239-44. Review.

Casey, B.J., Jones, R.M. and Hare, T.A., (2008) The Adolescent Brain. Ann N Y Acad Sci **1124**, 111–126.

Christ, A., Gosselin, M.-C., Christopoulou, M., Kühn, S. and Kuster, N., (2010) Age-dependent tissue-specific exposure of cell phone users. Phys Med Biol **55**, 1767–1783.

Christ, A., Gosselin, M.-C., Kühn, S. and Kuster, N., (2010) Impact of pinna compression on the RF absorption in the heads of adult and juvenile cell phone users. Bioelectromagnetics **31**, 406–412.

Christ, A., Kainz, W., Hahn, E.G., Honegger, K., Zefferer, M., Neufeld, E., Rascher, W., Janka, R., Bautz, W., Chen, J., Kiefer, B., Schmitt, P., Hollenbach, H.-P., Shen, J., Oberle, M., Szczerba, D., Kam, A., Guag, J.W. and Kuster, N., (2010) The Virtual Family--development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations. Phys Med Biol **55**, N23–38.

Christ, A. and Kuster, N., (2005) Differences in RF energy absorption in the heads of adults and children. Bioelectromagnetics **26**, S31–S44.

Christ, A., Samaras, T., Neufeld, E., Klingenböck, A. and Kuster, N., (2007) SAR distribution in human beings when using body-worn RF transmitters. Radiat Prot Dosimetry **124**, 6–14.

Christensen J, Vestergaard M, Pedersen MG, Pedersen CB, Olsen J, Sidenius P (25007) Incidence and prevalence of epilepsy in Denmark. Epilepsy Res 76: 60-65.

Chugani, H.T. and Phelps, M.E., (1986) Maturational changes in cerebral function in infants determined by 18FDG positron emission tomography. Science **231**, 840–843.

Chugani, H.T., Phelps, M.E. and Mazziotta, J.C., (1987) Positron emission tomography study of human brain functional development. Ann. Neurol. **22**, 487–497.

Chugani, Harry T., and Michael E. Phelps. 1991. "Imaging Human Brain Development with Positron Emission Tomography." Journal of Nuclear Medicine 32 (1): 23–26. http://jnm.snmjournals.org/content/32/1/23.

CIRC (Centre international de recherche contre le cancer) (2013). "Non-ionizing radiation, Part II: Radiofrequency electromagnetic fields / IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans." IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to human **102**.

Cobb, B.L., Jauchem, J.R., Mason, P.A., Dooley, M.P., Miller, S.A., Ziriax, J.M. and Murphy, M.R., (2000) Neural and behavioral teratological evaluation of rats exposed to ultra-wideband electromagnetic fields. Bioelectromagnetics **21**, 524–537.

Cole, K.S. and Cole, R.H., (1941) Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics. The Journal of Chemical Physics **9**, 341–351.

Conil, E., Hadjem, A., Lacroux, F., Wong, M.F. and Wiart, J., (2008) Variability analysis of SAR from 20 MHz to 2.4 GHz for different adult and child models using finite-difference time-domain. Phys Med Biol **53**, 1511–1525.

Cormack F, Cross JH, Isaacs E, Harkness W, Wright I, Vargha-Khadem F, Baldeweg T (2007) The development of intellectual abilities in pediatric temporal lobe epilepsy. Epilepsia 48: 201-204.

Cowan LD (2002) The epidemiology of the epilepsies in children. Ment Retard Dev Disabil Res Rev 8: 171-181.

CREDOC, (Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conidtions de vie), (2013) La diffusion des technologies de l'information et de la communication dans la société française (2013). CREDOC.

Croft, R.J., Leung, S., McKenzie, R.J., Loughran, S.P., Iskra, S., Hamblin, D.L. and Cooper, N.R., (2010) Effects of 2G and 3G mobile phones on human alpha rhythms: Resting EEG in adolescents, young adults, and the elderly. Bioelectromagnetics **31**, 434–444.

Daneman R, Zhou L, Agalliu D, Cahoy JD, Kaushal A, Bres BA (2010) The mouse blood-brain barrier transcriptome: a new resource for understanding the development and function of endothelial cells. Plos One 5, e13741. Doi:10.1371/journal.pone.0013741

Daniels, W.M.U., Pitout, I.L., Afullo, T.J.O. and Mabandla, M.V., (2009) The effect of electromagnetic radiation in the mobile phone range on the behaviour of the rat. Metab Brain Dis **24**, 629–641.

Darki, F. and Klingberg, T., (2014) The Role of Fronto-Parietal and Fronto-Striatal Networks in the Development of Working Memory: A Longitudinal Study. Cereb. Cortex.

Davie, R., Panting, C. and Charlton, T., (2004) Mobile phone ownership and usage among pre-adolescents. Telematics and Informatics **21**, 359–373.

Demers, Paul (président), Richard Findlay, Kenneth R. Foster, Bryan Kolb, John Moulder, Anne-Marie Nicol, Frank Prato, Rianne Stam. (2014). *Rapport du groupe d'experts sur l'examen du Code de sécurité 6 (2013) : Limites de sécurité de l'exposition aux champs de radiofréquences fixées par Santé Canada.* Société royale du Canada, Ottawa (Ontario). ISBN : 978-1-928140-00-9

Dhungel, A., Zmirou-Navier, D. and Deventer, E. van, (2014) Risk Management Policies and Practices Regarding Radio Frequency Electromagnetic Fields: Results from a Who Survey. Radiat Prot Dosimetry ncu324.

Dimbylow, P., (2005) Resonance behaviour of whole-body averaged specific energy absorption rate (SAR) in the female voxel model, NAOMI. Phys Med Biol **50**, 4053–4063.

Dimbylow, P., (2006) Development of pregnant female, hybrid voxel-mathematical models and their application to the dosimetry of applied magnetic and electric fields at 50 Hz. Phys Med Biol **51**, 2383–2394.

Dimbylow, P., (2007) SAR in the mother and foetus for RF plane wave irradiation. Phys Med Biol **52**, 3791–3802.

Dimbylow, P. and Bolch, W., (2007) Whole-body-averaged SAR from 50 MHz to 4 GHz in the University of Florida child voxel phantoms. Phys Med Biol **52**, 6639–6649.

Dimbylow, P., Bolch, W. and Lee, C., (2010) SAR calculations from 20 MHz to 6 GHz in the University of Florida newborn voxel phantom and their implications for dosimetry. Phys Med Biol **55**, 1519–1530.

Dimbylow, P.J., (1997) FDTD calculations of the whole-body averaged SAR in an anatomically realistic voxel model of the human body from 1 MHz to 1 GHz. Phys Med Biol **42**, 479–490.

Dimbylow, P.J., Nagaoka, T. and Xu, X.G., (2009) A comparison of foetal SAR in three sets of pregnant female models. Phys Med Biol **54**, 2755–2767.

Divan, H.A., Kheifets, L., Obel, C. and Olsen, J., (2008) Prenatal and postnatal exposure to cell phone use and behavioral problems in children. Epidemiology **19**, 523–529.

Divan, H.A., Kheifets, L., Obel, C. and Olsen, J., (2010) Cell phone use and behavioural problems in young children. J Epidemiol Community Health **66**, 524–529.

Divan, H.A., Kheifets, L. and Olsen, J., (2011) Prenatal cell phone use and developmental milestone delays among infants. Scand J Work Environ Health **37**, 341–348.

Dobbing, J., (1971) Undernutrition and the developing brain: the use of animal models ot elucidate the human problem. Psychiatr Neurol Neurochir **74**, 433–442.

Dolk H., Elliott P., Shaddick G. et al. (1997a). Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain. II. All high power transmitters. Am J Epidemiol.; 145(1):10-7.

Dolk H., Shaddick G., Walls P. et al. (1997b). Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain. I. Sutton Coldfield transmitter. Am J Epidemiol.; 145(1):1-9.

Elliott, P., Toledano, M.B., Bennett, J., Beale, L., de Hoogh, K., Best, N. and Briggs, D.J., (2010) Mobile phone base stations and early childhood cancers: case-control study. BMJ **340**, c3077–c3077.

Engelhardt B, Lieber S (2014) novel insights into the development and maintenance of the bood brain barrier. Cel Tissue Res 355: 687-699.

Eriksson KJ, Koivikko MJ (1997) Prevalence, classification, and severity of epilepsy and epileptic syndromes in children. Epilepsia 38: 1275-1282.

Eurobaromètre, (2008) Towards a safer use of the Internet for children in the EU – a parents' perspective.

Ferreri F., Curcio G., Pasqualetti P. et al. (2006). Mobile phone emissions and human brain excitability. Ann Neurol. 60(2):188-96.

Fernandez, C.R., Bulla, G., Pedra, A.C. and De Salles, A.A.A., (2005) Comparison of electromagnetic absorption characteristics in the head of adult and a children for 1800 MHz mobile phones. Presented at the 2005 SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics, pp. 523–528.

Findlay, R.P. and Dimbylow, P.J., (2010) SAR in a child voxel phantom from exposure to wireless computer networks (Wi-Fi). Phys Med Biol **55**, N405–411.

Findlay, R.P., Lee, A.-K. and Dimbylow, P.J., (2009) FDTD calculations of SAR for child voxel models in different postures between 10 MHz and 3 GHz. Radiat Prot Dosimetry **135**, 226–231.

Finlay, B.L. and Darlington, R.B., (1995) Linked regularities in the development and evolution of mammalian brains. Science **268**, 1578–1584.

Finnie, J.W., Blumbergs, P.C., Cai, Z., Manavis, J. and Kuchel, T.R., (2006a) Neonatal mouse brain exposure to mobile telephony and effect on blood-brain barrier permeability. Pathology **38**, 262–263.

Finnie, J.W., Blumbergs, P.C., Cai, Z., Manavis, J. and Kuchel, T.R., (2006b) Effect of mobile telephony on blood-brain barrier permeability in the fetal mouse brain. Pathology **38**, 63–65.

Finnie, J.W., Blumbergs, P.C., Manavis, J., Utteridge, T.D., Gebski, V., Davies, R.A., Vernon-Roberts, B. and Kuchel, T.R., (2002) Effect of long-term mobile communication microwave exposure on vascular permeability in mouse brain. Pathology **34**, 344–347.

Finnie, J.W., Chidlow, G., Blumbergs, P.C., Manavis, J. and Cai, Z., (2009) Heat shock protein induction in fetal mouse brain as a measure of stress after whole of gestation exposure to mobile telephony radiofrequency fields. Pathology **41**, 276–279.

Forsgren L, Beghi E, Oun A, Sillanpää M (2005) The epidemiology of epilepsy in Europe – a systematic review. Eur J Neurol 12: 245-253.

Fragopoulou, A.F., Koussoulakos, S.L. and Margaritis, L.H., (2010) Cranial and postcranial skeletal variations induced in mouse embryos by mobile phone radiation. Pathophysiology **17**, 169–177.

Freitag CM, May TW, Pfäfflin M, König S, Rating D (2001) Incidence of epilepsies and epilepstic syndromes in children and adolescents: a population-based prospective study in Germany. Epilepsia 42: 979-985.

Furtado-Filho OV, Borba JB, Dallegrave A, Pizzolato TM, Henriques JA, Moreira JC, Saffi J. (2014) Effect of 950 MHz UHF electromagnetic radiation on biomarkers of oxidative damage, metabolism of UFA and antioxidants in the livers of young rats of different ages Int J Radiat Biol. 2014 Feb;90(2):159-68.

Gabriel, C., (1996) Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies. King's College, London, Department of Physics.

Gabriel, C., (2005) Dielectric properties of biological tissue: variation with age. Bioelectromagnetics **Suppl 7**, S12–18.

Gandhi, O.P. and Kang, G., (2001) Calculation of induced current densities for humans by magnetic fields from electronic article surveillance devices. Phys Med Biol **46**, 2759–2771.

Gandhi, O.P., Lazzi, G. and Furse, C.M., (1996) Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **44**, 1884–1897.

Giedd, J.N., Blumenthal, J., Jeffries, N.O., Rajapakse, J.C., Vaituzis, A.C., Liu, H., Berry, Y.C., Tobin, M., Nelson, J. and Castellanos, F.X., (1999) Development of the human corpus callosum during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. Prog. Neuropsychopharmacol. Biol. Psychiatry **23**, 571–588.

Giedd, J.N. and Rapoport, J.L., (2010) Structural MRI of pediatric brain development: what have we learned and where are we going? Neuron **67**, 728–734.

Gogtay, N., Giedd, J.N., Lusk, L., Hayashi, K.M., Greenstein, D., Vaituzis, A.C., Nugent, T.F., Herman, D.H., Clasen, L.S., Toga, A.W., Rapoport, J.L. and Thompson, P.M., (2004) Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. Proc Natl Acad Sci U S A **101**, 8174–8179.

Gogtay, N. and Thompson, P.M., (2010) Mapping Gray Matter Development: Implications for typical development and vulnerability to psychopathology. Brain Cogn **72**, 6.

Goyal, M.S., Hawrylycz, M., Miller, J.A., Snyder, A.Z. and Raichle, M.E., (2014) Aerobic Glycolysis in the Human Brain Is Associated with Development and Neotenous Gene Expression. Cell Metabolism **19**, 49–57.

Gul, A., Celebi, H. and Uğraş, S., (2009) The effects of microwave emitted by cellular phones on ovarian follicles in rats. Arch. Gynecol. Obstet. **280**, 729–733.

Güler, G., Tomruk, A., Ozgur, E. and Seyhan, N., (2010) The effect of radiofrequency radiation on DNA and lipid damage in non-pregnant and pregnant rabbits and their newborns. Gen. Physiol. Biophys. **29**, 59–66.

Guxens, M., Eijsden, M. van, Vermeulen, R., Loomans, E., Vrijkotte, T.G.M., Komhout, H., Strien, R.T. van and Huss, A., (2013) Maternal cell phone and cordless phone use during pregnancy and behaviour problems in 5-year-old children. J Epidemiol Community Health **67**, 432–438.

Guxens, M., Vermeulen, R. and Huss, A., (2013) Reply to "on the association of cell phone exposure with childhood behaviour" by Sudan et al. J Epidemiol Community Health **67**, 980–980.

Ha, M., Im, H., Lee, M., Kim, H.J., Kim, B.-C., Gimm, Y.-M. and Pack, J.-K., (2007) Radio-frequency radiation exposure from AM radio transmitters and childhood leukemia and brain cancer. Am. J. Epidemiol. **166**, 270–279.

Haarala, C., Bergman, M., Laine, M., Revonsuo, A., Koivisto, M. and Hämäläinen, H., (2005) Electromagnetic field emitted by 902 MHz mobile phones shows no effects on children's cognitive function. Bioelectromagnetics **Suppl 7**, S144–150.

Hadjem, A., Lautru, D., Dale, C., Wong, M.-F., Hanna, V.F. and Wiart, J., (2005) Study of specific absorption rate (SAR) induced in two child head models and in adult heads using mobile phones. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **53**, 4–11.

Haghani M, Shabani M, Moazzami K. (2013) Maternal mobile phone exposure adversely affects the electrophysiological properties of Purkinje neurons in rat offspring. Neuroscience. 2013 Oct **10;**250:588-98.

Hancı H, Odacı E, Kaya H, Aliyazıcıoğlu Y, Turan İ, Demir S, Çolakoğlu S. The effect of prenatal exposure to 900-MHz electromagnetic field on the 21-old-day rat testicle. Reprod Toxicol. 2013 Dec;42:203-9. doi:10.1016/j.reprotox.2013.09.006.

Hand, J.W., Li, Y., Thomas, E.L., Rutherford, M.A. and Hajnal, J.V., (2006) Prediction of specific absorption rate in mother and fetus associated with MRI examinations during pregnancy. Magn Reson Med **55**, 883–893.

Hao, D., Yang, L., Chen, S., Tong, J., Tian, Y., Su, B., Wu, S. and Zeng, Y., (2013) Effects of long-term electromagnetic field exposure on spatial learning and memory in rats. Neurol. Sci. **34**, 157–164.

Hauri, D.D., Spycher, B., Huss, A., Zimmermann, F., Grotzer, M., Weid, N. von der, Spoerri, A., Kuehni, C.E. and Röösli, M., (2014) Exposure to Radio-Frequency Electromagnetic Fields From Broadcast Transmitters and Risk of Childhood Cancer: A Census-based Cohort Study. Am. J. Epidemiol. kwt442.

Health Council of the Netherlands, (2011) Influence of radiofrequency telecommunication signals on children's brains. Health Council of the Netherlands, The Hague.

Health Protection Agency (HPA), (2012) Health effects from radiofrequency electromagnetic fields.

Heinrich, S., Thomas, S., Heumann, C., von Kries, R. and Radon, K., (2010) Association between exposure to radiofrequency electromagnetic fields assessed by dosimetry and acute symptoms in children and adolescents: a population based cross-sectional study. Environ Health **9**, 75.

Heinrich, S., S. Thomas, et al. (2011). "The impact of exposure to radio frequency electromagnetic fields on chronic well-being in young people - A cross-sectional study based on personal dosimetry." Environment International **37**(1): 26-30.

Heynick, L.N. and Merritt, J.H., (2003) Radiofrequency fields and teratogenesis. Bioelectromagnetics **Suppl 6**, S174–186.

Hirata, A., Asano, T. and Fujiwara, O., (2007) FDTD analysis of human body-core temperature elevation due to RF far-field energy prescribed in the ICNIRP guidelines. Phys Med Biol **52**, 5013–5023.

Hirata, A., Ito, N. and Fujiwara, O., (2009) Influence of electromagnetic polarization on the whole-body averaged SAR in children for plane-wave exposures. Phys Med Biol **54**, N59–65.

Hocking B, Gordon IR, Grain HL, Hatfield GE. Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers. Med J Aust. 1996 Dec 2-16;165(11-12):601-5. Erratumin: Med J Aust 1997 Jan **20**;166(2):80.

Huttenlocher, P.R., (1979) Synaptic density in human frontal cortex - developmental changes and effects of aging. Brain Res. **163**, 195–205.

Huttenlocher, P.R. and Dabholkar, A.S., (1997) Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. J. Comp. Neurol. **387**, 167–178.

Ibrani, M., Ahma, L., Hamiti, E. and Haxhibeqiri, J., (2011) Derivation of Electromagnetic Properties of Child Biological Tissues at Radio Frequencies. Progress In Electromagnetics Research Letters **25**, 87–100.

Icnirp (2009). "Icnirp Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields." Health Physics **96(4)**: 504-514

İkinci A. et al. (2013) The Effects of Prenatal Exposure to a 900 Megahertz Electromagnetic Field on Hippocampus Morphology and Learning Behavior in Rat Pups, NeuroQuantology, **11**(4), 582-90.

Imai, N., Kawabe, M., Hikage, T., Nojima, T., Takahashi, S. and Shirai, T., (2011) Effects on rat testis of 1.95-GHz W-CDMA for IMT-2000 cellular phones. Syst Biol Reprod Med **57**, 204–209.

Imge, E.B., Kiliçoğlu, B., Devrim, E., Cetin, R. and Durak, I., (2010) Effects of mobile phone use on brain tissue from the rat and a possible protective role of vitamin C - a preliminary study. Int. J. Radiat. Biol. **86**, 1044–1049.

Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), (2011) Reproduction et environnement. Les éditions Inserm.

Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS), (2001) Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques. Champs alternatifs (de fréquence variable dans le temps, jusqu'à 300 GHz), in: Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité Du Travail.

International Telecommunication Union, and International Telecommunication Union. Radio Regulations. Geneva: ITU, 2012.

Inomata-Terada S., Okabe S., Arai N. et al. (2007). Effects of high frequency electromagnetic field (EMF) emitted by mobile phones on the human motor cortex. Bioelectromagnetics; 28(7):553-61.

Inyang, I., Benke, G., McKenzie, R., Wolfe, R. and Abramson, M.J., (2010) A new method to determine laterality of mobile telephone use in adolescents. Occup Environ Med **67**, 507–512.

Inyang, I., Benke, G., Morrissey, J., McKenzie, R. and Abramson, M., (2009) How well do adolescents recall use of mobile telephones? Results of a validation study. BMC Med Res Methodol **9**, 36.

Jalava M, Sillanpää M, Camfield C, Camfield P (1997) Social adjustment and competence 35 years after onset of childhood epilepsy: a prospective controlled study. Epilepsia 38: 708-715.

Jin, Y.-B., Lee, H.-J., Seon Lee, J., Pack, J.-K., Kim, N. and Lee, Y.-S., (2011) One-year, simultaneous combined exposure of CDMA and WCDMA radiofrequency electromagnetic fields to rats. Int. J. Radiat. Biol. **87**, 416–423.

Jing J, Yuhua Z, Xiao-qian Y, Rongping J, Dong-mei G, Xi C.(2012) The influence of microwave radiation from cellular phone on fetal rat brain. Electromagn Biol Med. 2012 Mar;31(1):57-66.

Juutilainen, J., (2005) Developmental effects of electromagnetic fields. Bioelectromagnetics **Suppl 7**, S107–115.

Kainz, W., Chan, D.D., Casamento, J.P. and Bassen, H.I., (2003) Calculation of induced current densities and specific absorption rates (SAR) for pregnant women exposed to hand-held metal detectors. Phys Med Biol **48**, 2551–2560.

Kesari, K.K., Behari, J. and Kumar, S., (2010) Mutagenic response of 2.45 GHz radiation exposure on rat brain. Int. J. Radiat. Biol. **86**, 334–343.

Kesari, K.K., Kumar, S. and Behari, J., (2011) 900-MHz microwave radiation promotes oxidation in rat brain. Electromagn Biol Med **30**, 219–234.

Kesari, K.K., Kumar, S. and Behari, J., (2012) Pathophysiology of microwave radiation: effect on rat brain. Appl. Biochem. Biotechnol. **166**, 379–388.

Keshvari, J. and Lang, S., (2005) Comparison of radio frequency energy absorption in ear and eye region of children and adults at 900, 1800 and 2450 MHz. Phys Med Biol **50**, 4355–4369.

Khalid, M., Mee, T., Peyman, A., Addison, D., Calderon, C., Maslanyj, M., & Mann, S. (2011). Exposure to radio frequency electromagnetic fields from wireless computer networks: Duty factors of Wi-Fi devices operating in schools. Progress in Biophysics and Molecular Biology, **107**(3), 412–420.

Kim, C.H., Choi, S.H., Jeong, J.H., Lee, C. and Chung, M.S., (2008) HDRK-Man: a whole-body voxel model based on high-resolution color slice images of a Korean adult male cadaver. Physics in Medicine and Biology **53**, 4093–4106.

Köktürk S1, Yardimoglu M, Celikozlu SD, Dolanbay EG, Cimbiz A. (2013) Effect of Lycopersicon esculentum extract on apoptosis in the rat cerebellum, following prenatal and postnatal exposure to an electromagnetic field. Exp Ther Med. 2013 Jul;6(1):52-56. Epub 2013 May 17.

Knickmeyer, R.C., Gouttard, S., Kang, C., Evans, D., Wilber, K., Smith, J.K., Hamer, R.M., Lin, W., Gerig, G. and Gilmore, J.H., (2008) A Structural MRI Study of Human Brain Development from Birth to 2 Years. J Neurosci **28**, 12176–12182.

Kolodynski AA, Kolodynska VV. Motor and psychological functions of school children living in the area of the Skrunda Radio Location Station in Latvia. Sci Total Environ. 1996 Feb 2;180(1):87-93

Kramer, A., Kuhn, S., Lott, U. and Kuster, N., (2005) Development of Procedures for the Assessment of Human Exposure to EMF from Wireless Devices in Home and Office Environments (No. 03.001524). It'is Foundation.

Kramarenko AV, Tan U. Effects of high-frequency electromagnetic fields on human EEG: a brain mapping study. Int J Neurosci. 2003 Jul;113(7):1007-19.

Krause, C.M., Björnberg, C.H., Pesonen, M., Hulten, A., Liesivuori, T., Koivisto, M., Revonsuo, A., Laine, M. and Hämäläinen, H., (2006) Mobile phone effects on children's event-related oscillatory EEG during an auditory memory task. International Journal of Radiation Biology **82**, 443–450.

Küçer N, Pamukçu T. (2014) Self-reported symptoms associated with exposure to electromagnetic fields: a questionnaire study. Electromagn Biol Med. Jan;33(1):15-7

Kühn, S., Cabot, E., Christ, A., Capstick, M. and Kuster, N., (2009) Assessment of the radio-frequency electromagnetic fields induced in the human body from mobile phones used with hands-free kits. Phys Med Biol **54**, 5493–5508.

Kühnlein, A., Heumann, C., Thomas, S., Heinrich, S. and Radon, K., (2009) Personal exposure to mobile communication networks and well-being in children—A statistical analysis based on a functional approach. Bioelectromagnetics **30**, 261–269.

Kumlin, T., Iivonen, H., Miettinen, P., Juvonen, A., van Groen, T., Puranen, L., Pitkäaho, R., Juutilainen, J. and Tanila, H., (2007) Mobile phone radiation and the developing brain: behavioral and morphological effects in juvenile rats. Radiat. Res. **168**, 471–479.

Kundi, M., (2011) Comments on de Vocht et al. "time trends (1998–2007) in brain cancer incidence rates in relation to mobile phone use in England". Bioelectromagnetics **32**, 673–674.

Kuribayashi, M., Wang, J., Fujiwara, O., Doi, Y., Nabae, K., Tamano, S., Ogiso, T., Asamoto, M. and Shirai, T., (2005) Lack of effects of 1439 MHz electromagnetic near field exposure on the blood–brain barrier in immature and young rats. Bioelectromagnetics **26**, 578–588.

Kuzawa, C.W., Chugani, H.T., Grossman, L.I., Lipovich, L., Muzik, O., Hof, P.R., Wildman, D.E., Sherwood, C.C., Leonard, W.R. and Lange, N., (2014) Metabolic costs and evolutionary implications of human brain development. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **111**, 13010–13015.

Kwon, M.S., Huotilainen, M., Shestakova, A., Kujala, T., Näätänen, R. and Hämäläinen, H., (2010) No effects of mobile phone use on cortical auditory change-detection in children: an ERP study. Bioelectromagnetics **31**, 191–199.

Laudisi, F., Sambucci, M., Nasta, F., Pinto, R., Lodato, R., Altavista, P., Lovisolo, G.A., Marino, C. and Pioli, C., (2012) Prenatal exposure to radiofrequencies: effects of WiFi signals on thymocyte development and peripheral T cell compartment in an animal model. Bioelectromagnetics **33**, 652–661.

Lee, A., Choi, W.Y., Chung, M.S., Choi, H. and Choi, J., (2006) Development of Korean Male Body Model for Computational Dosimetry. ETRI Journal **28**, 107–110.

Lee, A.-K., Choi, H.-D. and Choi, J.-I., (2007) Study on SARs in Head Models With Different Shapes by Age Using SAM Model for Mobile Phone Exposure at 835 MHz. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility **49**, 302–312.

Lee, H.-J., Lee, J.-S., Pack, J.-K., Choi, H.-D., Kim, N., Kim, S.-H. and Lee, Y.-S., (2009) Lack of teratogenicity after combined exposure of pregnant mice to CDMA and WCDMA radiofrequency electromagnetic fields. Radiat. Res. **172**, 648–652.

Lee, H.-J., Pack, J.-K., Kim, T.-H., Kim, N., Choi, S.-Y., Lee, J.-S., Kim, S.-H. and Lee, Y.-S., (2010) The lack of histological changes of CDMA cellular phone-based radio frequency on rat testis. Bioelectromagnetics **31**, 528–534.

Lee, H. J., Y. B. Jin, et al. (2011). "Lymphoma development of simultaneously combined exposure to two radiofrequency signals in AKR/J mice." Bioelectromagnetics **32**(6): 485-492.

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) The effects of simultaneous combined exposure to CDMA and WCDMA electromagnetic fields on rat testicular function. Bioelectromagnetics **33**, 356–364.

Lenroot, R.K. and Giedd, J.N., (2006) Brain development in children and adolescents: Insights from anatomical magnetic resonance imaging. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, Methodological and Conceptual Advances in the Study of Brain-Behavior Dynamics: A Multivariate Lifespan Perspective **30**, 718–729.

Lenroot, R.K., Gogtay, N., Greenstein, D.K., Wells, E.M., Wallace, G.L., Clasen, L.S., Blumenthal, J.D., Lerch, J., Zijdenbos, A.P., Evans, A.C., Thompson, P.M. and Giedd, J.N., (2007) Sexual dimorphism of brain developmental trajectories during childhood and adolescence. NeuroImage **36**, 1065–1073.

Leung, S., Croft, R.J., McKenzie, R.J., Iskra, S., Silber, B., Cooper, N.R., O'Neill, B., Cropley, V., Diaz-Trujillo, A., Hamblin, D. and Simpson, D., (2011) Effects of 2G and 3G mobile phones on performance and electrophysiology in adolescents, young adults and older adults. Clin Neurophysiol **122**, 2203–2216.

Loughran, S.P., Benz, D.C., Schmid, M.R., Murbach, M., Kuster, N. and Achermann, P., (2013) No increased sensitivity in brain activity of adolescents exposed to mobile phone-like emissions. Clinical Neurophysiology **124**, 1303–1308.

Lyaginskaja, A.M., Grigoriev, Y.G., Osipov, V.A., Grigoriev, O.A. and Shafirkin, A.V., (2010) Autoimmune processes after long-term low-level exposure to electromagnetic fields (experimental results) part 5. Study of the influence of blood serum from rats exposed to low-level electromagnetic fields on pregnancy and fetal and offspring development. Biophysics **55**, 1059–1066.

Maaroufi K, Had-Aissouni L, Melon C, Sakly M, Abdelmelek H, Poucet B, Save E. (2009) Effects of prolonged iron overload and low frequency electromagnetic exposure on spatial learning and memory in the young rat. Neurobiol Learn Mem. 2009 Oct;92(3):345-55.

Maaroufi K, Save E, Poucet B, Sakly M, Abdelmelek H, Had-Aissouni L. (2011) Oxidative stress and prevention of the adaptive response to chronic iron overload in the brain of young adult rats exposed to a 150 kilohertz electromagnetic field. Neuroscience. 2011 Jul 14;186:39-47

Maaroufi, K., Had-Aissouni, L., Melon, C., Sakly, M., Abdelmelek, H., Poucet, B. and Save, E., (2014) Spatial learning, monoamines and oxidative stress in rats exposed to 900 MHz electromagnetic field in combination with iron overload. Behav. Brain Res. **258**, 80–89.

Martens, L. and Vermeeren, G., (2005) Electromagnetic dosimetry of the SAR for a walkie-talkie set-up. XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science (URSI): Programme Oral Presentations,(Vigyan Bhavan, New Delhi India).

Martínez-Búrdalo, M., Martín, A., Anguiano, M. and Villar, R., (2004) Comparison of FDTD-calculated specific absorption rate in adults and children when using a mobile phone at 900 and 1800 MHz. Phys. Med. Biol. **49**, 345.

Maskarinec G, Cooper J, Swygert L. Investigation of increased incidence inchildhood leukemia near radio towers in Hawaii: preliminary observations. JEnviron Pathol Toxicol Oncol. 1994;13(1):33-7.

Maskey, D., Kim, M., Aryal, B., Pradhan, J., Choi, I.-Y., Park, K.-S., Son, T., Hong, S.-Y., Kim, S.B., Kim, H.G. and Kim, M.J., (2010) Effect of 835 MHz radiofrequency radiation exposure on calcium binding proteins in the hippocampus of the mouse brain. Brain Research **1313**, 232–241.

Maskey, D., Pradhan, J., Aryal, B., Lee, C.-M., Choi, I.-Y., Park, K.-S., Kim, S.B., Kim, H.G. and Kim, M.J., (2010) Chronic 835-MHz radiofrequency exposure to mice hippocampus alters the distribution of calbindin and GFAP immunoreactivity. Brain Research **1346**, 237–246.

Mason, P.A., Ziriax, J.M., Hurt, W.D., Walters, T.J., Ryan, K.L., Nelson, D.A., Smith, K.I. and D'andrea, J.A., (2000) Recent Advancements in Dosimetry Measurements and Modeling, in: Klauenberg, B.J., Miklavčič, D. (Eds.), Radio Frequency Radiation Dosimetry and Its Relationship to the Biological Effects of Electromagnetic Fields. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 141–155.

Matsuzawa, J., Matsui, M., Konishi, T., Noguchi, K., Gur, R.C., Bilker, W. and Miyawaki, T., (2001) Age-related volumetric changes of brain gray and white matter in healthy infants and children. Cereb. Cortex **11**, 335–342.

Merzenich, H., Schmiedel, S., Bennack, S., Brüggemeyer, H., Philipp, J., Blettner, M. and Schüz, J., (2008) Childhood Leukemia in Relation to Radio Frequency Electromagnetic Fields in the Vicinity of TV and Radio Broadcast Transmitters. Am. J. Epidemiol. **168**, 1169–1178.

Mezei, G., Benyi, M. and Muller, A., (2007) Mobile phone ownership and use among school children in three Hungarian cities. Bioelectromagnetics **28**, 309–315.

Michelozzi P., Kirchmayer U., Capon A. (2001). [Leukemia mortality and incidence of infantile leukemia near the Vatican Radio Station of Rome]. Epidemiol Prev.; 25(6):249-55.

Monniaux, D., Caraty, A., Clement, F., Dalbiès-Tran, R., Dupont, J., Fabre, S., Gérard, N., Mermillod, P., Monget, P. and Uzbekova, S., (2009) Développement folliculaire ovarien et ovulation chez les mammifères. Inra Prod.Anim **22**, 59–76.

Morrison, J.H. and Hof, P.R., (1997) Life and death of neurons in the aging brain. Science **278**, 412–419.

Mortazavi, S.M.J., Atefi, M. and Kholghi, F., (2011) The Pattern of Mobile Phone Use and Prevalence of Self-Reported Symptoms in Elementary and Junior High School Students in Shiraz, Iran. Iran J Med Sci **36**, 96–103.

Nagaoka, T., Watanabe, S., Sakurai, K., Kunieda, E., Watanabe, S., Taki, M. and Yamanaka, Y., (2004) Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry. Phys. Med. Biol. **49**, 1.

Nagaoka, T., Togashi, T., Saito, K., Takahashi, M., Ito, K., Ueda, T., Osada, H., Ito, H. and Watanabe, S., (2006) An anatomically realistic voxel model of the pregnant woman and numerical dosimetry for a whole-body exposure to RF electromagnetic fields. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc **1**, 5463–5467.

Nagaoka, T., Togashi, T., Saito, K., Takahashi, M., Ito, K. and Watanabe, S., (2007) An anatomically realistic whole-body pregnant-woman model and specific absorption rates for pregnant-woman exposure to electromagnetic plane waves from 10 MHz to 2 GHz. Phys Med Biol **52**, 6731–6745.

Nagaoka, T., Kunieda, E. and Watanabe, S., (2008) Proportion-corrected scaled voxel models for Japanese children and their application to the numerical dosimetry of specific absorption rate for frequencies from 30 MHz to 3 GHz. Phys Med Biol **53**, 6695–6711.

Nagy, Z., Westerberg, H. and Klingberg, T., (2004) Maturation of white matter is associated with the development of cognitive functions during childhood. J Cogn Neurosci **16**, 1227–1233.

Narayanan, S.N., Kumar, R.S., Paval, J., Kedage, V., Bhat, M.S., Nayak, S. and Bhat, P.G., (2013) Analysis of emotionality and locomotion in radio-frequency electromagnetic radiation exposed rats. Neurol. Sci. **34**, 1117–1124.

Noor, N. A., H. S. Mohammed, et al. (2011). "Variations in amino acid neurotransmitters in some brain areas of adult and young male albino rats due to exposure to mobile phone radiation." European Review for Medical and Pharmacological Sciences **15**(7): 729-742..

Odaci E. Bas O, Kaplan S., (2008), Effects of prenatal exposure to a 900 MHz electromagnetic field on the dentate gyrus of rats: a stereological and histopathological study. Brain Res.; 1238:224-9.

Odacı E, İkinci A, Yıldırım M, Kaya H, Akça M, Hancı H, Fikret Sönmez O, Aslan A, Okuyan M, Baş O (2013) The effects of 900 megahertz electromagnetic field applied in the prenatal period on spinal cord morphology and motor behavior in female rat pups NeuroQuantology (11) **4** 573-581

Ogawa, K., Nabae, K., Wang, J., Wake, K., Watanabe, S., Kawabe, M., Fujiwara, O., Takahashi, S., Ichihara, T., Tamano, S. and Shirai, T., (2009) Effects of gestational exposure to 1.95-GHz W-CDMA signals for IMT-2000 cellular phones: Lack of embryotoxicity and teratogenicity in rats. Bioelectromagnetics **30**, 205–212.

Orendáčová, J., Orendáč, M., Mojžiš, M., Labun, J., Martončíková, M., Saganová, K., Lievajová, K., Blaško, J., Abdiová, H., Gálik, J. and Račeková, E., (2011) Effects of short-duration electromagnetic radiation on early postnatal neurogenesis in rats: Fos and NADPH-d histochemical studies. Acta Histochemica **113**, 723–728.

Oshima, N., Nishida, A., Shimodera, S., Tochigi, M., Ando, S., Yamasaki, S., Okazaki, Y. and Sasaki, T., (2012) The Suicidal Feelings, Self-Injury, and Mobile Phone Use After Lights Out in Adolescents. J. Pediatr. Psychol. **37**, 1023–1030.

Ozlem Nisbet, H., Nisbet, C., Akar, A., Cevik, M. and Onder Karayigit, M., (2012) Effects of exposure to electromagnetic field (1.8/0.9 GHz) on testicular function and structure in growing rats. Research in Veterinary Science **93**, 1001–1005.

Özorak A, Nazıroğlu M, Çelik Ö, Yüksel M, Özçelik D, Özkaya MO, Çetin H, Kahya MC, Kose SA., (2013), "Wi-Fi (2.45 GHz)- and mobile phone (900 and 1800 MHz)-induced risks on oxidative stress and elements in kidney and testis of rats during pregnancy and the development of offspring", Biol Trace Elem Res. 2013 Dec;156(1-3):221-9

Park SK., Ha M, Im HJ. (2004). Ecological study on residences in the vicinity of AM radio broadcasting towers and cancer death: preliminary observations in Korea. Int Arch Occup Environ Health, 77: 387–394.

Paulraj, R. and Behari, J., (2006a) Single strand DNA breaks in rat brain cells exposed to microwave radiation. Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis **596**, 76–80.

Paulraj, R. and Behari, J., (2006b) Protein kinase C activity in developing rat brain cells exposed to 2.45 GHz radiation. Electromagn Biol Med **25**, 61–70.

Paus, T., (2005) Mapping brain maturation and cognitive development during adolescence. Trends Cogn. Sci. (Regul. Ed.) **9**, 60–68.

Pelletier, A., Delanaud, S., Décima, P., Thuroczy, G., de Seze, R., Cerri, M., Bach, V., Libert, J.-P. and Loos, N., (2013) Effects of chronic exposure to radiofrequency electromagnetic fields on energy balance in developing rats. Environ Sci Pollut Res Int **20**, 2735–2746.

Petanjek, Z., Judaš, M., Šimic, G., Rasin, M.R., Uylings, H.B.M., Rakic, P. and Kostovic, I., (2011) Extraordinary neoteny of synaptic spines in the human prefrontal cortex. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **108**, 13281–13286.

Peyman, A., Rezazadeh, A.A. and Gabriel, C., (2001) Changes in the dielectric properties of rat tissue as a function of age at microwave frequencies. Phys. Med. Biol. **46**, 1617.

Peyman, A., Holden, S.J., Watts, S., Perrott, R. and Gabriel, C., (2007) Dielectric properties of porcine cerebrospinal tissues at microwave frequencies: in vivo, in vitro and systematic variation with age. Phys Med Biol **52**, 2229–2245.

Peyman, A., Gabriel, C., Grant, E.H., Vermeeren, G. and Martens, L., (2009) Variation of the dielectric properties of tissues with age: the effect on the values of SAR in children when exposed to walkie-talkie devices. Phys Med Biol **54**, 227–241.

Peyman, A., Khalid, M., Calderon, C., Addison, D., Mee, T., Maslanyj, M. and Mann, S., (2011a) Assessment of exposure to electromagnetic fields from wireless computer networks (wi-fi) in schools; results of laboratory measurements. Health Phys **100**, 594–612.

Peyman, A., (2011b) Dielectric properties of tissues as a function of age and their relevance in assessment of the exposure of children to electromagnetic fields.

Peyman, A., (2011c) Dielectric properties of tissues; variation with age and their relevance in exposure of children to electromagnetic fields; state of knowledge. Progress in Biophysics and Molecular Biology **107**, 434–438.

Poulletier de Gannes, F., Haro, E., Hurtier, A., Taxile, M., Athane, A., Ait-Aissa, S., Masuda, H., Percherncier, Y., Ruffié, G., Billaudel, B., Dufour, P., Veyret, B. and Lagroye, I., (2012) Effect of in utero wi-fi exposure on the pre- and postnatal development of rats. Birth Defects Res. B Dev. Reprod. Toxicol. **95**, 130–136.

Poulletier de Gannes, F., B. Billaudel, et al. (2013). "Rat fertility and embryo fetal development: influence of exposure to the Wi-Fi signal." Reprod Toxicol **36**: 1-5.

Pourlis, A.F., (2009) Reproductive and developmental effects of EMF in vertebrate animal models. Pathophysiology : the official journal of the International Society for Pathophysiology / ISP **16**, 179–89.

Preece, A.W., Goodfellow, S., Wright, M.G., Butler, S.R., Dunn, E.J., Johnson, Y., Manktelow, T.C. and Wesnes, K., (2005) Effect of 902 MHz mobile phone transmission on cognitive function in children. Bioelectromagnetics **26**, S138–S143.

Quinn, R., (2005) Comparing rat's to human's age: How old is my rat in people years? Nutrition **21**, 775–777.

Rağbetli, M. C., A. Aydinlioglu, et al. (2009). "Effect of prenatal exposure to mobile phone on pyramidal cell numbers in the mouse hippocampus: a stereological study." Int J Neurosci **119**(7): 1031-1041

Rağbetli, M.C., Aydinlioğlu, A., Koyun, N., Rağbetli, C., Bektas, S. and Ozdemir, S., (2010) The effect of mobile phone on the number of Purkinje cells: a stereological study. Int. J. Radiat. Biol. **86**, 548–554.

Rezk A.Y., Abdulqawi K., Mustafa R.M. et al. (2008). Fetal and neonatal responses following maternal exposure to mobile phones. Saudi Med J.; 29(2):218-23.

Redmayne, M., (2013) New Zealand adolescents' cellphone and cordless phone user-habits: are they at increased risk of brain tumours already? A cross-sectional study. Environ Health **12**, 5.

Redmayne, M., Inyang, I., Dimitriadis, C., Benke, G. and Abramson, M.J., (2010) Cordless telephone use: implications for mobile phone research. J Environ Monit **12**, 809–812.

Redmayne, M., Smith, E. and Abramson, M.J., (2013a) A forecasting method to reduce estimation bias in self-reported cell phone data. J Expo Sci Environ Epidemiol **23**, 539–544.

Redmayne, M., Smith, E. and Abramson, M.J., (2013b) The relationship between adolescents' well-being and their wireless phone use: a cross-sectional study. Environmental Health **12**, 90.

Rice, D. and Barone, S., (2000) Critical periods of vulnerability for the developing nervous system: evidence from humans and animal models. Environ. Health Perspect. **108 Suppl 3**, 511–533.

Romijn, H.J., Hofman, M.A. and Gramsbergen, A., (1991) At what age is the developing cerebral cortex of the rat comparable to that of the full-term newborn human baby? Early Human Development **26**, 61–67.

De Salles, A.A., Bulla, G. and Rodriguez, C.E.F., (2006) Electromagnetic absorption in the head of adults and children due to mobile phone operation close to the head. Electromagn Biol Med **25**, 349–360.

Sambucci, M., Laudisi, F., Nasta, F., Pinto, R., Lodato, R., Altavista, P., Lovisolo, G.A., Marino, C. and Pioli, C., (2010) Prenatal exposure to non-ionizing radiation: effects of WiFi signals on pregnancy outcome, peripheral B-cell compartment and antibody production. Radiat. Res. **174**, 732–740.

Sambucci, M., Laudisi, F., Nasta, F., Pinto, R., Lodato, R., Lopresto, V., Altavista, P., Marino, C. and Pioli, C., (2011) Early life exposure to 2.45 GHz WiFi-like signals: Effects on development and maturation of the immune system. Progress in Biophysics and Molecular Biology **107**, 393–398.

Sangun, O., Dundar, B., Darici, H., Comlekci, S. and Celik, S., (2014) The effects of long-term exposure to a 2450 MHz electromagnetic field on growth and pubertal development in female Wistar rats. Electromagn Biol Med.

Santé Canada (2009). Limites d'exposition humaine à l'énergie électromagnétique radioélectrique dans la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz – Code de sécurité 6, Ottawa, Santé Canada.

Santé Canada (2013). Limites d'exposition humaine à l'énergie électromagnétique radioélectrique dans la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz – Code de sécurité 6, Ottawa, Santé Canada.

Santé Canada (2015). Limites d'exposition humaine à l'énergie électromagnétique radioélectrique dans la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz – Code de sécurité 6, Ottawa, Santé Canada.

Saran, A., Pazzaglia, S., Mancuso, M., Rebessi, S., Di Majo, V., Tanori, M., Lovisolo, G.A., Pinto, R. and Marino, C., (2007) Effects of exposure of newborn patched1 heterozygous mice to GSM, 900 MHz. Radiat. Res. **168**, 733–740.

Saunders NR, Liddelow SA, Dziegielewska KM (2012) Barrier mechanisms in the developing brain. Frontiers Pharmacol 3: article 46.

Saunders NR, Dreifuss JJ, Dziegielewska KM, Johansson PA , Habgood MD, Mollgard K, Bauer HC (2014) The rights and wrongs of blood-brain barrier permeability studies : a walk through 100 years of history. Frontiers neurosci 8: article 404.

Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (Scenihr), (2007) Possible effects of electromagnetic Fields (EMF) on Human Health.

Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (Scenihr), (2009) Health Effects of Exposure to EMF.

Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (Scenihr), (2013) Potential health effects of exposure to electromagnetic fields 15 (EMF).

Şekeroğlu, V., Akar, A. and Şekeroğlu, Z.A., (2012) Cytotoxic and genotoxic effects of high-frequency electromagnetic fields (GSM 1800 MHz) on immature and mature rats. Ecotoxicology and Environmental Safety **80**, 140–144.

Sengupta, P., (2013) The Laboratory Rat: Relating Its Age With Human's. Int J Prev Med **4**, 624–630.

Shirai, T., Ichihara, T., Wake, K., Watanabe, S., Yamanaka, Y., Kawabe, M., Taki, M., Fujiwara, O., Wang, J., Takahashi, S. and Tamano, S., (2007) Lack of promoting effects of chronic exposure to 1.95-GHz W-CDMA signals for IMT-2000 cellular system on development of N-ethylnitrosourea-induced central nervous system tumors in F344 rats. Bioelectromagnetics **28**, 562–572.

Shirai, T., Kawabe, M., Ichihara, T., Fujiwara, O., Taki, M., Watanabe, S., Wake, K., Yamanaka, Y., Imaida, K., Asamoto, M. and Tamano, S., (2005) Chronic exposure to a 1.439 GHz electromagnetic field used for cellular phones does not promote N-ethylnitrosourea induced central nervous system tumors in F344 rats. Bioelectromagnetics **26**, 59–68.

Skakkebæk, N.E., Jørgensen, N., Main, K.M., Meyts, E.R.-D., Leffers, H., Andersson, A.-M., Juul, A., Carlsen, E., Mortensen, G.K., Jensen, T.K. and Toppari, J., (2006) Is human fecundity declining? International Journal of Andrology **29**, 2–11.

Soderqvist, Fredrik, Lennart Hardell, Michael Carlberg, and Kjell Hansson Mild. (2007) Ownership and Use of Wireless Telephones: A Population-Based Study of Swedish Children Aged 7-14 Years. BMC Public Health 7: 105. doi:10.1186/1471-2458-7-105.

Söderqvist, Fredrik, Michael Carlberg, and Lennart Hardell. (2008) Use of Wireless Telephones and Self-Reported Health Symptoms: A Population-Based Study among Swedish Adolescents Aged 15–19 Years. Environmental Health 7, no. 1: 18. doi:10.1186/1476-069X-7-18.

Soderqvist, F., Carlberg, M., Hansson Mild, K. and Hardell, L. (2011) Childhood brain tumour risk and its association with wireless phones: a commentary. Environ Health **10**, 106.

Sommer, A.M., Bitz, A.K., Streckert, J., Hansen, V.W. and Lerchl, A., (2007) Lymphoma development in mice chronically exposed to UMTS-modulated radiofrequency electromagnetic fields. Radiat. Res. **168**, 72–80.

Sommer, A.M., Grote, K., Reinhardt, T., Streckert, J., Hansen, V. and Lerchl, A., (2009) Effects of radiofrequency electromagnetic fields (UMTS) on reproduction and development of mice: a multi-generation study. Radiat. Res. **171**, 89–95.

Soria C, Escolano S, El Sabbagh S, Chmura S, Bulteau C, Chiron C, Dellatolas G (2012) Behavioral problems, cognitive difficulties and quality of life in children with epilepsy: an analysis of parental concerns. Chil Neuropsychol 18: 209-227.

Sowell, E.R., Peterson, B.S., Thompson, P.M., Welcome, S.E., Henkenius, A.L. and Toga, A.W., (2003) Mapping cortical change across the human life span. Nat. Neurosci. **6**, 309–315.

Sowell, E.R., Thompson, P.M., Leonard, C.M., Welcome, S.E., Kan, E. and Toga, A.W., (2004a) Longitudinal mapping of cortical thickness and brain growth in normal children. J. Neurosci. **24**, 8223–8231.

Sowell, E.R., Thompson, P.M. and Toga, A.W., (2004b) Mapping changes in the human cortex throughout the span of life. Neuroscientist **10**, 372–392.

Spear, L.P., (2000) The adolescent brain and age-related behavioral manifestations. Neuroscience & Biobehavioral Reviews **24**, 417–463.

SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, (2014) Ninth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2014. SSM.

Sudan, M., Kheifets, L., Arah, O., Olsen, J. and Zeltzer, L., (2012) Prenatal and Postnatal Cell Phone Exposures and Headaches in Children. Open Pediatr Med Journal **6**, 46–52.

Sudan, M., Kheifets, L., Arah, O.A. and Olsen, J., (2013a) Cell Phone Exposures and Hearing Loss in Children in the Danish National Birth Cohort: Cell phones and hearing loss in children. Paediatric and Perinatal Epidemiology **27**, 247–257.

Sudan, M., Kheifets, L., Arah, O.A. and Olsen, J., (2013b) On the association of cell phone exposure with childhood behaviour. J Epidemiol Community Health **67**, 979.

Supélec (2006). "RLAN et champs électromagnétiques." Laboratoire d'électromagnétisme de Supélec. Étude commandée par l'Autorité de Régulation des Communications électroniques et des Postes (ARCEP).

Szczerba, Dominik, Esra Neufeld, Marcel Zefferer, Gabor Szekely, and Niels Kuster. 2010. "Unstructured Mesh Generation from the Virtual Family Models for Whole Body Biomedical Simulations." Procedia Computer Science 1(1):837–44.

Takahashi, S., Imai, N., Nabae, K., Wake, K., Kawai, H., Wang, J., Watanabe, S., Kawabe, M., Fujiwara, O., Ogawa, K., Tamano, S. and Shirai, T., (2010) Lack of adverse effects of whole-body exposure to a mobile telecommunication electromagnetic field on the rat fetus. Radiat. Res. **173**, 362–372.

Tamnes, C.K., Walhovd, K.B., Engvig, A., Grydeland, H., Krogsrud, S.K., Østby, Y., Holland, D., Dale, A.M. and Fjell, A.M., (2014) Regional hippocampal volumes and development predict learning and memory. Dev. Neurosci. **36**, 161–174.

Tau, G.Z. and Peterson, B.S., (2010) Normal Development of Brain Circuits. Neuropsychopharmacology **35**, 147–168.

Thomas, S., Kuhnlein, A., Heinrich, S., Praml, G., von Kries, R. and Radon, K., (2008) Exposure to mobile telecommunication networks assessed using personal dosimetry and well-being in children and adolescents: the German MobilEe-study. Environ Health **7**, 54

Thomas, S., Heinrich, S., Kries, R. and Radon, K., (2010a) Exposure to radio-frequency electromagnetic fields and behavioural problems in Bavarian children and adolescents. European Journal of Epidemiology **25**, 135–141.

Thomas, S., Benke, G., Dimitriadis, C., Inyang, I., Sim, M.R., Wolfe, R., Croft, R.J. and Abramson, M.J., (2010b) Use of mobile phones and changes in cognitive function in adolescents. Occup Environ Med **67**, 861–866.

Tillmann, T., Ernst, H., Ebert, S., Kuster, N., Behnke, W., Rittinghausen, S. and Dasenbrock, C., (2007) Carcinogenicity study of GSM and DCS wireless communication signals in B6C3F1 mice. Bioelectromagnetics **28**, 173–187.

Tillmann, T., Ernst, H., Streckert, J., Zhou, Y., Taugner, F., Hansen, V. and Dasenbrock, C., (2010) Indication of cocarcinogenic potential of chronic UMTS-modulated radiofrequency exposure in an ethylnitrosourea mouse model. Int. J. Radiat. Biol. **86**, 529–541.

Toga, A.W., Thompson, P.M., Mori, S., Amunts, K. and Zilles, K., (2006) Towards multimodal atlases of the human brain. Nat Rev Neurosci **7**, 952–966.

Vecchio, F., Babiloni, C., Ferreri, F., Buffo, P., Cibelli, G., Curcio, G., Dijkman, S. van, Melgari, J.-M., Giambattistelli, F. and Rossini, P.M., (2010) Mobile phone emission modulates inter-hemispheric functional coupling of EEG alpha rhythms in elderly compared to young subjects. Clinical Neurophysiology **121**, 163–171.

De Vocht, F., Burstyn, I. and Cherrie, J.W., (2011a) Time trends (1998–2007) in brain cancer incidence rates in relation to mobile phone use in England. Bioelectromagnetics **32**, 334–339.

De Vocht, F., Burstyn, I. and Cherrie, J.W., (2011b) Authors' reply to Kundi's comments on de Vocht et al. "time trends (1998–2007) in brain cancer incidence rates in relation to mobile phone use in England". Bioelectromagnetics **32**, 675–676.

Vrijheid, M., Martinez, D., Forns, J., Guxens, M., Julvez, J., Ferrer, M. and Sunyer, J., (2010) Prenatal exposure to cell phone use and neurodevelopment at 14 months. Epidemiology **21**, 259–262.

Walhovd, K.B., Tamnes, C.K. and Fjell, A.M., (2014) Brain structural maturation and the foundations of cognitive behavioral development. Curr. Opin. Neurol. **27**, 176–184.

Wang, J. and Fujiwara, O., (2003) Comparison and evaluation of electromagnetic absorption characteristics in realistic human head models of adult and children for 900-MHz mobile telephones. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **51**, 966–971.

Wang, J., Fujiwara, O., Kodera, S. and Watanabe, S., (2006a) FDTD calculation of whole-body average SAR in adult and child models for frequencies from 30 MHz to 3 GHz. Phys. Med. Biol. **51**, 4119.

Wang, J., Fujiwara, O. and Watanabe, S., (2006b) Approximation of aging effect on dielectric tissue properties for SAR assessment of mobile telephones. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility **48**, 408–413.

Watilliaux, A., Edeline, J.-M., Lévêque, P., Jay, T.M. and Mallat, M., (2011) Effect of exposure to 1,800 MHz electromagnetic fields on heat shock proteins and glial cells in the brain of developing rats. Neurotox Res **20**, 109–119.

Welsh, M., Saunders, P.T.K., Fisken, M., Scott, H.M., Hutchison, G.R., Smith, L.B. and Sharpe, R.M., (2008) Identification in rats of a programming window for reproductive tract masculinization, disruption of which leads to hypospadias and cryptorchidism. J. Clin. Invest. **118**, 1479–1490.

Wiart, J., Hadjem, A., Bloch, I. and Wong, M.-F., (2007) RF Exposure assessment in children head: Present questions and future challenges, in: International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2007. ICEAA 2007. Presented at the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2007. ICEAA 2007, pp. 1034–1035.

Wiart, J., Hadjem, A., Varsier, N. and Conil, E., (2011) Numerical dosimetry dedicated to children RF exposure. Prog. Biophys. Mol. Biol. **107**, 421–427.

Wiart, J., Hadjem, A., Wong, M.F. and Bloch, I., (2008) Analysis of RF exposure in the head tissues of children and adults. Phys. Med. Biol. **53**, 3681.

Wiedemann, P., Institut für Neurowissenschaften und Medizin , Ethik in den Neurowissenschaften, (2009) Childrenś health and RF EMF exposure. Forschungszentrum, Zentralbibliothek, Jülich.

Winick, M., (1975) Effects of malnutrition on the maturing central nervous system. Adv Neurol **13**, 193–246.

Wolburg, H., Noell, S., Mack, A., Wolburg-Buchholz, K., and Fallier-Becker, P. (2009). Brain endothelial cells and the glio-vascular complex. Cell Tissue Res. *335*, 75–96.

Wu, D., Shamsi, S., Chen, J. and Kainz, W., (2006) Evaluations of Specific Absorption Rate and Temperature Increase Within Pregnant Female Models in Magnetic Resonance Imaging Birdcage Coils. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **54**, 4472–4478.

Yang, Y.-S., Yen, J.-Y., Ko, C.-H., Cheng, C.-P. and Yen, C.-F., (2010) The association between problematic cellular phone use and risky behaviors and low self-esteem among Taiwanese adolescents. BMC Public Health **10**, 217.

Yen, C.-F., Tang, T.-C., Yen, J.-Y., Lin, H.-C., Huang, C.-F., Liu, S.-C. and Ko, C.-H., (2009) Symptoms of problematic cellular phone use, functional impairment and its association with depression among adolescents in Southern Taiwan. Journal of Adolescence **32**, 863–873.

Zhou, D., Lebel, C., Treit, S., Evans, A. and Beaulieu, C., (2015) Accelerated longitudinal cortical thinning in adolescence. NeuroImage **104**, 138–145.

Ziemann, C., Brockmeyer, H., Reddy, S.B., Vijayalaxmi, Prihoda, T.J., Kuster, N., Tillmann, T. and Dasenbrock, C., (2009) Absence of genotoxic potential of 902 MHz (GSM) and 1747 MHz (DCS) wireless communication signals: In vivo two-year bioassay in B6C3F1 mice. Int. J. Radiat. Biol. **85**, 454–464.

Zubal, I.G., Harrell, C.R., Smith, E.O., Rattner, Z., Gindi, G. and Hoffer, P.B., (1994) Computerized three-dimensional segmented human anatomy. Medical Physics **21**, 299–302.

7.2 Normes

EN 50566:2013 *Product standard to demonstrate compliance of radio frequency fields from handheld and body-mounted wireless communication devices used by the general public (30 MHz - 6 GHz).*

EN 62479:2010 Évaluation de la conformité des appareils électriques et électroniques de faible puissance aux restrictions de base concernant l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques (10 MHZ - 300 GHZ)

IEC 62209-2:2010 *Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Human models, instrumentation, and procedures Part 2: Procedure to determine the Specific Absorption Rate (SAR) in the head and body for 30 MHz to 6 GHz Handheld and Body-Mounted Devices used in close proximity to the Body.*

NF X 50-110 (mai 2003) Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise. AFNOR (indice de classement X 50-110).

7.3 Législation et réglementation

Circulaire du 24 juillet 1990 relative à la mise en place des périmètres de protection des points de prélèvement d'eau destinée à la consommation humaine (art. L. 20 du code de la santé publique). NOR: SPSP9001537C, J.O n° 212 du 13 septembre 1990.

Décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L.32 du code des postes et télécommunication et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques.

Recommandation du Conseil n° 1999/519/CE du 12/07/99 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz)

Directive 1999/5/CE du Parlement européen et du Conseil du 9 mars 1999 concernant les équipements hertziens et les équipements terminaux de télécommunications et la reconnaissance mutuelle de leur conformité.

Directive 2014/53/UE du Parlement européen et du Conseil du 16 avril 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché d'équipements radioélectriques et abrogeant la directive 1999/5/CE Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE

Ordonnance n° 2001-670 du 25 juillet 2001 portant adaptation au droit communautaire du code de la propriété intellectuelle et du code des postes et télécommunications

Directive 98/13/CE du Parlement européen et du Conseil du 12 février 1998 concernant les équipements terminaux de télécommunications et les équipements de stations terrestres de communications par satellite, incluant la reconnaissance mutuelle de leur conformité

Directive 2006/95/CE du Parlement européen et du Conseil du 12 décembre 2006 concernant le rapprochement des législations des États membres relatives au matériel électrique destiné à être employé dans certaines limites de tension

Directive 2004/108/CE du Parlement européen et du Conseil du 15 décembre 2004 relative au rapprochement des législations des États membres concernant la compatibilité électromagnétique et abrogeant la directive 89/336/CEE

Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement dite « Grenelle 2 ».

Loi n° 2015-136 du 9 février 2015 relative à la sobriété, à la transparence, à l'information et à la concertation en matière d'exposition aux ondes électromagnétiques.

Loi n° 2016-41 du 26 janvier 2016 de modernisation de notre système de santé

Arrêté royal du 30 juillet 2013 relatif à l'interdiction de mise sur le marché de téléphones mobiles spécifiquement conçus pour les jeunes enfants, Moniteur Belge, 30 août 2013, p. 60129.

Arrêté royal du 30 juillet 2013 relatif à la disponibilité d'informations à l'attention des consommateurs concernant le débit d'absorption spécifique de téléphones mobiles et à la publicité pour les téléphones mobiles, Moniteur Belge, 30 août 2013, p. 60130.

ANNEXES

Annexe 1 : lettre de saisine

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

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

1

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	Le Directeur général de la prévention des risques	La Directrice générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes
Jean-Yves GRALL	P/o Laurent MICHEL	Nathalie HOMOBONO

2

Annexe 2 : recommandations techniques d'allocations de fréquence

Le Tableau 32, issu de la recommandation ERC 70-03 de la CEPT[45] 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 32 : puissances maximales autorisées par fréquence.

Bande de fréquence	Puissance ou champ magnétique	Espacement des canaux
6,765 - 6,795 MHz	42 dBµA/m à 10m	Pas d'espacement
13,553 - 13,567 MHz	42 dBµA/m à 10m	Pas d'espacement
26,957 - 27,283 MHz	42 dBµA/m à 10 m 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	≤ 25 mW PAR	≤ 100 kHz
868,000 - 868,600 MHz	≤ 25 mW PAR	Pas d'espacement
868,700 - 869,200 MHz	≤ 25 mW PAR	Pas d'espacement
869,400 - 869,650 MHz	≤ 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 (*cf.* Tableau 33).

[45] CEPT : Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications.

Tableau 33 : 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

Recommandation ERC DEC (01) 07 :

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 34.

Tableau 34 : 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

Annexe 3 : normes EN 300 220 et EN 50371

La norme EN 300 220 : limites de puissances et de fréquence par canaux

La norme EN 300 220 s'applique aux dispositifs de radiocommunication dans la bande 25 MHz à 1 GHz, dont la puissance d'émission n'excède pas 500 mW. Elle définit les limites de puissance et de fréquence par canaux conformément à la recommandation ERC 70-03. Cette norme concerne la majeure partie des dispositifs de courte portée (SRD). Par conséquent, elle couvre la grande majorité des exigences essentielles en termes de puissance d'émission des jouets radiocommandés.

Les dispositifs concernés par la norme sont les suivants :

- les alarmes, systèmes d'identification, radiorepérage, télécommande, télémétrie, *etc.* ;
- l'identification par radiofréquence (RFID) ;
- les applications de détection, de mouvement et d'alerte ;
- les *talkies-walkies* ;
- Les autres dispositifs à courte portée non spécifiques.

Ces types d'équipements hertziens peuvent fonctionner :

- soit avec une connexion de sortie radiofréquence et une antenne dédiée, soit avec une antenne intégrée ;
- pour tous les types de modulation ;
- avec ou sans parole.

Les spécifications d'essais sont les suivantes :

- chaque équipement soumis à essai doit satisfaire aux exigences de la norme sur toutes les fréquences auxquelles il est prévu de fonctionner ;
- les essais doivent être réalisés sur les fréquences les plus hautes et les plus basses dans la plage de fonctionnement prévue de l'équipement. L'essai doit être réalisé sur toutes les modulations supportées ;
- si un équipement est conçu pour fonctionner avec différentes puissances d'onde porteuse, des mesurages de chaque paramètre d'émetteur doivent être effectués au niveau de puissance le plus élevé auquel l'émetteur est prévu de fonctionner.

En outre, une documentation technique et des manuels d'exploitation, suffisants pour permettre d'effectuer les essais, doivent être disponibles. Une installation de fixation d'essais pour l'équipement, comprenant une antenne intégrée, peut être fournie, à différentes valeurs de puissances.

Les types d'essais imposés par la norme EN 300 220 sont les suivants :

- Méthodes de mesurage et limites des paramètres de l'émetteur :
  - erreur de fréquence ;
  - puissance moyenne (par conduction) ;
  - puissance apparente rayonnée ou PIRE ;
  - modulation avec étalement du spectre ;
  - puissance transitoire ;
  - puissance dans les canaux adjacents ;
  - largeur de bande de modulation ;
  - émissions non désirées dans le domaine des rayonnements non essentiels ;

- stabilité de fréquence à basse tension.

- Paramètres du récepteur, essentiellement pour des problématiques de compatibilité électromagnétique :
  - sensibilité du récepteur ;
  - seuil de LBT[46] du récepteur ;
  - sélectivité des canaux adjacents ;
  - blocage ;
  - rejet des réponses parasites ;
  - rayonnements parasites du récepteur.

La norme EN 50371 : limites d'exposition du public

Cette norme fixe les limites pour l'exposition du public aux champs électromagnétiques. Elle concerne les produits électriques et électroniques de « faible » puissance incorporant des émetteurs RF, avec un maximum de 20 mW de puissance moyenne et de 20 W de puissance crête sur la plage de 10 MHz à 300 GHz. L'utilisation d'émetteurs radiofréquences de faible puissance concerne la majeure partie des SRD, et la totalité des jouets sur le marché européen.

La conformité à cette norme s'obtient par la démonstration que les restrictions de base pour l'exposition humaine aux champs électromagnétiques ne sont pas dépassées.

Les critères de conformités sont les suivants :

- pour tous les champs électromagnétiques

Si la puissance moyenne émise par un appareil fonctionnant dans la gamme de fréquences 10 MHz – 300 GHz est inférieure ou égale à 20 mW et que la puissance crête transmise est inférieure à 20 W, alors l'appareil est réputé conforme aux restrictions de base sans essai. La durée d'intégration est de $68/f^{1,05}$ minutes (f en GHz) dans la bande 10 GHz – 300 GHz.

Si la puissance totale de l'alimentation ou la puissance d'entrée du circuit qui produit les émissions les plus importantes dans le dispositif est inférieure à 20 mW, on suppose alors que la puissance émise est inférieure à 20 mW.

- pour les champs électromagnétiques dont la durée d'impulsion est inférieure à 30 µs

Pour les dispositifs mettant en œuvre des impulsions de durée inférieure à 30 microsecondes aux fréquences comprises entre 300 MHz et 10 GHz, il est nécessaire de respecter également une restriction de base portant sur l'absorption spécifique (AS). La valeur limite est de 2 mJ/kg pour 10 g de tissus, quelle que soit la localisation du tissu correspondant dans la tête. Pour la plupart des impulsions, la restriction concernant le DAS est plus sévère, mais pour des impulsions dont la fréquence de répétition est inférieure à 100 Hz, la restriction concernant l'AS est prédominante. Pour les dispositifs qui produisent des impulsions dont la fréquence de répétition est inférieure à 100 Hz, il convient que la puissance moyenne soit inférieure à 20*prf mW (prf étant la fréquence de répétition des impulsions exprimée en Hz).

L'évaluation est valide seulement si l'incertitude de la mesure du champ est inférieure à 30 %. Le rapport doit contenir toutes les informations nécessaires pour effectuer les évaluations reproductibles, les tests, les calculs et les mesures, donnant des résultats au sein de l'étalonnage requis et les limites d'incertitude.

[46] LBT : *Listen Before Talk*, littéralement « ecouter avant de parler », technique en radiocommunication utilisée par exemple par des appareils afin de détecter un réseau ou un canal libre de communication.

- Analyse de la norme :

Cette norme établit la conformité en s'appuyant simplement sur les niveaux de puissance émis par les appareils, sans référence aux niveaux de champ maximum définis par l'Icnirp et repris dans la recommandation 1999/519/CE.

Elle s'applique aux appareils dit « de faible puissance » (ayant une puissance moyenne inférieure à 20 mW). Les jouets, qui rentrent dans le champ d'application de cette norme, sont donc, normalement, réglementairement conformes aux exigences essentielles de sécurité, en matière d'exposition aux champs électromagnétiques.

Annexe 4 : caractéristiques diélectriques des milieux biologiques

Les éléments ci-dessous sont extraits de la thèse de doctorat de J.F. Chateaux[47].

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 $\varepsilon_0 = 8{,}854 \,.\, 10^{-12}$ F/m est la permittivité diélectrique du vide.

Si le milieu est linéaire, la polarisation est proportionnelle au champ électrique et on a :

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}$$

[47] *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.

où ε est la permittivité du matériau. Dans le vide, où la polarisation est nulle, le déplacement électrique vaut donc :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E}$$

On définit en pratique la permittivité relative ε_r comme étant le rapport de la permittivité du matériau à celle du vide :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

Ce terme est également appelé constante diélectrique du matériau.

Si le champ électrique $\vec{E}$ varie dans le temps, sinusoïdalement par exemple, un mouvement oscillatoire des dipôles apparaît en raison de leur tendance à s'aligner sur le champ électrique. Bien que ces oscillations se fassent sur place et qu'il n'y a donc pas de réelle migration des dipôles, ce mouvement local est assimilable à un courant alternatif appelé courant de déplacement. Ce nom peut paraître un peu paradoxal mais a justement été choisi par Maxwell, qui a introduit cette notion, pour indiquer que ce courant résulte du déplacement alternatif de charges liées [INA 98].

De façon plus pratique, le courant de conduction est celui qui circule dans une résistance pure alors que le courant de déplacement est celui qui circule au travers d'une capacité pure.

Milieu diélectrique à pertes

Au paragraphe précédent nous avons rappelé que les dipôles, permanents ou induits, présents dans les diélectriques s'alignent suivant la direction du champ électrique $\vec{E}$. Cependant, cette rotation des dipôles doit s'opposer à des forces de frottement, à des forces de rappel ainsi qu'à l'agitation des atomes et molécules due à la température ambiante. L'existence de ces forces s'opposant à l'orientation des dipôles a une double conséquence, en particulier lorsque le champ électrique appliqué est variable et de haute fréquence :

- Le travail développé pour contrecarrer les forces de friction consomme de l'énergie prélevée au champ électrique. Cette énergie se dissipe dans le matériau sous forme de chaleur. C'est ainsi que fonctionnent les fours à micro-ondes. Un diélectrique absorbant de l'énergie par ce mécanisme est qualifié de diélectrique à pertes.

- L'orientation des dipôles se fait avec un certain retard. Ce retard est négligeable lorsque le champ électrique varie lentement et les champs $\vec{D}$ et $\vec{E}$ sont alors en phase. Cependant, lorsque la fréquence augmente, le retard devient significatif et les champs $\vec{D}$ et $\vec{E}$ ne sont plus en phase. Afin de traduire ce déphasage, la permittivité définie plus haut est remplacée par une grandeur complexe dont la partie imaginaire traduit les pertes énergétiques et on note :

$$\vec{D} = \varepsilon^* \cdot \vec{E}$$

avec $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$

Phénomènes de relaxation

En réalité, de nombreux mécanismes de polarisation coexistent et on peut distinguer ainsi :

- La polarisation d'orientation résultant de l'orientation des molécules dipolaires rigides [PER 97].
- La polarisation ionique, due au déplacement des ions positifs par rapport aux ions négatifs dans les molécules à liaison ionique.
- La polarisation électronique due à la déformation du nuage électronique des atomes.

On le verra par la suite, d'autres types de polarisation interviennent dans les milieux complexes que sont les tissus biologiques.

À chacun de ces mécanismes de polarisation peut être associée une constante de temps traduisant le temps de réponse à l'alignement des dipôles. Ainsi, l'absorption d'énergie liée à un mécanisme particulier de polarisation varie en fonction de la fréquence du champ électrique appliqué. Autour d'une certaine fréquence spécifique au type de polarisation considéré, une résonance se produit ce qui entraîne une absorption d'énergie maximale par le milieu. On parle alors de phénomène de relaxation.

En observant le comportement de la partie réelle (ε') et de la partie imaginaire (ε'') de la permittivité complexe ε^* en fonction de la fréquence (Figure I.6), une relaxation se traduit par :

- Une augmentation de la partie imaginaire, traduisant des pertes plus importantes.
- Une réduction de la partie réelle, traduisant une réduction de la capacité du matériau à se polariser. Ce dernier point est tout à fait compréhensible car un des mécanismes contribuant à la polarisation globale n'agit plus celui-ci étant incapable de suivre les variations du champ électrique.

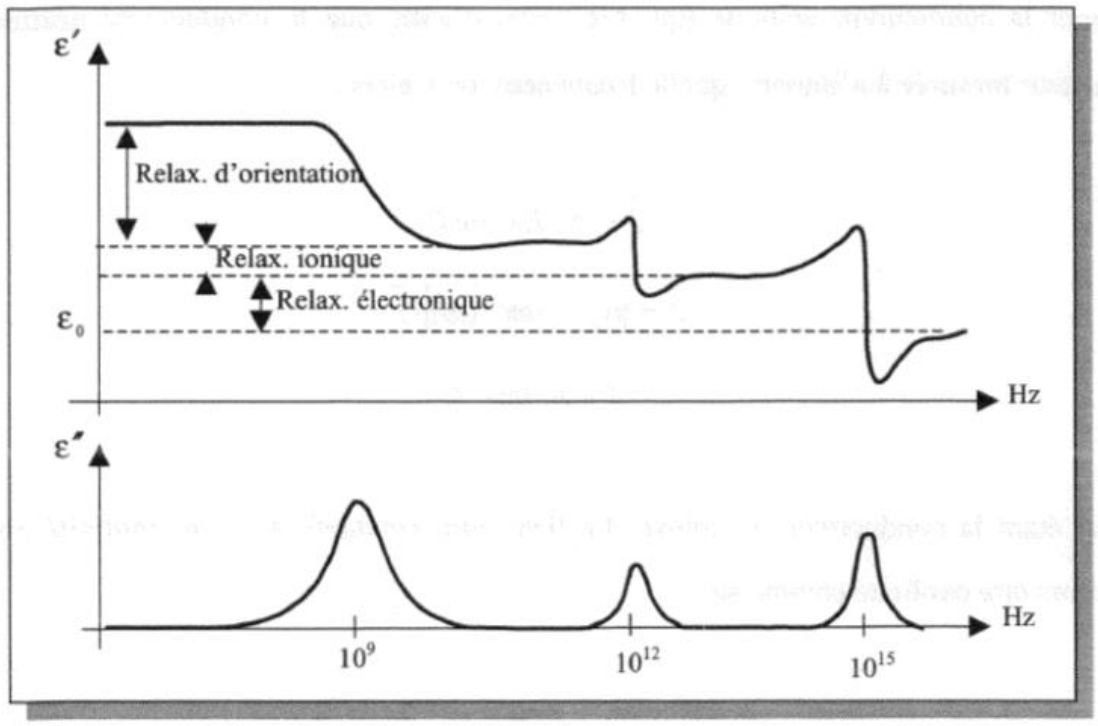


Figure I.6 : Phénomènes de relaxation et mécanismes de polarisation associés (d'après [PER 97])

La permittivité complexe est donc une grandeur dépendante de la fréquence qu'on peut donc écrire $\varepsilon^*(\omega)$.

Conductivité complexe

Jusqu'à présent, les milieux diélectriques considérés ont été supposés parfaitement isolants, les seules pertes énergétiques les affectant étant dues aux phénomènes de relaxation. De nombreux matériaux cependant, dont les tissus biologiques, sont à la fois diélectriques et conducteurs : leur conductivité σ n'est pas nulle.

L'application d'un champ électrique à un tel milieu engendre donc un courant de conduction ainsi qu'un courant de déplacement dans le cas d'un champ variable. Aux pertes diélectriques évoquées précédemment s'ajoutent donc des pertes ohmiques par effet Joule.

Dans le cadre d'un champ électrique harmonique $\vec{E} = E \cdot e^{j\omega t}$, la densité de courant résultante dans le milieu s'exprime par :

$$\vec{j} = \overrightarrow{J_c} + \overrightarrow{J_d}$$

Avec $\overrightarrow{J_c}$ le courant de conduction et $\overrightarrow{J_d}$ le courant de déplacement. En introduisant la notation σ_s pour la conductivité statique (qui n'est rien d'autre que la conductivité normale d'un conducteur mesurée à n'importe quelle fréquence), on a alors :

$$\vec{J} = \sigma_s \vec{E} + j\omega \vec{P}$$
$$\vec{J} = [\sigma_s + j\omega\varepsilon^*(\omega)] \cdot \vec{E}$$
$$\vec{J} = \sigma^*(\omega) \cdot \overrightarrow{E}$$

$\sigma^*(\omega)$ étant la conductivité complexe. Le lien entre conductivité et permittivité complexe peut alors être explicité comme suit :

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_s + j\omega[\varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega)]$$
$$\sigma^*(\omega) = \sigma_s + \omega\varepsilon''(\omega) + j\omega\varepsilon'(\omega)$$
$$\sigma^*(\omega) = \sigma_s + \sigma_d(\omega) + j\omega\varepsilon'(\omega)$$
$$\sigma^*(\omega) = \sigma'(\omega) - j\sigma''(\omega)$$

Le terme $\sigma_d(\omega)$ est appelé conductivité dynamique et permet de regrouper en un terme unique $\sigma'(\omega)$ les pertes ohmiques liées à σ_s et les pertes diélectriques dues à $\varepsilon''(\omega)$. Ce regroupement est possible car l'équation (1) montre que les pertes diélectriques sont en phase avec les pertes ohmiques et se comportent donc comme si un nouveau courant de conduction venait se superposer au courant ohmique « normal » lié à σ_s.

Ainsi, les parties réelles et imaginaires de la conductivité complexe s'écrivent :

- $\sigma'(\omega) = \sigma_s + \omega\varepsilon''(\omega)$ traduisant l'ensemble des pertes dans le milieu (ohmique + diélectrique)
- $\sigma''(\omega) = -\omega\varepsilon'(\omega)$ traduisant la polarisation du matériau, c'est à dire son aptitude à stocker de l'énergie sous forme d'un champ électrique.

La conductivité complexe et la permittivité complexe sont donc liées par la relation :

$$\sigma^*(\omega) = j\omega\varepsilon^*(\omega)$$

ce qui permet d'écrire encore : $\varepsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\frac{\sigma'(\omega)}{\omega}$

Cette dernière relation est plus particulièrement utilisée pour la description des diélectriques à faibles pertes alors que la conductivité complexe est plutôt utilisée lorsque le milieu est bon conducteur.

Impédance

La détermination de la conductivité statique σ_s, de la conductivité dynamique $\sigma_d(\omega)$ et de la permittivité $\epsilon'(\omega)$ suffit à la complète caractérisation diélectrique des matériaux. Cependant, ces grandeurs ne sont pas mesurables directement et sont généralement déduites d'une mesure d'impédance. L'impédance Z^* traduit la relation entre la tension aux bornes d'un circuit et le courant le traversant suivant la relation bien connue (loi d'Ohm à l'échelle macroscopique) :

$$U^* = Z^* \cdot I^*$$

Toutes les grandeurs de cette relation sont complexes, ce qui traduit un éventuel déphasage entre la tension et le courant.

L'impédance est liée à la conductivité et à la permittivité suivant une relation dépendant de la géométrie du champ électrique baignant le milieu. Ainsi, dans le cas d'un milieu cylindrique relié à des électrodes de même diamètre (Figure I.7) et en négligeant tout effet de bord (voir la seconde partie de ce manuscrit) l'impédance (en ohms (Ω)) est donnée par l'équatio :

$$Z^*(\omega) = \frac{h}{\pi \cdot r^2 \cdot \left(\sigma'(\omega) + j\omega\varepsilon'(\omega)\right)}$$

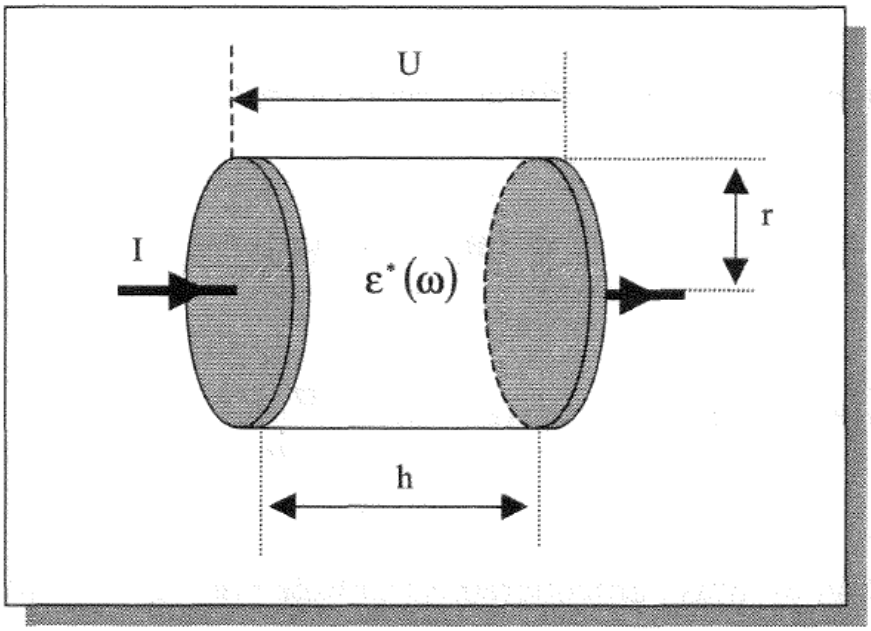


Figure I.7 : Impédance dans le cas d'une géométrie cylindrique

Annexe 5 : comparaison des valeurs limites d'exposition

Le Tableau 35 présente une comparaison des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques proposées ou adoptées par différents organismes, pour les intensités des champs électrique et magnétique, et en densité de puissance.

Tableau 35 : comparaison des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques.

Plage de fréquence (MHz)	Intensité du champ électrique (V/m)				Intensité du champ magnétique (A/m)			Densité de puissance (W/m^2)		
	HCN (2011)	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/f²	2
20 - 30	28	28	823,8/f	$58{,}07f^{0{,}25}$	0,073	823,8/f	$0{,}1540 / f^{0{,}25}$	2	1800/f²	$8{,}944 / f^{0{,}5}$
30 – 48	28	28	27,5	$58{,}07f^{0{,}25}$	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	$0{,}02619f^{0{,}6834}$
400 - 2000	28	$1{,}375f^{1/2}$		$3{,}142\ f^{0{,}3417}$	$0{,}0037f^{1/2}$		$0{,}008335\ f^{0{,}3417}$	f/200	f/200	$0{,}02619f^{0{,}6834}$
2000 - 4000	28	61		$3{,}142\ f^{0{,}3417}$	0,16		$0{,}008335\ f^{0{,}3417}$	10	10	$0{,}02619f^{0{,}6834}$
4000 - 6000	$10{,}53\ f^{0{,}705}$	61		$3{,}142\ f^{0{,}3417}$	0,16		$0{,}008335\ f^{0{,}3417}$	10	10	$0{,}02619f^{0{,}6834}$
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		$4{,}21 \times 10^{-4}\ f^{0{,}5}$	10	(90xf-7000)/200	$6{,}67 \times 10^{-5}\ f$

Annexe 6 : épilepsie

Définition

L'épilepsie est l'une des affections neurologiques les plus fréquentes, qui regroupe en fait plusieurs syndromes. C'est une maladie qui se caractérise par l'apparition de crises épileptiques récurrentes qui interrompent transitoirement la fonction cérébrale (Fisher *et al.,* 2005). La crise épileptique se définit comme l'apparition soudaine de signes et/ou de symptômes dus à une activité neuronale anormale excessive (hyper-excitation) ou une synchronisation de cette activité dans des réseaux de neurones interconnectés. En fonction du type d'épilepsie (focale ou généralisée, voir paragraphe ci-dessous), la décharge se propage plus ou moins dans le cerveau et induit des symptômes caractéristiques et variables selon la localisation cérébrale et l'étendue de la propagation.

Les épilepsies dites partielles ou focales sont la conséquence d'une lésion cérébrale de nature très variable (tumorale, post-hypoxique / ischémique, infectieuse, post-traumatique). Les manifestations cliniques sont donc également très variables et dépendantes notamment de la localisation cérébrale du foyer épileptique (symptômes moteurs variés -tremblements ou raidissement d'un membre-, hallucinations auditives, visuelles, *etc*.). La crise s'accompagne d'une perte de conscience lorsque sont impliquées des régions associatives ou lorsque la crise envahit de nombreux territoires cérébraux.

Les épilepsies dites généralisées, qui ne sont pas d'origine lésionnelle, donnent lieu à des manifestations cliniques symétriques et bilatérales. La crise généralisée appelée encore « Grand mal » est une crise motrice impliquant l'ensemble des muscles et s'accompagne d'une perte de conscience et de symptômes végétatifs. Une autre forme de crises généralisées dite « Petit mal » ou crises d'absences, se manifeste par un arrêt comportemental et peut parfois s'accompagner de myoclonies (ou de secousses musculaires). Parfois, les crises généralisées sont en fait secondaires à une crise partielle.

Incidence, prévalence et caractéristiques de l'épilepsie chez l'enfant[48]

L'incidence moyenne de l'épilepsie dans la population générale se situe entre 20 et 30 pour 100 000 habitants par an et sa prévalence moyenne oscille entre 0,5 et 0,8 % de la population (Forsgren *et al.* 2005). D'après l'OMS, il existerait dans le monde environ 50 millions de patients épileptiques. La prévalence de l'épilepsie sur la durée de la vie, c'est-à-dire le nombre de personnes qui, à l'heure actuelle dans le monde, souffrent d'épilepsie, en ont souffert par le passé ou en souffriront à l'avenir, pourrait s'élever à près de 100 millions de personnes. On considère en France que l'épilepsie affecte entre 325 000 et 520 000 personnes. Cependant, l'incidence spécifique varie considérablement en fonction de l'âge avec des *maxima* aux deux extrêmes des âges de la vie (avant l'âge de 1 an et après l'âge de 75 ans), rendant compte de la fréquence des crises symptomatiques et de la surreprésentation de certaines étiologies (accidents *ante-* ou néonataux, troubles innés du métabolisme chez le nourrisson, accident ischémique cérébral chez le sujet âgé). Ainsi, la courbe d'incidence baisse au cours de l'enfance mais augmente à nouveau chez le sujet âgé (Forsgren *et al.,* 2005). L'incidence moyenne chez l'enfant de moins de 15 ans est en général de 50 à 60 pour 100 000 par an dans les pays développés (Freitag *et al.*, 2001, Christensen *et al.,* 2007) mais peut atteindre 187 pour 100 000 dans les pays en développement (Camfield and Camfield, 2015). La prévalence de cette maladie chez l'enfant (entre 0 et 15 ans) est en général de 0,32-0,6 % mais peut atteindre 4,4 % dans les pays en développement (Camfield and Camfield 2015). Il s'agit essentiellement d'épilepsies focales chez les 6-15 ans,

[48] Ces données ont été fournies par P[r] Stephane Auvin, neuropédiatre et épileptologue à l'Hôpital R Debré, INSERM U 1141, Université Paris Diderot.

alors que les épilepsies généralisées prévalent chez l'enfant entre 0 et 6 ans (Ericksson and Koivikko, 1997 ; Berg *et al.,* 1999).

Spécificités des épilepsies de l'enfant et de l'adolescent

Outre le fait que les enfants sont plus fréquemment concernés que les adultes par l'épilepsie, l'âge de survenue a également un impact sur le pronostic de la maladie. L'âge précoce de survenue de l'épilepsie va ainsi influencer le risque de résistance aux traitements, le risque d'atteinte cognitive, et a également une influence sur les conséquences sociales (Camfield *et al*., 1993, Jalava *et al.,* 1997).

Si l'atteinte cognitive est variable chez les enfants, on notera toutefois que la moitié à deux tiers des enfants présentent des difficultés dans les apprentissages scolaires (Bulteau *et al.,* 2000, Aldenkamp *et al.,* 2005, Soria *et al.,* 2012). L'incidence du retard mental est également augmentée par rapport à la population générale, puisqu'il représente à peu près 10 % des enfants avec épilepsie (Bulteau *et al.,* 2000). L'atteinte cognitive est conditionnée par le syndrome épileptique (Bulteau *et al.,* 2000) et également l'âge de début de la maladie (Cormack *et al*., 2007).

En ce qui concerne les facteurs augmentant le risque d'épilepsie chez l'enfant, ceux-ci incluent des malformations congénitales du système nerveux central, traumatismes crâniens modérés à sévères, infections cérébrales, certaines pathologies métaboliques héréditaires et des facteurs génétiques. Cependant, ces facteurs n'expliqueraient que 25 à 45 % des cas, ce qui conduit au fait que l'étiologie de la plupart des épilepsies de l'enfant reste inconnue (*e.g*., revue de Cowan, 2002).

Études sur l'effet des radiofréquences sur l'épilepsie adulte

Les données scientifiques chez l'Homme comme chez l'animal sont peu nombreuses en ce qui concerne l'impact des radiofréquences sur cette pathologie et elles n'ont concerné que l'adulte. Les rapports Afsset 2009 et Anses 2013 font état de 3 études chez l'animal issues du même groupe (Lopez-Martin *et al.,* 2006 ; 2009 ; Carballo-Quintas *et al.,* 2011) et 3 études chez l'Homme (Maby *et al.,* 2005 ; 2006 ; Vecchio *et al.,* 2012). Les études chez l'animal présentent des faiblesses méthodologiques non négligeables ne permettant pas de conclusion définitive quant-à l'impact d'un signal GSM aigu (2 h) dans un modèle de convulsions induites par la picrotoxine chez le rat (voir rapport Anses 2013). Chez l'homme, l'étude de Vecchio *et al.* (2012) fait suite à 2 études du même groupe chez des sujets sains jeunes et âgés (2007 et 2010) dans lesquelles ces auteurs montrent qu'un signal GSM 900 MHz induit une augmentation de la synchronisation inter-hémisphérique des rythmes alpha au niveau frontal et temporal.

Dans leur article de 2012, ces auteurs testent l'hypothèse que la synchronisation neuronale chez 10 sujets épileptiques (souffrant d'un dysfonctionnement de la synchronisation neuronale) pourrait être affectée de manière plus importante que chez les sujets sains par les radiofréquences. Les résultats montrent effectivement une augmentation de la cohérence inter-hémisphérique des rythmes alpha au niveau frontal et temporal plus élevée chez les patients épileptiques que chez les sujets sains. Cependant, aucun effet sur la survenue des crises ou encore l'EEG interictal (entre les crises) n'a été observé. Cette étude préliminaire qui devra être reproduite, aux dires même des auteurs, pourrait traduire un risque accru de crises épileptiques sous l'influence des signaux GSM.

Excitabilité chez l'individu sain et radiofréquences

Certains auteurs se sont intéressés aux effets d'une exposition aux radiofréquences sur l'excitabilité cérébrale chez des individus sains ou plus généralement sur l'activité électrique cérébrale (EEG, potentiels évoqués…). Même si ces travaux ne concernent pas l'épilepsie, considérant que cette pathologie relève d'une hyper-excitabilité neuronale ou d'une anomalie de la synchronisation entre des populations de neurones, ces études présentent un intérêt évident dans le contexte de cette pathologie.

Ainsi, le précédent rapport publié par l'Afsset en 2009 avait rapporté 2 études concernant l'impact d'une exposition aiguë aux radiofréquences sur l'excitabilité corticale mesurée par STM

(stimulation trans-crânienne magnétique, Ferreri *et al*., 2006 : Inomata-Terada *et al*., 2007). Ferreri *et al*. (2006) ont testé l'excitabilité corticale (mesure des potentiels évoqués moteurs) de chaque hémisphère cérébral avant et après exposition aux radiofréquences générées par un téléphone mobile (GSM 900 MHz) pendant 45 min sur 15 volontaires sains. Ils montrent une modification significative des courbes d'excitabilité avec une baisse de l'inhibition et une augmentation de l'excitation (facilitation) intra-corticale dans l'hémisphère exposé aux radiofréquences, par rapport au côté non exposé ou à l'exposition factice. Par contre, Inomata-Terada *et al*. (2007) ne montrent aucun effet (excitation ou inhibition) au niveau du cortex moteur, du tronc cérébral et de la moelle épinière d'une exposition à un téléphone mobile (800 MHz) pendant 30 min chez 10 volontaires sains.

En 2013, le rapport Anses avait relevé 4 études de qualité ayant porté chacune sur un critère d'évaluation différent :

- la synchronisation inter-hémisphérique des rythmes *alpha* (Vecchio *et al.*, 2010),
- la détection et la caractérisation d'un potentiel évoqué spécifique aux expositions aux radiofréquences (Carrubba *et al.*, 2010) ;
- la puissance du rythme *alpha* (Croft *et al.*, 2010) ;
- les potentiels évoqués par la réalisation de 2 tâches cognitives (Leung *et al.*, 2011).

Vecchio *et al*. (2010) ont retrouvé l'augmentation de cohérence inter-hémisphérique du rythme *alpha*, sous l'effet d'une exposition GSM, qu'ils avaient observée en 2007 chez des sujets jeunes et ont constaté que cette augmentation était la plus marquée chez des sujets âgés. Carrubba *et al*. (2010) ont retrouvé, après exposition à un signal simulant la fréquence de modulation de 217 Hz d'un signal GSM 900 MHz, un potentiel évoqué ayant les mêmes caractéristiques que celui qu'ils avaient observé après exposition à un champ magnétique de 200 µT à 60 Hz (Carrubba *et al.*, 2007). À noter que l'étude de Carrubba *et al.* (2010) a pris uniquement en compte la composante électrique des champs électromagnétiques et qu'un effet a été observé, ainsi que l'ont également montré Volkow *et al.* (2011) sur la consommation cérébrale de glucose (voir rapport Anses 2013).

Ainsi, ces études suggèrent que l'exposition aiguë aux radiofréquences peut avoir un effet sur l'activité électrique du cerveau et trois d'entre elles ont montré un effet âge-dépendant (Vecchio *et al*., 2010 ; Croft *et al.,* 2010 ; Leung *et al.,* 2011). Comme indiqué dans le rapport Anses 2013, il n'est pas possible à l'heure actuelle de dire si cet effet biologique s'inscrit dans les limites des variations physiologiques et s'il peut entraîner un effet sanitaire favorable ou défavorable.

En conclusion, le peu de données scientifiques concernant les effets possibles d'une exposition aux radiofréquences sur l'épilepsie, dont aucune n'a concerné spécifiquement les enfants ou l'animal en développement, ne permet pas de conclure sur les effets des radiofréquences sur l'épilepsie de l'enfant.

Annexe 7 : Effets liés à l'usage problématique du téléphone mobile

Les articles analysés dans cette annexe s'intéressent à « l'usage problématique du téléphone mobile » et non spécifiquement à l'étude des conséquences potentielles de l'exposition aux radiofréquences qu'ils émettent. Elles concernent les adolescents ou préadolescents. Bien qu'elles ne fassent pas directement partie du cadre de la saisine, ces études ont paru importantes au collectif d'experts mobilisé pour cette expertise, qui a décidé de les mentionner dans ce rapport.

Depuis quelques années, plusieurs études réalisées dans divers pays, notamment asiatiques, se sont intéressées aux relations entre l'usage problématique du téléphone mobile par les adolescents (par exemple après leur coucher) et les troubles de la santé mentale. La principale hypothèse investiguée est que l'usage du téléphone mobile après le coucher réduit la durée du sommeil des adolescents ; or, plusieurs études ont montré la relation entre une durée du sommeil raccourcie et les idées suicidaires.

La notion « d'usage problématique » a été proposée dans une étude précédente (Bianchi & Phillips 2005). Ces derniers auteurs ont développé un questionnaire spécifique utilisé dans l'étude de Yen, le questionnaire PCPU-Q (*Problematic Cellular Phone Use Questionnaire*) comprenant 12 items. Les 7 premières questions demandent aux participants s'ils ont eu des symptômes d'usage problématique du téléphone mobile dans l'année passée, et les 5 questions suivantes investiguent les conséquences de l'usage problématique du téléphone sur 5 exemples de la vie courante.

Une étude menée à Taiwan a analysé la relation entre l'usage problématique du téléphone mobile et la dépression de l'adolescent (Yen *et al*. 2009). Il s'agit d'une étude transversale de grande ampleur, réalisée dans des écoles accueillant des préadolescents et adolescents (2 sexes, entre 12 et 19 ans, moyenne d'âge 14,6 ans) ; les écoles ont été tirées au sort. De plus, cette étude est inscrite dans un programme de suivi des adolescents réalisé tous les trois ans. Dix mille cent quatre-vingt-onze adolescents ont participé sur la base du volontariat et de façon anonyme à l'enquête et ont rempli un auto-questionnaire contenant entre autres le questionnaire sur l'usage problématique du téléphone mobile et l'échelle CES-D (*Center for Epidemiologic Studies - Depression Scale*) validée en chinois mandarin, permettant de mesurer la dépression. Les analyses ont fait l'objet d'ajustements sur l'âge, le sexe et la zone d'habitat. Seize pourcents des participants rapportent avoir au moins un symptôme d'impact sur leur fonctionnement social (le symptôme le plus fréquent étant le fait d'avoir de mauvaises relations avec ses amis ou camarades de classe en lien avec l'usage problématique du téléphone mobile). Le fait d'être dépressif (Score CES-D > 28) est lié à l'usage problématique du téléphone mobile (OR = 2 ,57 ;[IC 95% :2,25 - 2,94]), après ajustement (les filles étant significativement plus concernées par un usage problématique du téléphone mobile). Les forces de cette étude sont la puissance statistique et la représentativité de la population sélectionnée. Elle ne permet cependant pas d'établir un lien de causalité entre l'usage du téléphone mobile de manière inconsidérée et la dépression. La prise en compte de facteurs de confusion tels que des facteurs familiaux ou l'usage de substance illicite aurait été informative.

Une deuxième étude portant sur cette même population (11 111 sujets inclus dans l'étude) a analysé la relation entre le fait d'avoir un usage du téléphone mobile qualifié de problématique et divers facteurs comportementaux de prise de risque (Yang *et al*. 2010). Chez les préadolescentes (moins de 15 ans), l'usage problématique du téléphone mobile est associé au fait d'avoir agressé ou avoir été victime d'agression, au fait de porter des tatouages, d'être insomniaque, d'avoir une durée de sommeil courte, d'avoir une mauvaise opinion de soi, de fumer du tabac, de consommer de l'alcool ou des drogues illicites, d'avoir des idées suicidaires et une activité sexuelle non protégée. Chez les préadolescents, les mêmes prises de risque sont observées, à l'exception de la prise de drogue illicite ou d'acte sexuel non protégé ; par contre, l'usage du téléphone mobile problématique est associé à un antécédent de casier judiciaire. Chez les adolescentes de plus de 15 ans, l'usage problématique du téléphone mobile est associé à des facteurs de risque moins

nombreux (perpétration d'agression ou victime d'agression, insomnies, faible estime de soi, usage de tabac, tendances suicidaires, activité sexuelle non protégée) ; chez les adolescents de plus de 15 ans, tous les facteurs à risque sont associés avec le fait d'avoir un usage problématique du téléphone mobile. Les auteurs de cette étude de grande ampleur attirent l'attention sur le fait qu'un usage problématique du téléphone mobile (plus facile à repérer) pourrait être un bon indicateur de l'existence d'autres comportements à risque, ce qui avait déjà été signalé précédemment chez les adultes par Bianchi et Philips (2005).

Entre 2008 et 2009, Oshima *et al.* ont mené une enquête transversale au Japon auprès de 9 400 adolescents (âge moyen : 16,6 ans) et 8 520 préadolescents (moyenne d'âge : 13,7 ans) (Oshima *et al.* 2012). Les auto-questionnaires ont été distribués dans des écoles par le biais des professeurs, et comprenaient des questions de santé mentale (GHQ12 (*General Health Questionary*), idées suicidaires, tentatives de suicide antérieures…), et sur les habitudes (heures de coucher et lever, usage du téléphone mobile, en particulier fréquence des usages après le coucher, usage de drogue et d'alcool). Les questionnaires étaient remplis lors du temps scolaire et remis au professeur dans une enveloppe fermée. Il était précisé au préalable que la participation au questionnaire était basée sur le volontariat et qu'en aucun cas les professeurs ne prenaient connaissance des réponses, les enveloppes anonymes étant immédiatement remises à l'équipe de recherche, interdisant ainsi tout retour d'information. Les tentatives et idées suicidaires étaient codées par deux évaluateurs indépendants avec arbitrage en cas de désaccord. L'agrément de la codification entre les deux évaluateurs a été jugé bon (Kappa : 0,83).

Chez les préadolescents, 7,6 % des garçons et 13,1 % des filles avaient des idées suicidaires (respectivement 1,1 % et 5,6 % avaient déjà fait une tentative de suicide), 9 % des garçons et 19 % des filles disaient utiliser quotidiennement leur téléphone au cours de la nuit. La durée moyenne du sommeil était de 7,4 heures.

Chez les adolescents, 10,7 % des garçons et 15,5 % des filles avaient des idées suicidaires, la durée moyenne de sommeil étant de 6,7 h (23 % des garçons et 37 % des filles disant utiliser quotidiennement leur téléphone en cours de nuit). Après ajustement sur l'âge, le sexe, l'usage de drogue ou d'alcool et la durée du sommeil, il existe une relation significative entre l'usage nocturne quotidien du téléphone mobile et les indicateurs de mauvaise santé mentale dans les deux groupes :

- Préadolescents :
  - $OR_{\text{santé mentale altérée si usage de téléphone mobile la nuit}}$: 1,65 ; [IC 95% : 1,43-1,92]
  - $OR_{\text{idées suicidaires si usage de téléphone mobile la nuit}}$: 1,62 ; [IC 95% : 1,31-1,99]
  - $OR_{\text{tentatives de suicide antérieure si usage de téléphone mobile la nuit}}$: 1,56 ; [IC 95% : 1,12-2,17]
- Adolescents :
  - $OR_{\text{santé mentale altérée si usage de téléphone mobile la nuit}}$: 1,54 ; [IC 95% : 1,38-1,72]
  - $OR_{\text{idées suicidaires si usage de téléphone mobile la nuit}}$: 1,22 ; [IC 95% : 1,04-1,42]
  - $OR_{\text{tentative de suicide antérieure si usage de téléphone mobile la nuit}}$: 1,75 ; [IC 95% :1,33-2,29]

La durée du sommeil dans cette étude n'est pas liée à la dégradation de la santé mentale.

Comme le reconnaissent les auteurs de cette étude, il s'agit d'une étude transversale qui ne permet pas d'explorer les liens de causalité, en particulier en ce qui concerne les tentatives de suicide antérieures et l'usage du téléphone mobile. Cependant, cette étude doit attirer l'attention des parents et médecins sur l'usage du téléphone mobile la nuit, qui pourrait être un indicateur de souffrance mentale chez les adolescents et préadolescents.

Tableau 36 : 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 *(se référer au texte pour les commentaires)*
Yen *et al.,* 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 *et al.*, 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 *et al.* (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 *et al.,* 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.

Ces 3 études de taille importante montrent une association entre un usage intensif et inadéquat du téléphone par des adolescents ou des préadolescents et une santé mentale affectée. Elles investiguent les conséquences de « l'usage problématique du téléphone » et non des radiofréquences qu'il émet. Au vu de ces éléments, une association entre un tel usage du téléphone mobile et l'altération de la santé mentale pourrait exister et mérite d'être approfondie.

Cependant, il s'agit d'études transversales qui ne permettent pas d'explorer la causalité des associations. De plus, l'usage du téléphone peut n'être qu'un indicateur de risque de troubles mentaux et non une cause, c'est-à-dire qu'il est envisageable qu'un adolescent qui a des problèmes téléphone davantage qu'un adolescent qui n'en a pas. Des études longitudinales pourraient permettre de prendre en compte la temporalité des associations ainsi que d'autres facteurs de risques, notamment familiaux ou d'organisation sociale qui pourraient être les éléments pathogènes et des facteurs de confusion de l'association entre l'usage du téléphone mobile et l'altération de la santé mentale.

Notes

Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr
www.anses.fr / @Anses_fr

ISBN 979-10-286-0116-4 - Dépôt légal : juillet 2016 – © Anses Éditions : juillet 2016 – Date de publication : juillet 2016 – Crédit photo : iStock