

LES
CAHIERS
DE LA
RECHERCHE

Santé, Environnement, Travail

Radiofréquences et santé
Comprendre où en est la recherche

MAI 2017

Édition scientifique

anses
agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Connaître, évaluer, protéger



Éditorial

L'impact potentiel des radiofréquences sur la santé est un sujet d'intérêt majeur pour l'Anses. Face au développement rapide des technologies de communication mobile et de leurs usages, l'Anses a conduit plusieurs expertises collectives, réactualisant régulièrement l'état des connaissances depuis 2003. Ainsi, ses travaux couvrent quasiment tous les domaines du spectre électromagnétique, depuis les très basses fréquences jusqu'aux ondes millimétriques.

Suite au « Grenelle des ondes » en 2009, les pouvoirs publics ont décidé de transférer les compétences de la Fondation Santé et Radiofréquences à l'Agence (juillet 2010). L'Anses a alors mis en place un groupe de travail permanent, composé d'une douzaine d'experts scientifiques indépendants, chargés de poursuivre le travail de veille scientifique sur ces nouvelles technologies et d'évaluer des risques éventuels pour la santé et l'environnement.

Par ailleurs, un comité de dialogue « Radiofréquences et santé » a été mis en place en 2011 afin de permettre une interaction avec l'ensemble des parties prenantes : des représentants d'associations, des syndicats de salariés, des industriels et des scientifiques. Ce comité est un lieu d'échanges, de réflexions et d'informations sur les questions d'expertise et de recherche relatives aux effets potentiels des radiofréquences sur la santé.

En matière de recherche, l'Agence mobilise depuis 2011 des financements d'études sur les ondes électromagnétiques dans le cadre du programme national de recherche Environnement-Santé-Travail (PNR EST). Pour mieux prendre en compte les spécificités du domaine, elle a créé en 2013 un programme de recherche spécifique à la thématique « Radiofréquences et santé ». Désormais, cet appel à projets est lancé chaque année.

Ce mécanisme de soutien spécifique à la recherche sur les ondes électromagnétiques, d'apparition assez récente, a déjà pour effet de favoriser l'émergence de nouvelles communautés de recherche, l'apparition de thèmes de recherche plus diversifiés et la création de réseaux impliquant parfois des partenaires très lointains.

Compte tenu de la complexité des questions relatives aux effets des radiofréquences sur la santé, seule une approche pluridisciplinaire est à même de répondre aux défis de l'évaluation des risques sanitaires des innovations technologiques qui se développent sur le marché à une vitesse fulgurante. Ainsi, des biologistes, épidémiologistes, évaluateurs de risques, ingénieurs spécialistes en radiofréquences, en télécommunications, etc. contribuent ensemble à relever ces défis. Cette édition des *Cahiers de la Recherche* est la première à traiter du thème « Radiofréquences et santé ». Elle laisse apparaître le début des retombées du fort investissement des chercheurs dans ce domaine, avec l'émergence de nouvelles idées et les premiers résultats. Elle souligne également un autre point très positif pour une agence comme l'Anses : l'émergence d'une communauté de recherche avec des acteurs confirmés mais aussi, chaque année, de nouveaux entrants qui apportent des techniques et des idées nouvelles.

Dr Roger GENET

Directeur général Anses

Retrouvez les Cahiers de la Recherche sur le site de l'Agence !

The screenshot shows the ANSES website interface. At the top, there is a navigation bar with categories: L'Anses, Expertise et évaluation, Recherche et référence, Veille et vigilances, Europe et international, Recrutement, and Mon compte. Below this, a secondary menu includes Actualités, Nos thématiques, Index A - Z, Avis, rapports, publications (highlighted), Evénements, Appels, consultations, Presse, and Presse. The main header features the ANSES logo and the text 'Anses - Agence de l'alimentation, de la sécurité sanitaire et du travail'. A search bar is located on the right with the text 'Rechercher sur le site' and an 'OK' button. The main content area is titled 'Les cahiers de la recherche' and features a large graphic with the text 'LES CAHIERS DE LA RECHERCHE' and 'Regards sur dix ans de recherche Le PNR EST, de 2006 à 2015'. A text block below the graphic reads: 'Le PNR EST a au cours de ces dix dernières années, qui ont été l'occasion de célébrer son anniversaire, nous avons souligné brièvement l'histoire de ce programme et évoqué les connaissances qu'il a générées. Elles contribuent au corpus sur lequel travaillent les évaluateurs de risque, nationaux ou européens. Parfois véhiculent des messages d'alerte. Le volume des connaissances produites en dix ans est plus que significatif : lorsque les recherches en cours seront achevées, on recensera 700 publications, dont 60% dans les journaux scientifiques les plus cotés, dits de rang A+'. Below this, another text block states: 'Nous espérons que ce numéro spécial des cahiers de la recherche atteindra son objectif, illustrer en 75 exemples, les questionnements qui ont passionné les chercheurs ces dix dernières années et montrer l'impact que peut avoir la recherche sur la santé publique.' At the bottom left, there is a link: '► Consulter notre dernier numéro : Cahier de la recherche n°8 : "Regards sur 10 ans de recherche. Le PNR-EST, de 2006 à 2015" (pdf)'. A navigation menu overlay is visible in the center, listing various document types such as 'Avis, rapports, publications', 'Registre des décisions d'AMM', 'Registre des produits biocides', 'Avis REACH et CLP', 'Fiches de dangers biologiques', 'Fiches d'aide à la rédaction des GBPH', 'Fiches de maladies animales', 'Fiches sur les maladies végétales', 'Bibliothèque des documents médicament vétérinaire', 'Plaquettes de l'Anses', 'Plaquettes de conseils pratiques', 'Magazines et périodiques', 'Avis du comité de déontologie', and 'Lettre d'information'. On the right side of the overlay, there are links to 'Bulletin de veille scientifique', 'Bulletin épidémiologique', and 'Euroreference', with 'Les cahiers de la recherche' highlighted in blue.

<https://www.anses.fr/fr/content/les-cahiers-de-la-recherche>

Avertissement à l'attention des lecteurs



Les fiches de présentation des projets de recherche reflètent les points de vue des équipes scientifiques partenaires et n'engagent ni les Ministères de tutelle ou l'Anses et les partenaires associés. Pour toute question, les contacts sont indiqués à la fin de chaque fiche.



Sommaire

Introduction.....	4
L'exposition des très jeunes enfants aux systèmes de communication sans fil	11
L'exposition aux radiofréquences des enfants.....	14
Le transfert d'énergie à distance.....	16
L'estimation du DAS voie montante : le projet DEVIN.....	18
Un outil de monitoring pour caractériser l'exposition des populations aux radiofréquences	21
Ondes millimétriques et cellules nerveuses.....	23
Effet des signaux GSM 1800 MHz sur le système nerveux central	26
Radiofréquences et mémoire	29
Radiofréquences et problèmes du sommeil chez les enfants	31
Champs électromagnétiques et vulnérabilité cérébrale	33
L'exposition aux radiofréquences considérée comme une astreinte	35
La définition de l'hypersensibilité électromagnétique	37
Téléphones mobiles et santé.....	39
Glossaire.....	41
Mentions légales	43



Introduction

Les technologies de l'information et de la communication connaissent actuellement un essor considérable. Si la radio et la télévision utilisent depuis longtemps les radiofréquences (RF) comme support de transmission, de nouvelles applications sont apparues, comme la téléphonie mobile dans les années 1990. À la fin de l'année 2016, le nombre de cartes SIM en service s'élevait à 73 millions en France métropolitaine¹, c'est à dire un taux de pénétration de 109,8%. Récemment, de nouveaux dispositifs sont apparus : les objets connectés, dont on projette le nombre en France à deux milliards en 2020. Cet essor des systèmes utilisant des radiofréquences s'est accompagné du développement de normes de communications variées (ex. Wifi, Bluetooth).

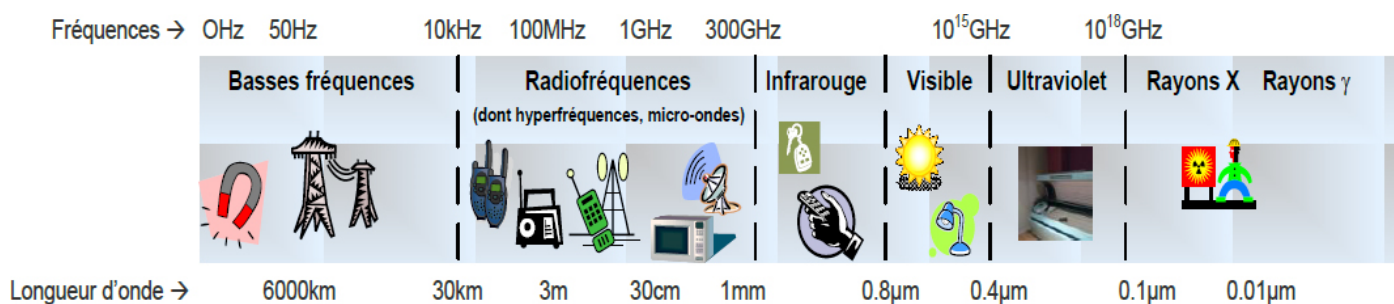
Ces mutations sont accompagnées de perceptions contrastées de la société. D'un côté, la mise sur le marché de nouveaux produits s'accompagne d'une diffusion rapide, et modifie les comportements de consommation et les usages. De l'autre, cette multiplication des objets, des situations d'usages et des types de réseau concourent à l'impression d'un environnement « *baigné en permanence par des ondes électromagnétiques et en particulier par des radiofréquences*² ». Une question qui se pose de façon récurrente est l'effet éventuel de ces ondes sur la santé, avec une ampleur particulière quand il s'agit d'expositions subies comme c'est le cas avec les antennes relais ou les compteurs intelligents.

Définition

Les champs électromagnétiques résultent du couplage d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui oscillent. Ils se propagent et transportent de l'énergie utilisée pour transmettre de l'information. Cette énergie est également susceptible d'être cédée à un milieu qui s'échauffe tandis que l'onde est atténuée. Suivant le cas, on mesure l'intensité des ondes à partir de l'amplitude du champ électrique (en volt par mètre pour les ondes de la téléphonie), du champ magnétique (en micro tesla pour les lignes haute tension) ou de la puissance transportée (en watt par mètre carré pour les hautes fréquences).

La fréquence de l'onde correspond au nombre d'oscillations des champs par seconde (exprimée en hertz ou Hz³). On distingue généralement les basses fréquences (de 0 à 10 kHz environ), les radiofréquences (de 10 kHz à 300 GHz) et les rayonnements ayant une fréquence plus élevée (ex. infrarouges, rayonnements ultraviolets, rayons X).

Spectre électromagnétique



¹ Arcep, *Le marché des services mobiles au 4^{ème} trimestre 2016*, <http://www.arcep.fr/index.php?id=13486>

² ORS Ile-de-France, *Radiofréquences, santé et société*, déc. 2009

³ Les multiples se notent : kHz (kilohertz, 10³), MHz (mégahertz, 10⁶) ou GHz (gigahertz, 10⁹).

Pour illustrer cette coexistence, il suffit de consulter deux publications du Credoc qui datent de 2015. La première est le « *Baromètre de la perception des risques sanitaires* »⁴ qui analyse les résultats d'un sondage pratiqué auprès de 2.000 personnes sur quatorze produits et milieux. Il apparaît que si on classe les différents items en fonction du pourcentage de la population qui les juge « *sûrs* » ou « *assez sûrs* », les antennes de téléphonie mobile et les téléphones portables arrivent en avant dernière position, juste devant les nanomatériaux. L'autre publication est le « *Baromètre du numérique* »⁵ qui met en avant la forte pénétration des téléphones mobiles dans la population depuis les années 2000.

La question des effets éventuels des ondes sur la santé humaine peut prendre des formes multiples. Elle a d'abord porté sur les effets des lignes à haute tension puis, avec le développement de la téléphonie cellulaire sur les antennes-relais ou l'usage des téléphones. La généralisation des réseaux comme le wifi a ensuite suscité des interrogations sur ce nouveau type de rayonnement électromagnétique. En parallèle, l'usage des technologies de l'information a beaucoup évolué, ce qui a suscité de nouvelles questions comme l'effet de nouveaux usages (par exemple les compteurs dits « intelligents » et plus généralement les objets connectés), l'exposition des enfants et l'hypersensibilité aux ondes électromagnétiques.



Anses, Avis et rapports d'expertise collective : *Radiofréquences et santé* (2013), *Exposition aux radiofréquences et santé des enfants* (2016), *Compatibilité électromagnétique des dispositifs médicaux exposés à des sources radiofréquences* (2016)

Le financement de la recherche

Pour répondre aux questions soulevées par les usages des radiofréquences, des dispositions ont été introduites notamment dans les articles 183 et 184 de la loi dite « *Grenelle 2* » du 12 juillet 2010⁶. D'autre part, l'article 158 de la loi de finance 2011 du 29 décembre 2010 a institué « *une contribution additionnelle à l'imposition forfaitaire sur les entreprises de réseaux applicable aux stations radioélectriques* », dont deux millions d'euros sont affectés à l'Anses chaque année pour financer des recherches sur le thème « *Radiofréquences et santé* ». C'est ainsi que, depuis 2011, l'Anses consacre, dans le cadre du Programme national de recherche en santé environnement – travail (PNR EST), des financements aux travaux de recherche sur la thématique « *Radiofréquences et santé* » dans le but de rapprocher recherche et expertise, mais aussi

⁴ http://www.credoc.fr/pdf/Sou/Note_de_synthese_N17_Barometre_perception_risques%20sanitaires_2015.pdf

⁵ www.economie.gouv.fr/files/files/.../2015_11_27_barometre-numerique-2015.pdf

⁶ Loi No 2010-788 portant engagement national pour l'environnement.

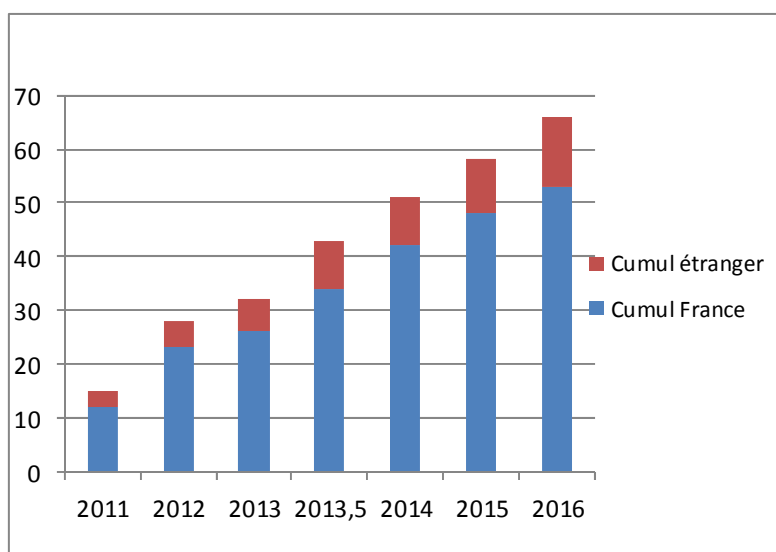
d'élargir la communauté des chercheurs impliqués sur ces sujets. Depuis 2013, cette thématique a été isolée dans un appel à projets spécifique, intitulé « *Radiofréquences et santé* » avec un financement dédié.

De 2011 à 2016, 45 projets ont été retenus, pour un montant d'aide d'environ 9,1 M€, soit une aide moyenne de 200 k€ par projet de recherche. Ces travaux ont impliqué 133 équipes de recherche dont 66 distinctes. Le tableau ci-dessous montre la répartition des partenaires par catégories. On peut distinguer trois grandes familles d'acteurs : les établissements de recherche et d'enseignement supérieur (49%), les établissements du secteur santé (12%), des organismes plus techniques (23%) et des écoles d'ingénieurs (7%). Une moitié est composée de laboratoires d'établissements de recherche (30%).

Catégorie	Nombre	Pourcentage
CNRS, Inserm, universités	65	49%
Santé (AP-HP, CHU, Pasteur, CIRC, CLB, INRS...)	16	12%
Organisme finalisé (CEA, Ineris, CSTB, Ifsttar...)	30	23%
École ingénieurs	9	7%
Industrie	7	5%
Divers	6	4%
	133	100%

Répartition des 133 partenaires impliqués dans les 45 projets financés de 2011 à 2016

Il est à noter que le cercle des équipes impliquées s'accroît régulièrement et, en 2016, la liste des équipes distinctes comporte 67 membres. Les deux tiers apparaissent dans un seul projet. Un tiers apparaît plus d'une fois, soit ils resoumettent de nouveaux projets, soit il s'agit d'acteurs spécialisés dans le domaine des radiofréquences, disposant de savoir-faire et d'infrastructures.



Nombre d'acteurs distincts présents chaque année dans la base des bénéficiaires du PNR EST (APR radiofréquences) depuis 2011



Les thématiques de recherche

Les questions sur lesquelles les équipes de recherche sont sollicitées s'inspirent fortement des lacunes de connaissances relevées dans les travaux d'évaluation des risques. On peut les classer en trois grandes catégories : la caractérisation des expositions, l'étude des effets sanitaires et de l'hypersensibilité électromagnétique.

○ **La caractérisation des expositions**

Un tiers des 45 projets financés par le PNR EST entre 2011 et 2016 traite des expositions. Connaître l'exposition aux ondes répond à des objectifs multiples. Tout d'abord, il s'agit de prévoir si une infrastructure ou un dispositif pourrait conduire à des expositions de la population hors valeurs limites. Autre application : les études épidémiologiques. C'est un volet important des recherches sur les effets des ondes sur la santé, qui cherche à associer l'apparition de tels effets chez l'Homme à un historique des expositions⁷.

Par ailleurs, la caractérisation des expositions nécessite une attention particulière, dans la mesure où elle présente certaines spécificités. En particulier, l'amplitude des champs électromagnétiques peut rapidement varier dans le temps et dans l'espace et on ne peut faire de mesure *a posteriori* de l'exposition, en l'absence de biomarqueurs d'exposition.

L'exposition aux radiofréquences peut être décrite selon deux composantes.

La première est celle due aux champs ambiants, tels que ceux émis par les antennes ou les bornes wifi. La connaître demande la mise en place de techniques particulières. En effet, les champs varient rapidement dans l'espace et dans le temps. Ils sont notamment sensibles à la géométrie environnante (par exemple la présence de bâtiments, l'orientation exacte des antennes) et à l'utilisation qui est faite du réseau. On fait appel à des méthodes combinant des simulations de la propagation des ondes, des analyses statistiques et des mesures. Dans ce numéro des *Cahiers de la recherche* est présenté par exemple, le projet VigiExpo⁸ dans lequel on explore une autre piste qui fait appel à une démarche participative à partir d'un ensemble de smartphones utilisés pour mesurer le champ et transmettre les données.

La seconde contribution à l'exposition est celle due à l'usage de dispositifs tels que des téléphones, des tablettes ou des objets connectés. Dans ce cas, on ne considère pas le champ électrique mais la puissance absorbée par le corps, qui se mesure en watt par kilogramme. Cette exposition dépend considérablement de l'usage qui est fait du terminal (ex. voix, haut-parleur, SMS, téléchargement de données) et de la position de la source RF relative au corps. Les mêmes considérations sont valables dans le cas de l'exposition d'un travailleur à une machine émettant des champs (ex. certaines machines à souder). Tout ceci fait que cette contribution à l'exposition est tout aussi délicate à estimer. Trois projets sont présentés qui traitent de cette question.

Ainsi, l'un des projets ⁹ vise, par exemple, à proposer des outils de quantification de cette exposition ; il s'agit de la mise au point d'un dispositif peu encombrant qui mesure la puissance émise par le terminal, voire sa position par rapport au corps. Le deuxième traite du cas particulier de l'exposition des enfants. Ceux-ci peuvent être plus exposés que les adultes en raison de leurs spécificités anatomiques (ex. petite taille) et morphologiques (ex. caractéristiques de certains de leurs tissus). Le troisième projet traite d'une technologie émergente, le transfert d'énergie sans fil (ou *Wireless Power Transfer*)¹⁰ qui pourraient, dans un avenir proche, remplacer les fils d'alimentation de divers appareils électriques (ex. télévision sans fil) de manière à favoriser une « *mobilité totale* ». Caractériser ainsi les expositions induites par ces futurs systèmes WPT, comme le propose le projet Expo-WPT¹¹, est un enjeu essentiel sur le plan sociétal et sanitaire.

⁷ Un exemple est le projet RFExpo-Elfe porté par Ghislaine Bouvier (2012-160 RF) *Exposition aux radiofréquences des enfants de la cohorte ELFE*.

⁸ François Gaudaire (2015-2-RF-05), *Système autonome de caractérisation de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences issus des stations de base de téléphonie mobile, hybridant acquisition collaborative sur Smartphones et simulation numérique*, pp. 21-22

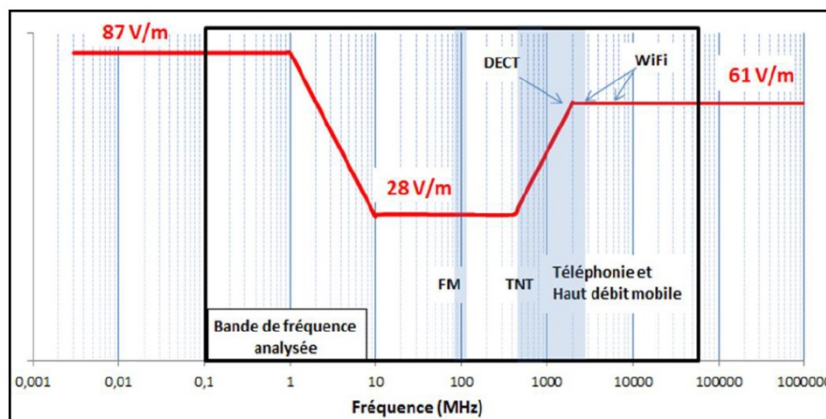
⁹ Serge Bories (2014-RF-26), *Dispositif portable de mesure de l'exposition EM d'une source proche en voie montante*, pp. 18-20

¹⁰ Déjà utilisés pour de petits appareils nomades comme des smartphones ou les brosses à dents électriques.

¹¹ Maxim Zhadobov (2013-RF-05), *Caractérisation des expositions induites par les futurs systèmes de transfert d'énergie sans fil*, pp. 16-17.

Les valeurs limites de champs

Des valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques ont été définies dans le cadre de la directive européenne 1999/519/CE ; elles sont révisées périodiquement, si nécessaire. Ces valeurs (ou niveaux de référence), exprimées en V/m, correspondent à l'intensité du champ électrique en un point donné ; elles sont comprises entre 28 V/m et 87 V/m selon les fréquences.



Valeurs limites réglementaires fixées en France

En France, la campagne nationale de mesures de champs électromagnétiques, pour l'année 2015, montre des niveaux d'exposition globalement faibles par rapport aux valeurs limites réglementaires. 90 % des niveaux d'exposition mesurés étaient inférieurs à 1,5 V/m en milieu urbain et 0,86 V/m en milieu rural. Néanmoins, il existe des « points chauds » où les champs sont plus élevés.

o Les effets sanitaires

La recherche d'effets biologiques des ondes et d'un éventuel impact sur la santé a suscité un important effort de recherche depuis les années 2000. Des études de différents types se sont succédées pour évaluer les risques sanitaires.

- o Tout d'abord, les études épidémiologiques qui suivent une population parfois importante et recherchent des associations entre des pathologies et l'utilisation de téléphone. On peut citer l'étude « *Interphone* » dont les conclusions ont été publiées en mai 2010¹². Même si les résultats de cette étude ne mettent pas en évidence d'augmentation du risque liée à l'utilisation du téléphone portable, des inquiétudes persistent notamment car les données ont été collectées à une période où l'utilisation du téléphone portable était moins intense qu'aujourd'hui. De plus, certaines publications évoquent néanmoins une possible augmentation du risque de tumeur cérébrale, sur le long terme, pour les utilisateurs intensifs de téléphones portables.
- o Des études *in vivo* ou *in vitro* qui tentent de mesurer les effets d'une exposition sur un modèle animal ou diverses cultures cellulaires issues de différents organes.

De manière générale, les évaluations de risques qui s'appuient sur ces travaux ne concluent pas à un risque associé aux ondes électromagnétiques, mais ne peuvent conclure quant à l'absence d'un risque. Elles notent également diverses lacunes dans les connaissances¹³ qui sont reprises dans les textes des appels à projets.

¹² Coordonnée par Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC), cette étude concernait 13 pays : Allemagne, Australie, Canada, Danemark, Finlande, France, Israël, Japon, Norvège, Nouvelle-Zélande, Royaume-Uni et Suède.

¹³ Anses, *Radiofréquences et santé*, mise à jour de l'expertise, octobre 2013.

Le CIRC

Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé en 2011 les champs électromagnétiques de radiofréquences dans le groupe 2B comme pouvant être cancérigènes pour l'homme, sur la base d'un risque accru de gliome, associé à l'utilisation du téléphone sans fil. Cette classification a marqué un tournant dans l'évaluation des risques sur ce sujet. Comme l'a souligné Christopher Wild (Directeur du CIRC) : « *Etant donné les implications de cette classification et de ces résultats pour la santé publique, il est crucial que des recherches supplémentaires soient menées sur l'utilisation intensive à long terme des téléphones portables* ».

Analyser les effets des ondes sur la santé présente des difficultés auxquelles se heurte tout chercheur face aux enjeux du traitement de l'incertitude inhérent à de nombreuses études et aux méthodes d'estimation des niveaux de preuve. L'expertise requiert, du fait de la complexité des questions soulevées, qu'il s'agisse d'études *in vitro*, *in vivo* ou épidémiologiques, des savoirs en matière d'ingénierie et de métrologie, et des compétences multiples en biologie, épidémiologie, évaluation quantitative des risques, ingénierie, physique, etc.

Un ensemble de 24 projets parmi les 45 projets financés par le PNR EST traite des effets (dont 4 à travers la thématique de l'hypersensibilité)¹⁴. Ils utilisent des techniques épidémiologiques (3,5 projets), *in vivo* (8 projets), *in vitro* (9,5 projets), des tests sur des volontaires (2 projets), instrumentation (1 projet). Il faut ajouter à ces projets, le financement de la participation française à l'étude « Cosmos »¹⁵ portée par le CIRC. Il est intéressant de noter que beaucoup de projets portent sur le système nerveux central à travers des sujets très variés.

- ***L'hypersensibilité électromagnétique***

À partir de 2013, un appel à projet spécifique a été lancé sur la base des nouvelles interrogations qui émergeaient suite à la mise à jour de l'expertise collective de l'Anses (2013) – notamment en ce qui concerne l'hypersensibilité électromagnétique. Parmi les difficultés soulevées, l'hypersensibilité électromagnétique reste encore mal définie, en raison de la diversité des symptômes associés (ex. maux de tête, stress, troubles du sommeil) et de leur caractère atypique. D'où la nécessité de réaliser des études pour tenter de mieux comprendre les mécanismes potentiellement impliqués. Huit projets ont été sélectionnés.

Quatre investiguent des pistes de mécanismes biologiques (système nerveux, mécanismes cellulaire, homéostasie énergétique), deux mettent au point de l'instrumentation et deux sont des études qui visent à mieux caractériser la population des hypersensibles. Il faut noter que d'autres projets sur les effets, présentés dans cette édition des *Cahiers*, peuvent, implicitement, avoir une déclinaison hypersensibilité, notamment ceux qui traitent du système nerveux central.

¹⁴ Cf. tableau p. 10

¹⁵ Suivi de 290.000 adultes envisagé sur 25 ans (Danemark, Finlande, France, Suède, Pays-Bas et Royaume-Uni). Site internet : <http://www.thecosmosproject.org/>

Effet recherché	Projets valorisés dans les Cahiers	
Système immunitaire	0,5	
Homéostasie énergétique	1	EVIREF, Réponses physiologiques d'adaptation ou d'évitement du rat juvénile exposé aux ondes radiofréquences type antenne relais ¹⁶
Peau (kératinocytes, cellules nerveuses)	4,5	OM CELL, L'impact potentiel des ondes millimétriques sur les cellules nerveuses ¹⁷
Cellule en général (perturbation, paroi, stress oxydatif, génotoxicité)	5	ReCEM, Réponses Cellulaires aux Expositions Millimétriques (2010-124) ¹⁸
Système nerveux central Tumeur	3	MOBI-KIDS, Technologies de communication, environnement et tumeurs cérébrales chez les jeunes ¹⁹
Système nerveux (perception, sommeil, mémoire, instrumentation, effet de l'inflammation neurotransmission, neurogénèse)	8	ELFES, Lien entre radiofréquence, sommeil et cognition chez l'enfant ²⁰
		EPIRADIOMEM, Effets des radiofréquences de la téléphonie mobile (4G) sur l'apprentissage et la mémoire ²¹
		INFLAREF, Effet des ondes sur des systèmes nerveux en état de vulnérabilité ²²
		MICROG 1800, Effet des radiofréquences sur les cellules microgliales ²³
Système nerveux sympathique Système endocrinien	1	SENSI-RF, Intolérance Environnementale Idiopathique avec attribution aux champs électromagnétiques (IEI-CEM) : Etude des systèmes endocrinien, nerveux sympathique et immunitaire ²⁴
Système reproducteur mâle et femelle	1	
Total	24	

Effets biologiques traités dans les projets financés de 2011 à 2016

¹⁶ Véronique Bach (2013-RF-09), *L'exposition aux radiofréquences considérée comme une astreinte*, pp. 35-36.

¹⁷ Yves Le Dréan (2012-61), *Ondes millimétriques et cellules nerveuses*, pp. 23-25.

¹⁸ Yves Le Dréan (2010-124), *Réponses cellulaires aux expositions millimétriques*, in Cahiers de la Recherche No 8, p. 88 (nov. 2016).

¹⁹ Brigitte Lacour (2013-RF-07), *Technologies de communication, environnement et tumeurs cérébrales chez les jeunes*, in Cahiers de la Recherche No 8 pp. 30-31 (nov. 2016) et No 5 pp. 38-40 (nov. 2014).

²⁰ Monica Guxens (2016-2-RF-21) *Étude Longitudinale à radioFréquences Et problèmes du Sommeil chez les enfants*, pp. 31-32.

²¹ Anne Pereira de Vasconcelos (2014-RF-17), *Sensibilité du cerveau aux ondes électromagnétiques (4G) à différents âges chez le Rat : persistance d'un souvenir et mécanismes épigénétiques associés*, pp. 29-30.

²² Anne-Sophie Villégier (2012-21 RF), *Effet des champs électromagnétiques GSM sur des modèles de vulnérabilité cérébrale : développement et neuro-inflammation*, pp. 33-34.

²³ Michel Mallat (2013-2-03), *Effet des signaux GSM 1800 MHz sur le système nerveux central*, pp. 26-28.

²⁴ Brahim Selmaoui (2013-RF-02), *L'intolérance environnementale idiopathique (IEI-CEM)*, Cahiers de la Recherche No 8, p. 91 (nov. 2016).

L'exposition des très jeunes enfants aux systèmes de communication sans fil

Analyse et caractérisation de l'exposition des très jeunes enfants aux systèmes de communication sans fil
LTE

Joe WIART

Mots-clés : mesure, exposition, enfant, modélisation, dosimétrie, radiofréquence, rayonnement électromagnétique, téléphone mobile, absorption onde, modèle anatomique

Dans le monde, le nombre d'abonnés au téléphone mobile dépassait les 7 milliards à la fin 2015²⁵, pour atteindre un taux de pénétration de 97%, tandis qu'en France, le nombre de cartes Sim en service s'élevait à plus de 72 millions²⁶ soit un taux de pénétration de 109%. Ces chiffres reflètent la place centrale des moyens de communication sans fil dans l'activité humaine, moyens qui font l'objet d'innovations permanentes comme la Femtocell²⁷ et des réseaux LTE (connus sous l'appellation « 4G »).

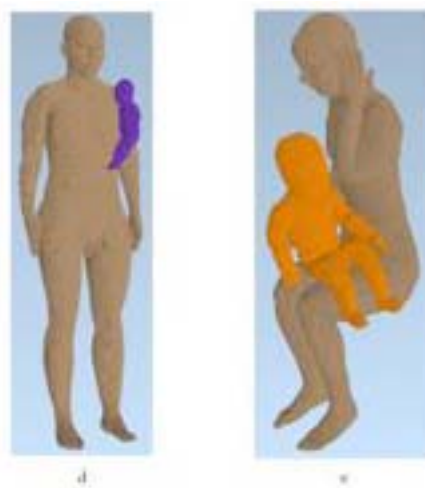
Ces évolutions modifient aussi les usages qui sont faits des terminaux : donc, les expositions associées aux ondes électromagnétiques. Les très jeunes enfants (entre quelques mois et trois ans), sans être toujours directement utilisateurs, sont aujourd'hui placés dans des configurations où ils sont exposés aux ondes radiofréquences : par exemple, dans les bras des parents lorsque ceux-ci téléphonent. Aussi les questions relatives aux interactions des ondes avec la personne et, en particulier, avec les enfants constituent un axe de recherche prioritaire.

Les configurations d'exposition

Les spécificités de la morphologie et des tissus des très jeunes enfants ainsi que la proximité et la multiplicité des sources d'exposition nécessitent de développer des nouveaux modèles et d'adapter les outils pour évaluer leur exposition.

Afin d'analyser l'influence des postures sur l'exposition, six situations réalistes ont été identifiées, incluant des configurations dites « actives »²⁸ d'exposition et des configurations « passives »²⁹ :

- L'enfant seul assis utilisant une tablette ;
- L'enfant seul couché utilisant une tablette ;
- L'enfant assis utilisant un mobile en mode voix ;
- L'enfant assis utilisant un mobile en mode « data » ;
- L'enfant dans les bras de sa mère en train d'utiliser une tablette ;
- L'enfant dans les bras de sa mère en train d'utiliser un mobile en mode voix.



Exemples de configurations d'exposition

France Télécom Orange Labs, Whist Lab, Issy-les-Moulineaux

²⁵ Selon l'International Telecommunication Union (ITU).

²⁶ Selon l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes (Arcep).

²⁷ Dans ou à côté des « box » des abonnés à l'internet.

²⁸ « Actives » pour l'utilisation d'un mobile.

²⁹ « Passives » pour l'utilisation d'un mobile par une personne proche.

Le projet de recherche : ACTe

Pour caractériser l'exposition des enfants aux ondes émises par les nouveaux systèmes de communication sans fil, il est nécessaire de disposer de représentations numériques incluant la source d'ondes électromagnétiques dans les configurations retenues et de modèles du corps de l'enfant incluant les propriétés diélectriques des tissus.

Or, au début de ce projet, il n'existait quasiment pas de modèle anatomique de très jeunes enfants utilisable en dosimétrie radiofréquence. De nouveaux modèles numériques d'enfants ont été construits à partir d'images 3D obtenues par résonance magnétique (IRM). D'autre part, en raison de la faible quantité des données sur la propagation des ondes dans le corps de l'enfant, une première étude a été portée sur les variations des propriétés diélectriques (isolantes) des principaux tissus (ex. peau, graisse, muscle, cerveau) avec l'âge.

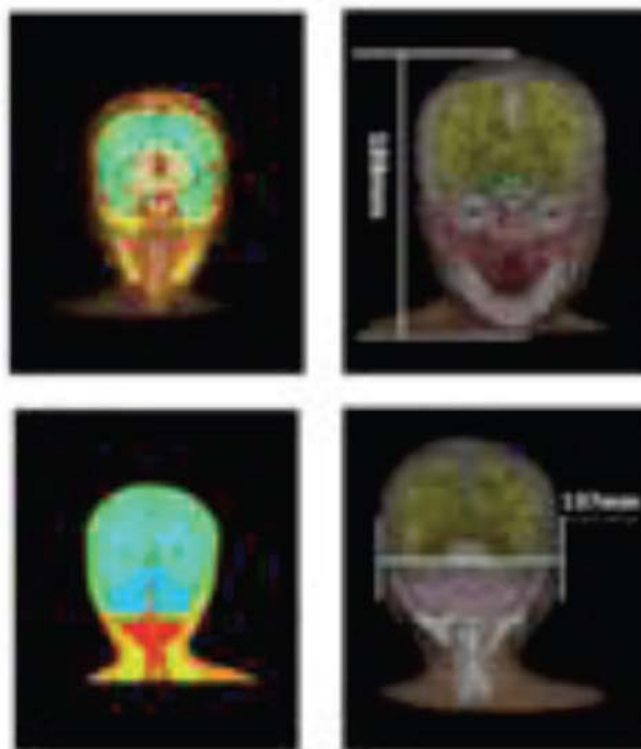
“ *Ce projet a permis de grand progrès dans la mise au point de modèles numériques d'enfants utilisables en dosimétrie radiofréquences.* ”

À partir de ces données, le débit d'absorption spécifique (DAS) a été calculé pour le modèle de bébé (corps entier et local) en utilisant d'une part, les propriétés diélectriques spécifiques aux tissus du bébé. D'autre part, le modèle a été aussi utilisé « dans une géométrie enfant » mais avec des propriétés diélectriques adultes, afin de pouvoir mettre en exergue l'importance de la réponse des tissus aux ondes.

Pour les configurations « passives » d'exposition, l'exposition du modèle adulte a été comparée à celle du très jeune enfant.

Résultats

Ce projet a permis de grands progrès dans la mise au point de modèles numériques pour calculer l'exposition d'enfants aux ondes électromagnétiques. Ceux-ci sont à la disposition de la communauté scientifique. Présentés et discutés dans de nombreuses conférences scientifiques, ils ont aussi donné lieu à des publications dans des revues scientifiques à comité de lecture (Li et al, 2015, Dahdouh et al 2016).



Modèle numérique (tête enfant mâle, 17 mois)

Les modèles ont ensuite été appliqués au calcul d'expositions. Dans le cas d'une onde plane, les résultats obtenus montrent que, pour un champ électromagnétique incident équivalent, le WBSAR³⁰ (débit d'absorption spécifique du corps entier) des très jeunes enfants est supérieur à celui des adultes. Ces résultats sont cohérents avec ceux disponibles dans la littérature scientifique. Vis-à-vis de l'exposition du cerveau, les travaux montrent que, suivant les bandes de fréquences, l'utilisation des propriétés diélectriques des tissus adultes (à la place

³⁰ De l'anglais, "Whole Body averaged Specific Absorption Rate".

de celles relatives aux tissus d'enfants) peut entraîner une sous-estimation de l'exposition : d'où l'importance d'utiliser les bonnes valeurs de référence.

Dans le cas de l'exposition proche, les usages qu'on peut faire d'un terminal sont divers et sa position peut varier. Si les variations de position du téléphone ou de la tablette ont un impact limité (coefficient de variation de l'ordre de 5%) sur l'exposition « corps entier », l'impact de ces variations est plus important localement. Dans le cas du crâne, par exemple, le coefficient de variation peut atteindre 36%.

Publications issues de ce projet

Li C, Chen Z, Yang L, Lv B, Liu J, Varsier N, et al. , A. Hadjem, J. Wiart, Y. Xie, L. Ma, and T.Wu Generation of infant anatomical models for evaluating electromagnetic field exposures. *Bioelectromagnetics*. 2015;36(1):10-26. 10.1002/bem.21868

S. Dahdouh, N. Varsier, M. A. Nunez Ochoa, J.Wiart, A. Peyman, I. Bloch, *Infants and young children modeling method for numerical dosimetry studies: application to plane wave exposure. Phys Med Biol* 61(4):1500-14, 2016

Les partenaires :

Joe Wiart

France Télécom Orange Labs, Whist Lab, Issy-les-Moulineaux

Isabelle Bloch

Télécom Paris tech, CNRS LTCl, Paris

Christian Person

Télécom Bretagne, Brest

Azadeh Peyman

Health Protection Agency, Centre for radiation, Chemical and Environmental Hazards, Didcot

Tongning Wu

China Academy of Telecommunication Research EMC lab, Beijing

Durée : 42 mois

Financement : 322 k€

Contact : joe.wiart@telecom-paristech.fr

L'exposition aux radiofréquences des enfants

Exposition aux radiofréquences des enfants de la cohorte Elfe

Ghislaine BOUVIER

Mots-clés : exposition, enfant, radiofréquence, champ électromagnétique, téléphone mobile, cohorte, Aquitaine, Ile de France, matrice emploi exposition, codage, emploi, parent, grossesse, maternité

Ces dernières décennies, les effets des radiofréquences (surtout celles émises par le téléphone mobile) ont été beaucoup étudiés au niveau de la population générale. Les radiofréquences sont classées, à ce jour, comme carcinogènes possibles par le CIRC (groupe 2B) en raison de données limitées concernant le risque de gliome et de neurinome de l'acoustique chez les utilisateurs de téléphones portables.

Cependant, les expositions aux radiofréquences des enfants restent encore mal connues. De même, le rôle des expositions prénatales aux radiofréquences sur le développement psychomoteur et les troubles du comportement est actuellement débattu.

Les sources de radiofréquences

Depuis de nombreuses années, les champs électromagnétiques sont largement présents dans notre environnement. Les premières sources artificielles ont été les émetteurs pour la radio et la télévision. Aujourd'hui, les sources de radiofréquences sont nombreuses : téléphonie mobile, téléphones DECT³¹, baby phone, plaques de cuisson à induction, fours micro-ondes, Wifi. Elles sont souvent de plus faible intensité, mais à proximité immédiate des utilisateurs et notamment des enfants.

En France, des études d'exposition aux radiofréquences toutes sources confondues ont été menées, en population générale, avec des mesures par des exposimètres individuels portés durant 24h. Elles ont montré que l'exposition était surtout due

aux émissions radio FM, téléphones DECT, fours micro-ondes et Wifi et ont souligné l'importance de nombreux paramètres (ex. milieu urbain ou rural, ancienneté du bâti, étage du domicile, jour de la semaine). Cependant, les études sur l'exposition des enfants sont encore rares, probablement à cause de la difficulté à les équiper d'appareils individuels de mesure (poids, fragilité...).

“ Les études sur l'exposition des enfants sont encore rares, probablement à cause de la difficulté à les équiper d'appareils individuels de mesure. ”

Le projet de recherche : RFExpo-Elfe

Le projet vise à caractériser l'exposition aux radiofréquences des enfants de la cohorte de naissance ELFE (Etude Longitudinale Française depuis l'Enfance)³². Initiée en France métropolitaine depuis avril 2011, cette étude longitudinale permet notamment d'observer l'évolution de l'exposition des enfants à des agents chimiques, physiques et microbiologiques. Ce suivi va de la gestation, où l'exposition est liée à celle de la mère, à la petite enfance, où l'exposition est majoritairement résidentielle, puis lorsque l'enfant grandit, s'ajoutent de nouvelles expositions à l'école et dans les transports, puis celle liée à l'utilisation du téléphone portable et des nouvelles technologies.

Équipe EPICENE, UMR 1219, Institut de Santé Publique, d'Épidémiologie et de Développement (ISPED), Inserm, Université de Bordeaux

³¹ De l'anglais, "Digital Enhanced Cordless Telecommunications" (téléphone sans fil).

³² Site internet : <http://www.elfe-france.fr/>

Méthodologie

Les informations sur les sources d'exposition aux champs électromagnétiques sont principalement obtenues grâce aux questionnaires recueillis lors des premières étapes du suivi.

Les emplois et les tâches effectués par la mère, renseignés lors du questionnaire à la naissance de l'enfant, permettent d'estimer l'exposition maternelle professionnelle aux radiofréquences durant la grossesse. L'équipe EPICENE a pris en charge le nettoyage des données de la cohorte Elfe et le codage des professions et secteurs d'activité pour l'ensemble des mères de la cohorte (nomenclatures française et internationale).

Une collaboration a été initiée avec l'équipe du CREAL de Barcelone (Elisabeth Cardis) afin de mettre au point une matrice emploi-exposition Radiofréquences qui sera mise à disposition des chercheurs voulant travailler sur ce sujet. La matrice répondra en effet à un besoin identifié d'outil d'estimation des expositions professionnelles aux radiofréquences dans des études épidémiologiques en population générale et les trois équipes joignent leurs efforts sur ce projet.

L'exposition environnementale (résidentielle) de l'enfant est estimée grâce aux questions posées à 2 mois, puis à 2 ans.

Une question importante est la comparaison des expositions aux ondes déduites des questionnaires avec les expositions réelles. Pour cela, quatre cents enfants vont participer, sur les années 2017-2018, à une campagne de mesures. Durant 24 heures, l'exposition à différentes bandes de radiofréquences sera mesurée grâce à un exposimètre EME SPY 200 (laboratoire SATIMO) permettant de prendre en compte les nouvelles sources d'exposition (dont la 4G). Cette campagne se fera en lien avec une analyse du budget espace-temps³³ pour identifier les micro-environnements/activités durant la période de mesures.

Résultats attendus

En confrontant les résultats de ces mesures aux informations obtenues grâce aux questionnaires, au budget espace-temps et aux cartographies existantes, les enseignements tirés de cette étude de terrain permettront ensuite d'affiner l'estimation des expositions en définissant des indicateurs pertinents pour l'ensemble des enfants inclus dans la cohorte ELFE.

Les partenaires :

Ghislaine Bouvier

Équipe EPICENE, UMR 1219, Institut de Santé Publique, d'Épidémiologie et de Développement (ISPED), Inserm, Université de Bordeaux

René De Sèze

Unité TOXI (Toxicologie expérimentale), Direction des Risques Chroniques, Ineris, Verneuil-en-Halatte

Durée : 54 mois

Financement : 360 K€

Contact : ghislaine.bouvier@u-bordeaux.fr

³³ Recueil détaillé des milieux où se trouve l'enfant et de ses activités.

Le transfert d'énergie à distance

Caractérisation des expositions induites par les futurs systèmes de transfert d'énergie sans fil

Maxim ZHADOBOV

Mots-clés : exposition, technologie, transfert énergie, mobilité, interaction, modélisation, corps humain

Les acteurs majeurs de l'industrie électronique investissent massivement dans le transfert d'énergie sans fil (WPT³⁴). Cette technologie est déjà déployée pour de petits appareils électroniques nomades comme des smartphones ou les brosses à dents électriques. Dans un futur proche, elle pourrait remplacer les fils d'alimentation de divers appareils électriques de manière à permettre une utilisation plus flexible (ex. télévision sans fil, appareils électroménagers). De même, elle permettrait la recharge de dispositifs implantés dans le corps. Il existe aussi des versions de dispositifs WPT mettant en jeu de fortes puissances, utilisables sur des véhicules électriques, qui pourraient être rechargés sans contact au garage voire alimentés par la chaussée. En résumé, de multiples appareils de notre quotidien pourraient exploiter cette technologie considérée comme le dernier chaînon manquant pour la « mobilité totale ».

Pour ces applications, les systèmes WPT sont constitués d'un émetteur de puissance et d'un récepteur. La puissance transmise peut être significative (de quelques watts à quelques kilowatts pour les véhicules). La question qui se pose est l'exposition aux champs électromagnétiques des personnes à proximité de ces systèmes WPT et les éventuels effets biologiques de ce champ. Or, pour cette bande de fréquences, la littérature scientifique sur les interactions onde-vivant est extrêmement restreinte, comparée à celle disponible pour les basses fréquences ou celles de la téléphonie mobile. Les limites d'exposition définies par l'ICNIRP³⁵ pour cette bande sont fixées à la fois en termes de débit d'absorption spécifique (DAS) et de densité de courant :

- Au-dessus de 100 kHz, les valeurs limites grand public sont de 0,08 W/kg pour le DAS corps entier ;
- Jusqu'à 10 MHz, une limite supplémentaire s'applique en termes de densité de courant (J) pour éviter des effets sur le système nerveux.

Reste à savoir comment se situent les futurs dispositifs WPT par rapport à ces valeurs limites. C'est un enjeu important, compte-tenu du déploiement massif envisagé pour ces systèmes, avec des niveaux de puissance relativement élevés. Or, actuellement, il n'existe qu'un faible nombre d'études dosimétriques dans la bande de fréquences comprise entre quelques MHz et quelques dizaines de MHz.

“ Dans un futur proche, le transfert d'énergie sans fil (WPT) pourrait remplacer les fils d'alimentation de divers appareils électriques de manière à permettre une « mobilité totale ».

Le projet de recherche : Expo-WPT

Le projet Expo-WPT a pour objectif principal la caractérisation numérique et expérimentale des expositions induites par les systèmes WPT émergents dans les environnements professionnels, personnels et domestiques.

IETR, UMR CNRS 6164, Équipe WAVES « Ondes Electromagnétiques en Milieux Complexes », Université Rennes 1

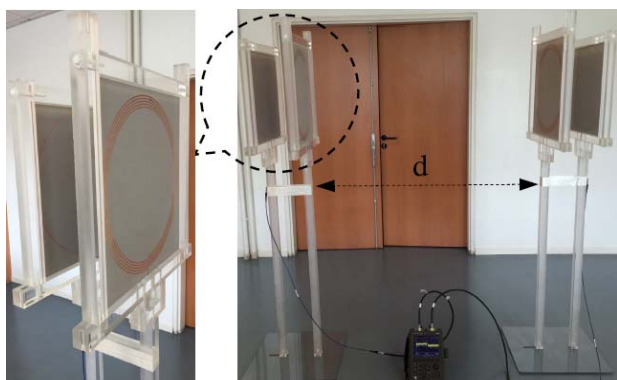
³⁴ De l'anglais, "Wireless Power Transfer" (transfert d'énergie sans fil).

³⁵ International Commission on Non-Ionizing Radiation protection : <http://www.icnirp.org/>

Méthodologie

Cette étude présente deux volets :

- Une étude de dosimétrie numérique afin de quantifier les niveaux d'exposition induits dans le corps humain pour des scénarios d'exposition typiques. Un code numérique permet de résoudre les équations de propagation du champ dans le corps. Une résolution spatiale de 2 mm a été choisie, qui apporte à la fois une précision acceptable et un temps de calcul raisonnable³⁶. Deux dispositifs WPT sont considérés : un système simple, qui consiste en une boucle de 15 cm, placé près de l'appareil à recharger et un système dit résonnant, qui peut être placé plus loin de l'appareil à recharger (un mètre). Dans la modélisation, le corps est placé dans différentes positions compatibles par exemple devant un mur dans lequel est intégrée une boucle d'un dispositif résonant.
- La mise au point d'un dispositif expérimental permettant de simuler les expositions. Il est composé d'une part, d'un ensemble de boucles de courant fonctionnant comme un système WPT résonant et d'autre part, d'une sphère simulant un corps. À terme, cette sphère sera remplacée par un mannequin plus réaliste rempli par un milieu simulant les propriétés électriques des tissus. Des sondes permettront de mesurer la température et le champ à l'intérieur du mannequin. À noter que ce dernier point nécessite des développements spécifiques, notamment pour trouver le matériau qui aurait les bonnes propriétés.



Système WPT développé et fabriqué pour le projet

Premiers résultats

Une analyse dosimétrique numérique a été réalisée pour identifier les grandeurs dosimétriques les plus « critiques » (c'est-à-dire celles qui se rapprochent le plus des valeurs limites pour un courant ou une puissance donnée). Aux fréquences voisines de 10 MHz les premiers résultats démontrent que, dans certains cas, la limite en termes de densité de courant peut être atteinte plus rapidement que pour le DAS.

Publications issues de ce projet

M. Koohestani, M. Zhadobov, M. Ettore. Design methodology of a printed WPT system for HF-band mid-range applications considering human safety regulations. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(1), pp. 270 – 279, Jan. 2017.

Les partenaires :

Maxim Zhadobov* (équipe WAVES), **Mauro Ettore**** (équipe BEAMS) et **Ronan Sauleau**

*Équipe « Electromagnetic waves in complex media » (WAVES)

**Équipe « BEam Antennas up to Mm and Sub-mm waves » (BEAMS)

IETR, UMR CNRS 6164

Yves Le Dréan et Yann Le Page

IRSET, Inserm U1085, Équipe « Transcription, Environnement et cancer » (TrEC), Université de Rennes 1

Durée : 39 mois

Financement : 189 k€

Contact : maxim.zhadobov@univ-rennes1.fr

³⁶ La durée typique d'une simulation avec ce degré de complexité est de quelques jours à quelques semaines.

L'estimation du DAS voie montante : le projet DEVIN

Dispositif portable de mesure de l'exposition EM d'une source proche en voie montante

Serge BORIES

Mots-clés : mesure, exposition, rayonnement électromagnétique, téléphone mobile, dosimétrie, débit, absorption onde, dosimètre

Caractériser de manière fine l'**exposition réelle** du public aux ondes électromagnétiques et observer l'impact de nouveaux systèmes communicants ou de leur usage sont des enjeux importants. La grandeur qui caractérise cette exposition est le débit d'absorption spécifique (DAS), c'est-à-dire la puissance absorbée par les tissus du corps humain lors de l'utilisation d'un téléphone ou, de manière générale, d'un émetteur sans-fil. On notera qu'en moyenne le DAS réel dû aux dernières générations de téléphonie cellulaire est largement inférieur à la valeur maximale certifiée par le constructeur qui, elle, est obtenue lorsque le dispositif émet à pleine puissance. On l'aura compris, l'exposition réelle dépend donc de l'usage et du réseau, deux caractéristiques très variables. D'où l'intérêt de pouvoir déployer l'exposimètre DEVIN sur un échantillon large d'utilisateurs.

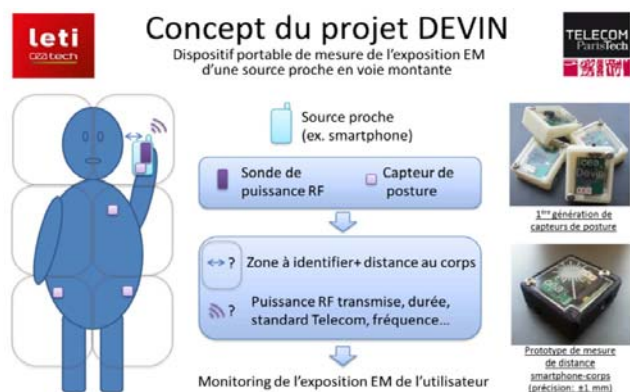
par rapport à celle induite par la liaison descendante, compte tenu de la proximité de l'émetteur. Cette grandeur est toutefois difficile à mesurer. L'approche inédite retenue dans le projet DEVIN permet une estimation plus rigoureuse, par rapport aux méthodes approximatives existantes, du DAS voie montante et ceci de manière non invasive pour l'utilisateur. À terme, l'objectif est de déployer ce dispositif sur un échantillon large de la population dans le but d'obtenir des valeurs fiables de l'exposition quotidienne des utilisateurs.

L'estimation du DAS

En équipant un individu d'un dosimètre portable, on sait enregistrer le niveau du champ électromagnétique (EM) localement en un point donné du corps. Toutefois, quand la source des ondes est portée par l'utilisateur, cette mesure locale, au niveau du dosimètre (généralement porté au niveau de la ceinture) ne permet pas de remonter au DAS :

- La première raison est que le niveau d'émission de la source n'est, en général, pas connu ou pas constant dans le temps, donc on ne peut pas extrapoler au cas « pleine puissance ».
- La seconde raison est que la mesure du champ au niveau du dosimètre ne permet pas son extrapolation en un autre point du corps dès lors que la position de la source demeure inconnue.

Le cas du téléphone cellulaire illustre bien cette problématique. Le niveau réellement émis n'est pas disponible³⁷ et la position du terminal par rapport au corps varie en fonction de l'utilisation qui en est faite (ex. téléphone à l'oreille pour un appel classique, téléphone devant le buste pour un envoi de données).



Problématiques et solutions au monitoring in situ de l'exposition EM voie montante (Source : CEA Leti)

Dans le projet DEVIN, on s'intéresse au DAS « voie montante », dû aux ondes émises par le terminal vers l'infrastructure du réseau (station de base). C'est cette exposition qui est largement prépondérante

³⁷ L'équipementier ne donne généralement pas accès à ce type d'information pourtant disponible au niveau des composants.

D'où la nécessité de développer une méthode d'estimation du DAS qui permette à la fois d'accéder à une diversité d'usages et d'expositions suivant de nombreux critères (ex. taille de la cellule radio, qualité du lien radio, âge, heure de la journée) sans impacter l'utilisateur ni sa liberté de mouvement. Cela implique que l'équipement de mesure soit discret et léger. Cet aspect technique demeurait jusqu'à présent un point bloquant.

Le projet de recherche : DEVIN

Le projet DEVIN a mis au point une méthode pour estimer le DAS voie montante à partir de mesures au cours de l'usage quotidien d'une source proche du corps. Cette méthode réussit à se passer d'un dosimètre porté par l'utilisateur en équipant son téléphone d'une sur-coque et de quelques capteurs miniatures dans ses poches par exemple. Le scénario du smartphone est choisi, car c'est aujourd'hui la source d'exposition EM principale pour le grand public.

Méthodologie

La mesure du DAS qui est proposée, s'appuie sur deux types de données :

- La mesure de la **puissance réellement émise** par le smartphone via une sonde positionnée dans la sur-coque du terminal;
- L'**usage (ou position grossière) du smartphone** à partir de divers capteurs miniatures portés par l'utilisateur. Cette solution vise ainsi une estimation du DAS plus précise que les autres solutions existantes qui, de manière générale, font une hypothèse sur la position de la source par rapport au corps.

Lors du post-traitement sur un PC, la combinaison de ces informations permet de remonter à l'évaluation du DAS au cours des activités quotidiennes de l'utilisateur.

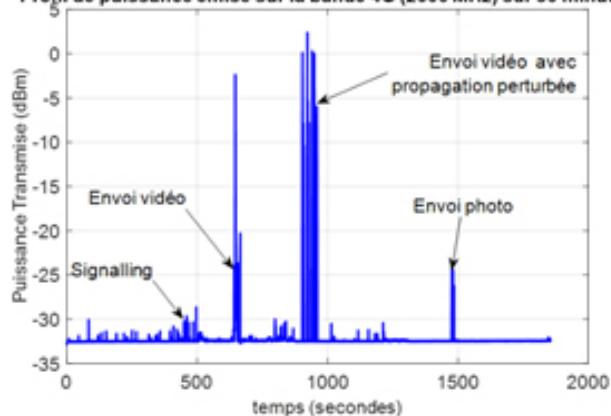
Sur-coque DEVIN équipant le portable de l'utilisateur



Détails des cartes électroniques intégrées dans la sur-coque DEVIN

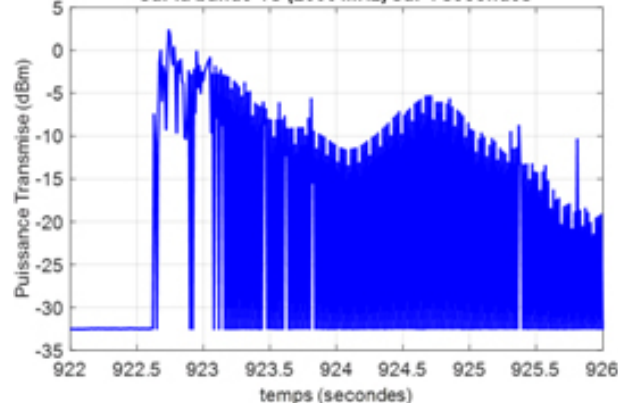


Profil de puissance émise sur la bande 4G (2600 MHz) sur 30 minutes



Résultats du projet DEVIN (Source : CEA Leti)

Zoom sur le profil de puissance émise sur la bande 4G (2600 MHz) sur 4 secondes



Résultats du projet DEVIN (Source : CEA Leti)

L'enjeu final est de démontrer que cette méthode d'estimation du DAS est bien plus précise (de plusieurs ordres de grandeur) et moins chère qu'avec le seul dosimètre porté.

Résultats

Le premier démonstrateur complet du projet DEVIN a été conçu de manière paramétrable afin d'explorer certains compromis liés à la mesure de la puissance transmise comme la fréquence d'acquisition des mesures versus l'autonomie ou encore la dynamique de mesure versus la précision. L'optimisation de ces réglages permettra, pour la prochaine génération d'exposimètre, de réduire l'encombrement (taille, poids) de la sur-coque et des capteurs. Dès à présent, l'utilisateur monitoré conserve l'usage classique de son téléphone. Il a également été démontré que la sur-coque DEVIN n'a pas d'impact sur le fonctionnement de l'antenne du téléphone ni sur le DAS.

Le système DEVIN permet d'enregistrer la puissance émise par le téléphone (sa moyenne, son maximum et son écart-type) toutes les 10 ms pendant plusieurs heures, et ceci sur l'ensemble des bandes de fréquences voie montante des standards cellulaires utilisés en France actuellement : 2G (GSM et DCS), 3G et 4G (bande 800MHz et bande 2600MHz). Sur la figure ci-dessous, on observe le profil de puissance émise par le smartphone sur une durée de 30 min dans la bande 4G LTE 2600 MHz. Sur ce profil, on distingue parfaitement les moments et la puissance maximal lors de différents usages (envois de photos, de vidéos) et suivant les conditions de propagation (dégradée ou pas). Un zoom (figure de droite) sur quelques secondes permet de constater l'impact et la rapidité du contrôle de puissance émise en 4G. En effet on observe une variation de 20 dB (un facteur 100 en puissance) en seulement 3 secondes.

Cette mesure de la puissance réellement émise lors de l'usage quotidien d'un smartphone va ainsi permettre d'accéder à l'exposition réelle des personnes monitorées en tenant compte à la fois de leurs usages et de l'état du réseau Telecom (densité de l'infrastructure, charge du réseau...).

Les partenaires :

Serge Bories

CEA – LETI, Grenoble

Joe Wiart

France Telecom Orange, Issy-les-Moulineaux

Durée : 27 mois

Financement : 200 k€

Contact : serge.bories@cea.fr

Un outil de monitoring pour caractériser l'exposition des populations aux radiofréquences

Système autonome de caractérisation de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences issus des stations de base de téléphonie mobile, hybridant acquisition collaborative sur smartphones et simulation numérique

François GAUDAIRE

Mots-clés : mesure, cartographie, modélisation, sonde, surveillance, exposition, téléphone mobile, antenne, champ électromagnétique, radiofréquence, station base

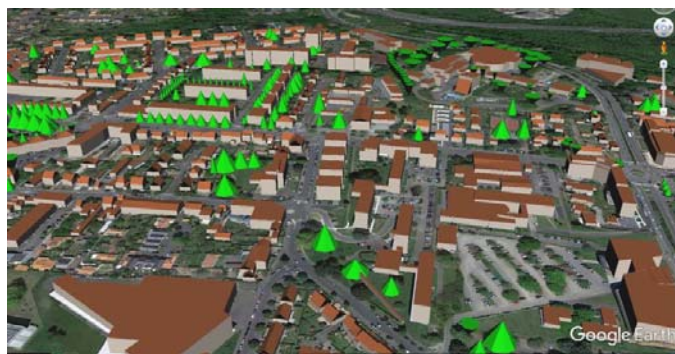
L'exposition des populations aux radiofréquences est aujourd'hui appréhendée de différentes façons, soit par des mesures, soit par des modélisations numériques. Les mesures sont toujours localisées temporellement et spatialement (ex. mesures de vérification de conformité par rapport aux normes, campagnes de mesures spécifiques liées à des projets de recherche). La modélisation numérique permet, quant à elle, une analyse de l'exposition à grande échelle et en tout lieu, mais elle est dépendante de données sur les émetteurs radioélectriques (ex. nombre, position exacte, puissance, orientation), souvent imprécises et partiellement disponibles.

L'application VigiPhone

En 2014, une application a été développée avec succès pour les smartphones sous Android. Elle collecte les informations sur les antennes relais (puissance du signal reçu, identifiant de l'antenne et position du téléphone) et les fait remonter vers un serveur qui les stocke. Des expérimentations et mesures sur le terrain ont permis de valider la pertinence de ces informations récoltées. Les informations obtenues sont certes partielles, mais il est possible d'agréger des données issues de plusieurs smartphones et de les recouper avec des modélisations numériques, ce qui permet de remonter à une description de l'exposition au niveau d'une ville. C'est l'objectif du projet VigiExpo.

Le projet de recherche : VigiExpo

Le projet VigiExpo s'inscrit dans une démarche citoyenne et participative, avec le développement d'une technique de « faible coût », permettant de connaître les niveaux d'exposition de la population aux champs électromagnétiques RF liés aux antennes de téléphonie mobile. En effet, en utilisant un smartphone comme une sonde de surveillance autonome grâce à l'application décrite ci-dessus, on peut avoir accès en temps réel à la puissance reçue d'une antenne relais. Le point clé est la mise en commun des données issues de nombreux smartphones, pour enrichir la modélisation numérique. On peut ainsi construire des cartes dynamiques de l'exposition des personnes aux radiofréquences.



*Modèle numérique d'un quartier d'étude
(Source : CSTB)*

Un des objectifs du projet est de remonter aux caractéristiques des antennes (ex. position précise, diagramme de rayonnement, tilt électrique³⁸), en partant des données publiques imprécises et/ou incomplètes (ex. Cartoradio) et en exploitant les acquisitions de force du signal réalisées sur des smartphones.

Méthodologie

La méthodologie repose sur le développement d'un algorithme d'optimisation des caractéristiques des émetteurs, à partir des données disponibles sur les smartphones. Il s'agit de modifier une situation initiale, jusqu'à ce qu'elle se rapproche au mieux de la situation réelle mesurée, en utilisant des critères de comparaison entre les résultats de modélisation (pour une situation donnée) et les acquisitions sur smartphones. On utilise pour cela à la fois des indicateurs de liaison (corrélation de Pearson, corrélation de Spearman) et des indicateurs d'erreur (écart-type).

“

Le projet VigiExpo s'inscrit dans une démarche citoyenne et participative, permettant de connaître les niveaux d'exposition de la population aux radiofréquences.

”

La famille d'algorithmes d'optimisation bien adaptée à ce type de problème est celle des algorithmes génétiques. Ce type d'algorithme consiste à suivre l'évolution d'une « population » de solutions au problème (ici maximiser ou minimiser un critère), par analogie avec la théorie de l'évolution. Un algorithme génétique a été développé dans le cadre du projet.

Résultats

L'ensemble de la méthodologie a été validée sur une « scène virtuelle maîtrisée », c'est-à-dire un quartier pour lequel on connaît les caractéristiques des émetteurs et les niveaux d'exposition de champs

électromagnétiques associés. Ces données des émetteurs sont volontairement aléatoirement dégradées. L'algorithme développé permet comme prévu de maximiser la corrélation et de retrouver les paramètres d'antennes de la solution de référence.

La suite du projet consiste en des validations sur sites réels, avec dans un premier temps un quartier de la ville de Nantes. Il s'agit d'une zone d'environ 1,5km x 1,5km, situé au nord de Nantes. Cette zone présente l'intérêt d'avoir des stations de base des quatre opérateurs, dans des configurations relativement différentes (antennes sur mat, antennes sur bâtiment de grande hauteur, antennes sur bâtiments de faible hauteur...).

Un modèle numérique complet, modélisant à la fois l'environnement géométrique, les acquisitions sur les smartphones et les antennes est désormais opérationnel pour la phase de test en environnement réel.

Cette méthode de monitoring à partir de données issues de smartphones permet de faire converger les paramètres associés aux modélisations numériques vers ceux permettant une description pertinente de l'exposition à l'échelle d'une ville, et ceci avec un système autonome, participatif et évolutif, n'exploitant que des données publiques.

Les partenaires :

François Gaudaire

CSTB, Département Santé Confort, Division Eclairage et électromagnétisme, Saint-Martin d'Hères

Pierre Combeau

Université de Poitiers, Laboratoire XLIM-SIC, Futuroscope Chasseneuil

Jean-Benoît Dufour

Geomod, Lyon

Durée : 28 mois

Financement : 158 K€

Contact : francois.gaudaire@cstb.fr

³⁸ Inclinaison de la « visée » de l'antenne par rapport à l'horizontale.



Ondes millimétriques et cellules nerveuses

Yves LE DRÉAN

Mots-clés : exposition, rayonnement électromagnétique, cellule, système nerveux, onde millimétrique, in vitro, métabolisme, radiofréquence, absorption onde, neurite, dopamine

Aujourd'hui, la saturation du spectre électromagnétique (jusqu'à 10 GHz) et l'augmentation incessante des besoins en communications haut débit imposent le recours à des fréquences porteuses toujours plus élevées. D'ici 2020, des systèmes sans fil dans la bande de fréquences des 60 GHz, c'est-à-dire dans la gamme des ondes millimétriques (OMM), devrait gagner les foyers et les milieux professionnels. Cependant, on ne peut pas écarter la possibilité que ces nouveaux rayonnements puissent avoir des effets biologiques, car les OMM sont utilisées en thérapie³⁹ – ce qui suggère que des interactions sont possibles sur les organismes vivants.

Les ondes millimétriques (OMM)

Les OMM correspondent aux fréquences comprises entre 30 GHz et 300 GHz (de 1 mm à 10 mm en termes de longueur d'onde). Comparées aux radiofréquences utilisées en téléphonie mobile, les OMM sont absorbées par les tissus sur une très faible profondeur, donc essentiellement au niveau de la peau. Ceci se traduit par une forte absorption d'énergie, même pour des valeurs de puissance incidente inférieures aux normes limites. Ainsi, plus de 95% de l'énergie est absorbée par la peau, ce qui fait de cet organe la principale cible des OMM et sûrement le point de départ des effets biologiques potentiels. Or, la peau n'est pas une barrière isolée du reste de l'organisme ; elle contient des vaisseaux sanguins et des terminaisons nerveuses qui communiquent avec l'ensemble du corps.

Il ressort d'une étude précédente⁴⁰ que les kératinocytes (cellules de la peau) ne sont pas les cibles cellulaires qui peuvent expliquer l'effet de ces ondes lors de leur utilisation en thérapie. Nous avons constaté que ces cellules sont très résistantes vis-à-vis des variations des conditions extérieures et elles ne sont pas affectées par une exposition aiguë aux OMM de faible intensité. Une autre hypothèse émerge, celle des cellules nerveuses également présentes dans la peau, ceci d'autant plus que des études scientifiques suggèrent que certains effets thérapeutiques pourraient être dus à leur stimulation. Même si les mécanismes moléculaires impliqués ne sont pas encore connus, cette piste semble prometteuse.

Le projet de recherche : OMcell

L'objectif principal de ce projet était d'étudier l'impact potentiel des OMM sur des cultures de cellules présentant un phénotype neuronal. Cet impact a été analysé à différents niveaux (ex. puissance, durée d'exposition) sur :

- **La différenciation neuronale** avec l'étude de la croissance des neurites⁴¹ et de l'expression de canaux et de récepteurs membranaires spécifiques⁴² ;
- **La structure/fonction des membranes cellulaires** notamment, la fluidité membranaire et les phénomènes d'exo- et d'endocytose liés au métabolisme et à la libération de la dopamine.⁴³

Inserm U 1085, IRSET, Université de Rennes 1

³⁹ Dans les pays de l'ex-Union Soviétique.

⁴⁰ Yves Le Dréan, *Réponses cellulaires aux expositions millimétriques*, Anses, Cahiers de la Recherche, nov. 2016, p. 88 (à propos du projet de recherche ReCEM financé par le PNR EST en 2010).

⁴¹ Excroissance qui prolonge le corps du neurone par exemple l'axone, filament qui conduit l'influx nerveux.

⁴² Protéines qui sont fabriquées par le neurone.

⁴³ Substance transmettant un signal chimique entre deux neurones.

L'originalité de ce projet tient essentiellement au choix des fréquences étudiées et du modèle de cellule utilisé.

Méthodologie

Le système d'exposition *in vitro*, qui permet d'illuminer des cultures de cellules avec un faisceau d'OMM a été étendu pour permettre d'exposer une plus grande surface de culture. Une nouvelle antenne a été fabriquée et optimisée pour augmenter l'uniformité de l'exposition pour les expériences *in vitro* à 60 GHz, c'est-à-dire à partir de signaux millimétriques identiques à ceux utilisés dans les systèmes de télécommunication émergents à haut débit. Ces expositions sont faites en respectant les limites de puissance de 10 milliwatt par centimètre carré pour des durées de 24 heures.

Après exposition, les cellules ont été fixées, marquées avec diverses substances fluorescentes indiquant le niveau d'expression des protéines étudiées et photographiées. Au total, plus d'une centaine de puits de culture ont été exposés, ce qui représente plus d'un millier de photographies prises et analysées. Ce grand nombre d'observations donne plus de robustesse aux statistiques et permet de prendre en compte d'éventuelles sous populations de cellules qui auraient été plus sensibles.

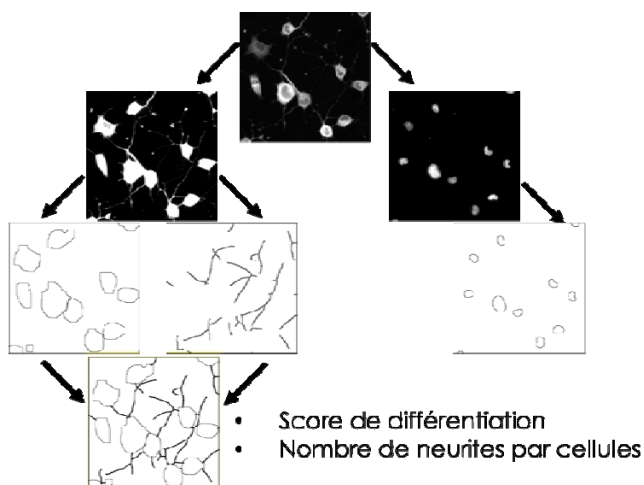


Fig. 1 Développement d'une macro, pour analyser automatiquement les paramètres de la poussée neuritique

Résultats

Les résultats obtenus au cours de ce projet sont très rassurants en ce qui concerne l'utilisation des OMM en télécommunication. En nous plaçant au-delà de la limite ICNIRP, nous n'avons pas observé d'effets significatifs sous exposition. Plusieurs paramètres ont été analysés, tels que l'expression d'une dizaine de protéines marqueurs de stress, de différenciation ou liées à la nociception⁴⁴. Nous avons également analysé le métabolisme et le trafic de la dopamine, ainsi que la poussée neuritique. Pour ce dernier point, le nombre, la longueur et l'orientation des neurites dans le champ électromagnétique ont été examinés (Fig. 1 et 2). Quel que soit le test utilisé, nos résultats ont été négatifs. On peut toutefois souligner que quelques tendances ont été observées, mais le différentiel entre les contrôles et les cellules exposées est trop faible pour pouvoir être statistiquement relevant. De plus, les contrôles thermiques que nous avons effectués ont permis à chaque fois de mimer ces effets, ce qui indique qu'ils sont très certainement d'origine thermique.



Fig. 2 Quantification de la poussée neuritique sous exposition (OMM), comparée aux contrôles (sham = sans exposition ; CT = contrôle thermique 38°C)

⁴⁴ Sensibilité à la douleur.

La conclusion majeure de ce projet, c'est que la différenciation neuronale, l'expression de récepteurs-canaux spécifiques à la nociception et le métabolisme de la dopamine ne sont pas affectés par des expositions à 60 GHz de courte durée (24h) et pour des puissances à la limite des normes permises. Toutefois, ces travaux ne présagent en rien de l'innocuité de ces ondes en ce qui concerne les effets à long terme, ou les effets sur l'activité électrique des neurones.

Publications issues de ce projet

Steshenko S, Zhadobov M, Sauleau R, Boriskin A.V. Beam-forming capabilities of waveguide feeds assisted by corrugated flanges. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(12), pp. 5548-5560 (2015).

Haas AJ, Le Page Y, Zhadobov M, Sauleau R, Le Dréan Y. Effects of 60-GHz Millimeter Waves on Neurite Outgrowth in PC12 Cells Using High Content Screening. *Neurosci Lett*. 618:58-65 (2016).

Haas AJ, Le Page Y, Zhadobov M, Boriskin A, Sauleau R, Le Dréan Y. Impact of 60-GHz Millimeter Waves on Stress and Pain-related Protein Expression in Differentiating Neuron-like Cells. *Bioelectromagnetics*. 37(7):444-54 (2016).

Haas AJ, Prigent S, Dutertre S, Le Dréan Y, Le Page Y. Neurite analyzer: An original Fiji plugin for quantification of neuritogenesis in two-dimensional images. *J Neurosci Methods*. 271:86-91 (2016).

Zhadobov M, Alekseev SI, Sauleau R, Le Page Y, Le Dréan Y, Fesenko EE. Microscale temperature and SAR measurements in cell monolayer models exposed to millimeter waves. *Bioelectromagnetics*. 38(1):11-21 (2017).

Haas AJ, Le Page Y, Zhadobov M, Sauleau R, Le Dréan Y, Saligaut C. Effect of acute millimeter waves exposure on dopamine metabolism of NGF-treated PC12 cells. *Accepté à Journal of Radiation Research*. *Journal of Radiation Research*, 2017, pp. 1-7

Les partenaires :

Yves Le Dréan

Transcription, Environnement & Cancer. Institut de Recherche sur la Santé, l'Environnement et le Travail (Irset), Inserm U 1085, Université de Rennes 1

Dominique LAGADIC-GOSSMANN

Stress, Membrane et Signalisation. Institut de Recherche sur la Santé, l'Environnement et le Travail (Irset), Inserm U 1085, Université de Rennes 1

Ronan SAULEAU

Systèmes Rayonnants Complexes. Institut d'Électronique et de Télécommunications de Rennes (IETR) UMR CNRS 6164, Université de Rennes 1

Durée : 36 mois

Financement : 200 k€

Contact : yves.le-drean@univ-rennes1.fr



Effet des signaux GSM 1800 MHz sur le système nerveux central

Effet des ondes GSM 1800 MHz sur les cellules microgliales et la neurotransmission dans un contexte neuroinflammatoire

Michel MALLAT

Mots-clés : mécanisme action, radiofréquence, téléphone mobile, cellule, système nerveux central, inflammation, neurotransmission, macrophage, microglie, cortex cérébral, cytokines

En matière de santé publique, les effets des radiofréquences (RF) associés à la téléphonie mobile ont suscité des enquêtes épidémiologiques internationales dont les résultats laissent ouvertes de nombreuses questions. En particulier, on ne peut écarter la possibilité d'un niveau de risque différent durant la période infantile ou l'adolescence, sous l'hypothèse d'effets biologiques des RF qui pourraient varier selon le stade de développement du cerveau ou des tissus qui l'enveloppent.

L'existence de facteurs de vulnérabilité aux RF peut également se poser selon des critères autres que l'âge des sujets exposés. De fait, l'usage de la téléphonie mobile concerne des populations très hétérogènes en termes d'état de santé. Par exemple, parmi les usagers figurent de nombreux jeunes ou adultes, sujets à des pathologies très diverses qui pourraient éventuellement modifier leur sensibilité aux RF. Les recherches menées au cours des vingt dernières années ont montré que de nombreuses maladies touchant directement ou indirectement le système nerveux central (SNC) provoquent des états neuroinflammatoires aigus ou chroniques. Leurs caractéristiques varient selon les pathologies ou leur évolution, mais ils impliquent systématiquement des réponses cellulaires, dont des activations des cellules microgliales.

La microglie

Les cellules de la microglie sont présentes dans toutes les structures du système nerveux central (SNC). Elles font partie du système immunitaire dit « inné ». La microglie est affiliée au groupe des macrophages, un type cellulaire présent dans tous

les organes, mais dont les propriétés fonctionnelles peuvent fortement varier selon leur localisation dans l'organisme. Au cours de la maturation cérébrale, la microglie participe activement à l'adaptation fonctionnelle ou au remodelage des réseaux neuronaux. Dans de nombreux contextes pathologiques, la réaction des cellules microgliales se manifeste par des modifications de leur morphologie et de leur capacité à proliférer ou à produire différents médiateurs qui favorisent ou contrôlent le déroulement d'une réaction neuroinflammatoire locale ou qui modulent l'activité neuronale. Les modifications de la microglie constituent un marqueur précoce et sensible de processus pathologiques ayant un retentissement cérébral.

Le projet de recherche : MICROG-1800

De nombreuses études visent à préciser l'effet des signaux liés à la téléphonie mobile sur un SNC sain. Par contre, les travaux portant sur des SNC modifiés par des processus pathologiques restent rares. C'est pour apporter des connaissances dans ce domaine que le projet de recherche MICROG-1800 a été lancé. Il vise à caractériser de nouvelles réponses cellulaires et moléculaires induites par l'exposition du SNC à des signaux GSM, lorsque le SNC est affecté par une réaction inflammatoire. Le projet a trait aux effets d'une exposition à un champ électromagnétique de type GSM-1800 MHz dans un modèle animal de neuroinflammation aigue. L'objectif est de caractériser d'éventuelles modulations de la réaction inflammatoire et d'en rechercher les conséquences sur l'activité neuronale au niveau du cortex cérébral, chez des sujets jeunes ou adultes.

Méthodologie

Un état neuroinflammatoire transitoire a été induit chez des rats mâles adultes (âge : 2 mois) ou jeunes (âgés de 15 jours), par injection intrapéritonéale d'un composé stérile d'origine bactérienne, le lipopolysaccharide (LPS), 24 h avant l'exposition au GSM. Les travaux ont porté sur les effets d'exposition au GSM 1800 MHz de type « tête seule » dont la durée était de 2 h. La puissance absorbée dans le tissu cérébral a fait l'objet d'une analyse dosimétrique de haute résolution spatiale par un laboratoire de physique spécialisé dans ce domaine.

Il s'agissait notamment de déterminer les effets biologiques des radiofréquences sur :

- L'expression des gènes associés à l'activité microgiale (médiaeurs ou régulateurs de la neuroinflammation)⁴⁵ ;
- le phénotype des cellules microgiales (détection immunohistologique) ;
- L'activité neuronale et la neurotransmission excitatrice, abordées par l'expression du facteur de transcription cFos, l'étude de la phosphorylation⁴⁶ de récepteurs glutamatergiques et l'activité électrique de neurones corticaux.

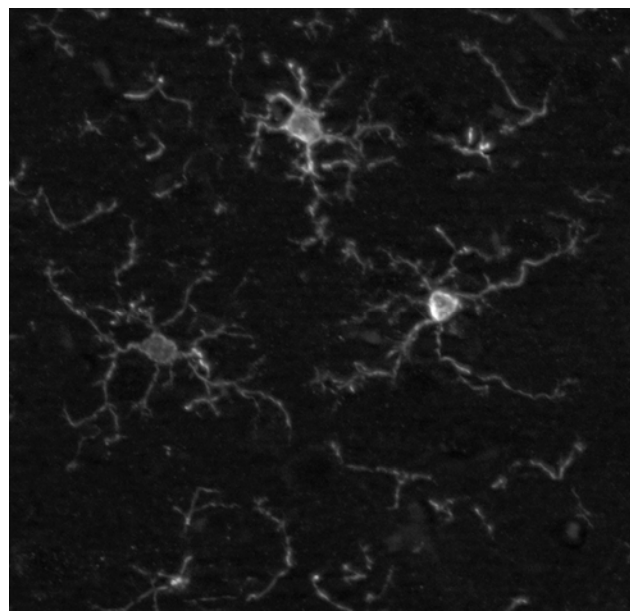
Ces analyses ont porté sur différentes régions du cortex cérébral chez les animaux jeunes ou adultes. L'importance de la neuroinflammation dans les effets observés, a été évaluée par comparaison de réponses obtenues chez des rats adultes injectés ou non avec du LPS avant leur exposition au GSM.

Résultats

L'analyse dosimétrique appliquée à notre modèle a précisé une hétérogénéité de la puissance absorbée au sein du SNC, qui est fonction de la distance entre la source d'émission des RF et la région cérébrale considérée. Les effets biologiques les plus marqués ont été observés au niveau des régions dorso-médiales du cortex cérébral correspondant à des aires motrices ou somatosensorielles. Au niveau de cette région corticale la puissance absorbée par le tissu (Débit d'absorption spécifique, DAS) était de l'ordre de 2.9 W/kg chez les animaux jeunes comme

chez les adultes. Précisons que cette puissance reste nettement supérieure à la valeur maximale tolérée pour le grand public, s'agissant d'une exposition de la tête induite par la téléphonie mobile (2 W/kg, selon les normes européennes).

Il est apparu que l'exposition aux RF entraîne une diminution de l'expression de gènes codant pour des médiaeurs proinflammatoires dans le cortex dorso-médian des ratons ou de rats adultes ayant reçu une injection de LPS. Chez les rats adultes, cette modulation de l'expression génique va de pair avec des modifications du niveau de phosphorylation de récepteurs glutamatergiques et de la morphologie des cellules microgiales du cortex. En particulier, l'exposition aux RF se traduit par un accroissement de la longueur des prolongements microgiaux. Ces effets des RF sont statistiquement significatifs 24 h après exposition chez les animaux prétraités au LPS, puis ils disparaissent et ne sont plus détectables 72 h après les expositions. De plus, ils ne sont pas observés chez des rats exposés au RF en l'absence de traitement préalable par le LPS (absence d'état neuroinflammatoire au moment de l'exposition).



Aspect de cellules microgiales dans le cortex cérébral de rat adultes.

Les cellules et leurs prolongements sont révélés par immunomarquage fluorescent de la protéine Iba1 qui est sélectivement exprimée par la microglie dans le système nerveux central.

⁴⁵ Dosage des transcrits pour l'ensemble des gènes analysés.

⁴⁶ Mécanisme de régulation.

Conclusions

L'ensemble de ces résultats met en évidence des effets des champs GSM-1800 MHz sur le SNC lors d'un épisode neuroinflammatoire aigu. Ils montrent également qu'un état neuroinflammatoire peut potentialiser des réponses transitoires de cellules cérébrales lorsqu'elles sont soumises à des RF utilisées par la téléphonie mobile mais appliquées à des puissances supérieures à celles qui sont admises pour l'exposition du grand public. Ces réponses peuvent différer selon le stade de maturation des sujets exposés. Cependant, l'impact fonctionnel des modifications observées reste à déterminer. Dans cette perspective, nos travaux en cours visent à caractériser l'effet des RF sur l'activité électrique de neurones corticaux.

Les partenaires :

Michel Mallat

Inserm U 1127, Institut du Cerveau et de la Moelle Épinière (ICM), Hôpital de la Salpêtrière, Paris

Thérèse Jay

Inserm U 894, Centre de Psychiatrie et Neurosciences, Paris

Jean-Marc Edeline

Institut de Neurosciences Paris-Saclay (NeuroPSI) UMR 9197 CNRS, Université Paris sud, Orsay

Collaboration au niveau national :

Dr. Philippe Lévêque

Université de Limoges, XLIM, CNRS UMR 7252

Durée : 41 mois

Financement : 199.848 €

Contact : michel.mallat@upmc.fr

Radiofréquences et mémoire

Sensibilité du cerveau aux ondes électromagnétiques (4G) à différents âges chez le rat : persistance d'un souvenir et mécanismes épigénétiques associés

Anne PEREIRA DE VASCONCELOS

Mots-clés : sensibilité, cerveau, rayonnement électromagnétique, fonctions cognitives, mémoire spatiale, génétique/épigénétique, rat, adolescent, adulte, âgé

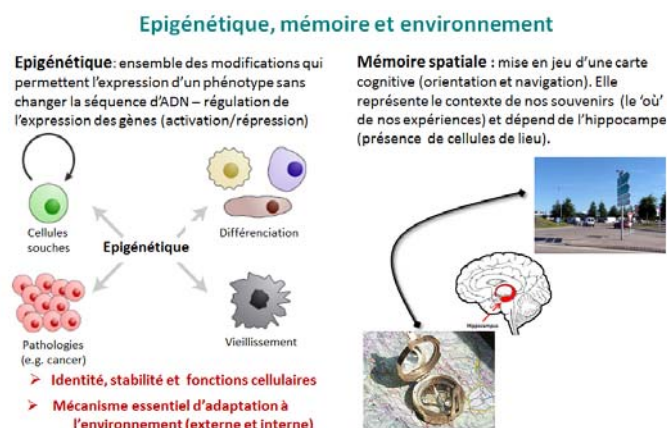
La mémoire est une fonction cognitive complexe jouant un rôle majeur dans la vie d'un individu. Ainsi, nos souvenirs sont le fondement de notre identité, de ce que nous savons et pouvons faire, et la base de nos interactions/capacités d'adaptation à notre environnement. Initialement fugaces, ils se stabilisent avec le temps, mais restent sensibles à de nombreux facteurs environnementaux.

“ À ce jour, aucune étude clinique ou expérimentale n'a exploré l'impact des radiofréquences sur la régulation épigénétique de la mémoire à long terme. ”

À l'heure actuelle, les études cliniques montrent que l'exposition aiguë aux radiofréquences (pour l'essentiel GSM⁴⁷ « 2G » ou UMTS⁴⁸ « 3G ») peut induire ou non des changements cognitifs qui restent subtiles. Cependant, de possibles effets de l'âge restent à explorer plus amplement. Les études expérimentales chez le rongeur ne montrent soit aucun effet, soit des effets délétères ou bénéfiques sur la cognition, incluant la mémoire, après une exposition aiguë ou chronique aux radiofréquences (RF). À ce jour, aucune étude clinique ou expérimentale n'a exploré l'impact des RF sur la persistance d'un souvenir, qui, chez l'Homme peut durer des mois, des années ou encore toute la vie.

Épigénétique, mémoire et environnement

L'apprentissage et la mémoire sont des processus finement régulés, nécessitant une interaction génome-environnement dépendant notamment de processus épigénétiques. Ces derniers régulent la transcription des gènes et la synthèse des protéines, dont celles liées à la plasticité cérébrale et à la formation de nos souvenirs.



Le projet de recherche : EPIRADIOMEM

Le point de départ de notre projet a considéré que :

- i) l'impact de signaux RF récents comme la 4G n'a pas été exploré dans le domaine de la cognition ;
- ii) des effets possibles des RF pourraient dépendre de l'âge, avec une sensibilité variable entre un sujet jeune, dont le cerveau est encore en développement, et un sujet âgé présentant un déclin cognitif.

Laboratoire de Neurosciences Cognitives et Adaptatives (LNCA), UMR 7364, Unistra/CNRS - Strasbourg

⁴⁷ Global System for Mobile communications. Standard de communication pour la téléphonie mobile, dite de deuxième génération, mise en service dans les années 1990. Deux bandes de fréquences peuvent être utilisées 900 MHz et 1800 Mhz.

⁴⁸ Universal Mobile Telecommunications System. Standard de communication pour la téléphonie mobile, dite de troisième génération, lancé dans les années 2000. Il permet un débit de transfert de données plus important.

Le projet de recherche vise à étudier l'effet d'une exposition chronique (3 mois) à un signal 4G sur la formation/persistance d'un souvenir spatial chez le rat à trois âges (adolescent-jeune adulte [1-4 mois], adulte [6-9 mois], âgé [18-21 mois]).

Méthodologie

Deux approches complémentaires sont adoptées :

- **Comportementale** : étude de la mémoire spatiale à long terme chez le Rat (capacité à mémoriser l'emplacement d'une plateforme dans un bassin aquatique); étude de l'anxiété dans un labyrinthe en croix surélevé et de l'activité locomotrice en cage d'élevage sur 24h.
- **Moléculaire** : étude des modifications épigénétiques (acétylation des histones) et de l'expression des gènes (analyse à l'échelle du génome) qui pourraient être induites par les radiofréquences dans deux structures cérébrales essentielles aux processus de mémorisation : l'hippocampe et le cortex préfrontal médian.

Le système d'exposition : chambre réverbérante pouvant accueillir jusqu'à 24 rats en cage d'élevage. Le signal : LTE (*Long Term Evolution*), 4G, 900MHz, ~ 61V/m avec un DAS de 0,33 W/kg. Les rats sont exposés pendant 3 mois à raison de 4h/jour, 5 jours/semaine. Trois groupes : i) chambre avec radiofréquences (groupe RF), ii) chambre sans radiofréquences (groupe Sham) et iii) cage d'élevage (groupe Contrôle).

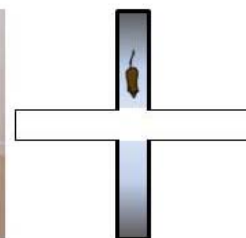
Les tests comportementaux

La piscine de Morris

Quadrant cible virtuel



Le labyrinthe en croix surélevé



La chambre réverbérante

(Fondation IT'IS)



Les partenaires :

Anne Pereira de Vasconcelos (Inserm), Jean-Christophe Cassel, Anne-Laurence Boutillier, Aurélie Salvadori et Brigitte Cosquer

Laboratoire de Neurosciences Cognitives et Adaptatives (LNCA), UMR 7364, Unistra/CNRS – Strasbourg

Myles H. Capstick et Niels Kuster

IT'IS Foundation for Research on Information Technologies in Society – Zurich - Suisse

Durée : 46 mois

Financement : 399.132 €

Contact : pereira@unistra.fr



Radiofréquences et problèmes du sommeil chez les enfants

Exposition longitudinale à radiofréquences et problèmes du sommeil chez les enfants

Mònica GUXENS

Mots-clés : exposition, radiofréquence, enfant, trouble sommeil, trouble du comportement, risque cardiovasculaire

Les sources d'exposition aux champs électromagnétiques peuvent être classées en deux groupes :

1. Des sources mobiles (proches) incluant le téléphone portable et le téléphone sans fil ;
2. Des sources fixes (lointaines) incluant les antennes relais, stations de base et points d'accès au Wi-Fi.

Chaque source est associée à différents modes et niveaux d'exposition aux radiofréquences. Chez les jeunes enfants, on estime que les sources lointaines sont à l'origine de la majeure partie de l'exposition, l'utilisation et la possession de téléphone portable ne débutant qu'autour de l'âge de 6-7 ans et progressant rapidement à la prime adolescence.

Les problèmes du sommeil chez les enfants

Les problèmes du sommeil concernent 20 à 40% des enfants. Ils sont associés à des difficultés d'apprentissage, à des performances scolaires plus faibles et à des troubles du comportement (ex. irritabilité, obésité). Ils sont également associés à des risques cardiovasculaires (ex. tension, résistance à l'insuline), c'est-à-dire qu'ils peuvent avoir des conséquences à long terme sur la santé de la population. C'est pourquoi il est nécessaire d'identifier les facteurs pouvant influencer la qualité du sommeil de l'enfant.

De fait, les relations entre facteurs de risque et problèmes de sommeil sont souvent complexes et bidirectionnelles. Par exemple, les problèmes du sommeil peuvent entraîner des troubles du comportement et des difficultés d'apprentissage mais ils peuvent tout aussi bien être causés par ces mêmes troubles. Cette ambiguïté existe également

lorsqu'il s'agit d'évaluer l'effet des ondes électromagnétiques. Il a été suggéré que l'exposition aux radiofréquences pouvait être associée aux troubles du comportement et aux difficultés d'apprentissage, mais on peut tout aussi bien rechercher un lien entre ondes et sommeil. Dès lors, il devient nécessaire d'explorer l'ensemble exposition aux ondes - troubles du sommeil - troubles du comportement ou difficultés d'apprentissage.



Aucune étude n'a évalué jusqu'à présent, de manière longitudinale, l'interaction possible entre problèmes du sommeil et exposition aux radiofréquences.



Le projet de recherche : ELFES

Aucune étude n'a évalué jusqu'à présent, de manière longitudinale, l'interaction possible entre problèmes du sommeil et exposition aux radiofréquences (sources proches et lointaines). D'autre part, l'enfance et la prime adolescence sont des périodes sensibles pour étudier cette association. Ce projet se concentre donc sur :

- la caractérisation de l'exposition (cerveau et corps entier) de l'enfant et de l'adolescent pendant différentes période de la journée ;
- la compréhension de l'association potentielle entre l'exposition aux radiofréquences et les problèmes du sommeil. Il s'agit notamment de déterminer si celle-ci serait due à des

sources proches ou lointaines, à l'utilisation de systèmes de communication sans fil eux-mêmes (par exemple la lumière émise par les écrans) ou à des causes préexistantes.

Pour améliorer les connaissances, le projet ELFES inclura des aspects nouveaux et originaux suivants :

- Une caractérisation complète, objective et détaillée tant de l'exposition longitudinale aux radiofréquences que du processus du sommeil ;
- Une distinction entre les effets liés à l'utilisation de systèmes de communication sans fil (ex. lumière bleue) et ceux liés aux niveaux d'exposition ;
- Une investigation de la causalité inverse possible de cette association (c'est-à-dire qu'on utilise une tablette ou un smartphone parce qu'on dort mal);
- Une enquête sur la corrélation entre troubles du comportement, fonction cognitive et problèmes de sommeil en lien avec l'exposition des enfants aux radiofréquences et dispositifs de communication sans fil.

Méthodologie

Le projet repose sur deux cohortes de naissance : la cohorte espagnole issue du projet INMA⁴⁹ et la cohorte hollandaise issue de l'étude GENERATION R⁵⁰.

Les partenaires :

Mònica Guxens

Instituto de Salud Global, Barcelone

Joe Wiart

Telecom Paris Tech

Maartje Luijk

Erasmus University Rotterdam

Durée : 40 mois

Financement : 199.561 €

Contact : monica.guxens@isglobal.org

⁴⁹ Cohorte de 657 couples « mère-enfant » recrutées de 2004 à 2006 dans la région de Sabadell : http://www.proyectoinma.org/en_index.html

⁵⁰ À partir d'un ensemble de 9.779 enfants examinés de 2002 à 2006, a été constitué un sous-échantillon de 1.500 enfants âgés de 11-13 ans et souffrant de problèmes du sommeil, troubles du comportement et développement des fonctions cognitives : <http://www.generationr.nl/researchers.html>



Champs électromagnétiques et vulnérabilité cérébrale

Effet des champs électromagnétiques GSM sur des modèles de vulnérabilité cérébrale : développement et neuro-inflammation

Anne-Sophie VILLÉGIÉ

Mots-clés : champ électromagnétique, radiofréquence, système GSM, rayonnement électromagnétique, modèle de vulnérabilité, inflammation, système nerveux, hypersensibilité, nociception

Parmi les innovations récentes, la téléphonie mobile a connu une progression fulgurante. Une conséquence en est que les expositions aux champs électromagnétiques (CEM) apparaissent de plus en plus tôt au cours de la vie (lors de l'adolescence, voire dès l'enfance), ce qui suscite des questionnements quant à leurs effets potentiels sur la santé humaine, en particulier sur le cerveau. D'autre part, on constate une augmentation d'incidence pour plusieurs pathologies neurodéveloppementales et neurodégénératives, comme l'autisme et la maladie d'Alzheimer. Leurs causes restent mal connues et on suspecte l'exposition à des substances toxiques présentes dans l'environnement, en lien avec la modification de notre style de vie ou l'effet de facteurs biologiques externes (infections virales...).

On peut se demander si les ondes électromagnétiques n'auraient pas un effet. De manière analogue, on assiste à l'émergence du syndrome d'hypersensibilité aux CEM. Il concerne une petite partie de la population qui s'auto-diagnostique hypersensible et souffre de symptômes non spécifiques subjectifs, qu'elle associe aux CEM.

Le projet de recherche : INFLAREF

Ce projet visait à tester l'hypothèse d'une interaction entre les radiofréquences et le système nerveux, lorsque celui-ci se trouve en état de vulnérabilité parce qu'il est en phase de développement ou est exposé à des agents agresseurs.

Méthodologie

Trois modèles de systèmes nerveux en état de vulnérabilité ont été mis au point :

- Un modèle de neuroinflammation chez le rat adolescent (obtenu par l'injection de lipopolysaccharides)
- Un modèle d'inflammation gestationnelle. Il s'agissait de produire une toxicité durant le développement fœtal, comme cela peut se produire lors d'une pathologie de la femme enceinte.
- Un modèle d'hypersensibilité nociceptive obtenu par la stimulation de la transmission de récepteurs glutaminergiques⁵¹. Ces récepteurs pourraient jouer un rôle dans le syndrome d'hypersensibilité chimique multiple. Nous posons l'hypothèse que des mécanismes similaires pourraient être impliqués dans l'apparition d'une hypersensibilité aux CEM.

Ces modèles ont été exposés à des CEM-RF simulant un signal GSM pendant un mois, cinq jours par semaine, et ceci avec des niveaux d'absorption spécifiques relativement élevés (1,5 à 6 W/Kg). Cette exposition était locale, soit au niveau de la tête chez l'adolescent ou au niveau de l'utérus dans le cas du modèle d'inflammation gestationnelle.

L'état neurobiologique a été évalué à partir de variables comportementales et biochimiques⁵².

Ineris, Verneuil-en-Halatte

⁵¹ Le glutamate est un neurotransmetteur exciteur du cerveau mammifère. Il agit sur des récepteurs qui modifient l'influx nerveux.

⁵² Les protéines GFAP (de l'anglais, « *glial fibrillary acidic peptide* ») et interleukines ont été quantifiées par le test immunologique ELISA.

Les niveaux d'anxiété, la perception et l'adaptation dans un environnement nouveau, la mémoire émotionnelle, le traitement de l'information sensorielle et le seuil de nociception (perception de la douleur) ont été évalués aux stades adolescent et/ou jeune adulte à travers des tests comportementaux : labyrinthe en croix surélevé, test du champ ouvert, conditionnement de peur, inhibition du réflexe de sursaut et test de préférence thermique.

Résultats

Les résultats indiquent que les modèles de vulnérabilité du système nerveux induits par des agents pro-inflammatoires ou pharmacologiques n'étaient pas plus vulnérables que les rats sains en réponse aux CEM-RF.

Par contre, on observe un effet des CEM-RF sur le seuil de nociception du rat adolescent sain. Pour confirmer ces résultats, des expériences complémentaires reproduisant ces résultats et examinant des durées plus longues d'exposition et des niveaux de puissance plus faibles seraient nécessaires.

De plus, une diminution significative de l'activité exploratoire du rat adolescent et adulte a été montrée à la suite d'expositions gestationnelles aux CEM-RF. Ce résultat est important puisqu'il met en évidence une période de vulnérabilité particulière face aux expositions aux CEM-RF, qui s'accompagne d'effets à long terme. Cette vulnérabilité peut être expliquée par le stade très immature des organismes exposés ainsi que par leur petite taille (entraînant une exposition aux CEM-RF plus importante). De même, des travaux à des niveaux de puissance plus faibles seraient nécessaires pour approfondir ces conclusions.

Les partenaires :

Anne-Sophie Villégier
Ineris, Verneuil-en-Halatte

Durée : 30 mois

Financement : 147 K€

Contact : Anne-Sophie.VILLEGIER@ineris.fr

Publications issues de ce projet

Petitdant N, Lecomte A, Robidel F, Gamez C, Blazy K, Villégier AS. Cerebral radiofrequency exposures during adolescence: Impact on astrocytes and brain functions in healthy and pathologic rat models. *Bioelectromagnetics*. 2016 Jul;37(5):338-50.
[doi: 10.1002/bem.21986](https://doi.org/10.1002/bem.21986). Epub 2016 Jun 7.



L'exposition aux radiofréquences considérée comme une astreinte

Réponses physiologiques d'adaptation ou d'évitement du rat juvénile exposé aux ondes radiofréquences type antenne relais

Véronique BACH et Amandine PELLETIER

Mots-clés : exposition, antenne, radiofréquence, adaptation, évitement, astreinte, hypersensibilité, homéostasie, sommeil, sommeil paradoxal

Il est bien connu que l'exposition de longue durée à des contraintes environnementales peut induire une adaptation qui a pour but d'accroître la résistance de l'organisme. Si cela a été démontré pour certaines d'entre elles (comme la contrainte thermique ou l'hypoxie d'altitude), aucune étude n'a, jusqu'à présent, porté sur l'adaptation à une exposition prolongée aux ondes radiofréquences (RF).

L'objectif principal de ce projet était de déterminer si une exposition chronique aux ondes radiofréquences type antenne relais (situation couramment rencontrée dans la population) de faible intensité (n'entraînant pas d'échauffement des tissus) était perçue par l'organisme.

Le projet de recherche : EVIREF

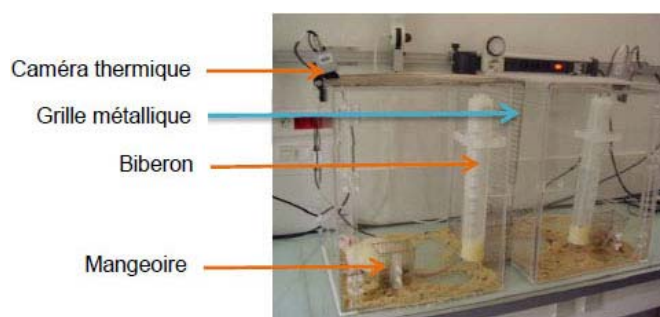
Dans une précédente étude⁵³ menée sur des rats exposés durant cinq semaines à un champ RF de type antenne relais (900 MHz, 1 V.m⁻¹), on a montré qu'il existait une fragmentation du sommeil paradoxal (sans modification de sa durée) et une augmentation de la prise alimentaire. D'autre part, on a observé le maintien d'une vasoconstriction périphérique en présence de radiofréquences lorsque la température d'air était de 31°C. Mais ces résultats n'étaient pas significatifs à une température plus basse (24°C). L'hypothèse émise était que les effets des ondes devenaient plus apparents en présence d'une contrainte thermique.

On peut supposer que ces réponses physiologiques sont « coûteuses » pour l'organisme. Si tel est le cas,

l'animal cherchera à éviter les situations qui les génèrent en choisissant un environnement plus favorable. S'il ne peut les éviter, son organisme s'adaptera à cet environnement. Le but du projet est de tester cette hypothèse.

Méthodologie

Les expérimentations ont été réalisées dans un dispositif appelé « radiopreferendum ». Spécialement conçu au sein du laboratoire, il est constitué de deux enceintes identiques reliées par un tunnel, entre lesquelles l'animal peut circuler librement. La température des enceintes est identique et elle peut être réglée à 24 ou 31 degrés. Elles sont conçues de telle sorte qu'on puisse y ajouter des radiofréquences dans l'une ou l'autre. Il s'agit de voir si la présence d'ondes influence la manière dont l'animal choisit l'enceinte qu'il occupe. L'hypothèse de départ est que l'animal choisira l'enceinte dans laquelle l'environnement lui sera le plus favorable.



Radiopreferendum

Le modèle d'étude était le rat juvénile : dès l'âge de trois semaines. Les animaux étaient ainsi exposés durant leur croissance jusqu'à leur maturité sexuelle,

⁵³ Pelletier et al. 2013.

afin d'observer les répercussions de l'exposition durant l'adolescence comme à l'âge jeune adulte (enregistrements à l'âge de huit semaines). Un tirage au sort a été effectué pour les répartir dans deux groupes de neuf animaux, selon la valeur de la température d'air dans le « radiopreferendum »⁵⁴ : 24°C pour le groupe « 24 » et 31°C pour le groupe « 31 ».

Les fonctions physiologiques mesurées sont trois des fonctions principales impliquées dans l'homéostasie énergétique : le sommeil, la température cutanée et la prise alimentaire.

Résultats

Les principaux résultats peuvent se résumer ainsi :

- Durant le jour (période où le rat passe principalement son temps à dormir), les animaux préfèrent l'enceinte la moins exposée, quelle que soit le groupe de température ambiante. Ce choix est accompagné d'une durée de sommeil plus longue en raison du sommeil lent. De façon intéressante, la durée (en minutes) du sommeil paradoxal n'est pas augmentée à 24°C (contrairement à la condition de 31°C) alors que le temps passé dans cette enceinte est significativement augmenté.
- La nuit (période où le rat est très actif), la situation est inversée ; les animaux du groupe « 24 » préfèrent l'enceinte la plus exposée tandis que les animaux du groupe « 31 » ne manifestent pas de réelle préférence.

Cette étude est la première à montrer que l'organisme est sensible à une exposition aux champs électromagnétiques et la considère comme une astreinte, comme en témoigne la stratégie d'évitement de l'animal. Ainsi, bien que l'exposition soit chronique, les animaux n'ont pas mis en place de réponses adaptatives durables et adéquates face à ce stress environnemental. Il est intéressant de noter que l'animal choisit l'environnement moins exposé aux ondes RF seulement durant le jour car c'est la période durant laquelle il est le plus vulnérable

puisque'il dort beaucoup pendant cette période.

Ce résultat reste à confirmer. D'une part, les analyses portant sur les durées relatives des stades de sommeil (relativement à la durée totale dans l'enceinte) sont actuellement en cours. D'autre part, cette étude a été réalisée sur une population juvénile, population plus sensible aux champs électromagnétiques car les organes et les fonctions physiologiques sont en cours de développement. Il se pourrait donc que la double contrainte (exposition et température ambiante) soit trop importante à gérer pour l'organisme avec des répercussions sur le sommeil paradoxal, stade particulièrement important chez les jeunes pour la maturation cérébrale, l'apprentissage et la mémorisation. Ainsi, les résultats obtenus renforcent le message de prévention émis par l'Anses à destination des enfants et adolescents, qui préconise de limiter l'exposition de cette population à tous dispositifs émetteurs (ex. téléphone, tablette).

Toutefois, cette étude ne permet pas de savoir par quel(s) mécanisme(s) biologique(s) l'exposition agit sur l'organisme.

Les partenaires :

Véronique Bach et Amandine Pelletier

Université Picardie Jules Verne, UFR médecine, laboratoire Peritox UMR I 01, Amiens

René De Sèze

Ineris, Verneuil-en-Halatte

Christian Person

Telecom Bretagne, Brest

Durée : 28 mois

Financement : 175 K€

Contact : veronique.bach@u-picardie.fr

⁵⁴ Selon le principe de la double exposition décrit ci-dessus.

La définition de l'hypersensibilité électromagnétique

Recherche sur la définition de l'hypersensibilité électromagnétique

Daniel BENAMOUZIG, Pascal CATHÉBRAS et Maël DIEUDONNÉ

Mots-clés : hypersensibilité, incertitude, vulnérabilité, représentation, fibromyalgie, symptomatologie, attribution

Un nombre croissant de personnes déclarent souffrir d'hypersensibilité aux champs électromagnétiques et militent pour la reconnaissance de ce trouble. Ce dernier reste cependant mal connu. L'incertitude qui l'entoure touche en particulier sa définition.

“ *L'incertitude qui entoure l'hypersensibilité électromagnétique touche en particulier sa définition.* ”

Un problème de définition

L'examen de la littérature montre que la définition de l'hypersensibilité électromagnétique renvoie simultanément à trois phénomènes différents, qui ne sont pas exclusifs :

1. Une capacité sensorielle, non pathologique, à percevoir les champs électromagnétiques ;
2. Une susceptibilité organique aux champs électromagnétiques, faisant de ces derniers un facteur de provocation ou d'aggravation de maladies par ailleurs bien connues (ex. cancer) ;
3. Un trouble particulier, spécifiquement provoqué par les champs électromagnétiques.

Le premier phénomène a fait l'objet de plusieurs investigations. Des études de provocation ont été réalisées en double aveugle sur des personnes issues de la population générale ou se considérant électro-hypersensibles⁵⁵.

La capacité des personnes à percevoir sensoriellement des champs électromagnétiques provenant de sources variées (ex. antennes-relais de téléphonie mobile) n'a pu être mise en évidence, aucun des sujets n'ayant détecté avec exactitude les champs, ni rapporté plus de symptômes ou de réactions physiologiques objectivables lors d'expositions réelles. Le deuxième phénomène relève de la problématique des effets sanitaires des champs électromagnétiques. Elle a fait l'objet de nombreuses investigations, portant par exemple sur l'effet de champs sur certaines maladies neurologiques (ex. maladie d'Alzheimer, épilepsie), sur la cancérogenèse ou encore sur le fonctionnement des systèmes immunitaire, endocrinien et cardio-vasculaire. Dans la gamme des radiofréquences, il n'a jamais été démontré avec un niveau de preuve suffisant que ces champs exerçaient un effet sanitaire. Pour autant, rien ne permet d'exclure la possibilité que certains êtres humains, trop peu nombreux pour être représentés de manière significative dans les études épidémiologiques, présentent une susceptibilité particulière aux champs électromagnétiques. Les analyses disponibles ne fournissent cependant aucune piste de recherche.

Enfin, les travaux consacrés au troisième phénomène n'ont permis ni d'en caractériser précisément la symptomatologie, ni d'établir l'implication des champs électromagnétiques, ni enfin de démontrer l'efficacité de certaines prises en charge ou traitements. La compréhension de l'hypersensibilité électromagnétique comme trouble spécifique apparaît aussi lacunaire qu'insatisfaisante, et les incertitudes qui entourent ce trouble restent nombreuses.

⁵⁵ Les expérimentateurs demandaient aux personnes si elles s'estimaient exposées à un moment donné. Ni les expérimentateurs ni les sujets ne savent si le champ est présent durant l'expérience.

Le projet de recherche : REDHÉM

Le point de départ de cette étude de faisabilité est un paradoxe :

- D'un côté, la définition pratique de l'hypersensibilité électromagnétique demeure irréductiblement liée aux déclarations des personnes qui s'en considèrent atteintes⁵⁶ ;
- De l'autre, les processus conduisant certaines personnes à estimer qu'elles sont hypersensibles aux champs électromagnétiques n'ont jamais fait l'objet d'investigation systématique et demeurent largement inconnus.

Cette étude vise à identifier avec un petit nombre de personnes se considérant hypersensibles les éléments qui fondent cette conviction, qu'il s'agisse de problèmes de santé, d'expériences vécues, de pratiques ou de représentations préalables ou encore de trajectoires biographiques. Elle permet ce faisant d'élaborer un cadre opératoire permettant d'appréhender l'hypersensibilité électromagnétique qui puisse faciliter son exploration ultérieure.

Methodologie

L'originalité de l'étude est de ne pas concevoir les éléments qui fondent la conviction d'être hypersensible en termes exclusivement médicaux ou psychiatriques, mais aussi en termes socio-cognitifs. L'étude se décompose en deux volets.

1. L'un est à dominante sociologique et se fonde sur la méthode de l'entretien compréhensif semi-directif, qui permet une démarche exploratoire.
2. L'autre est à dominante médicale, et se fonde sur la consultation en médecine générale, qui permet une fonction de contrôle.

Ces deux volets sont mis en œuvre séparément mais leur conception et leur analyse sont réalisées conjointement par les chercheurs participant à l'étude.

Afin de faciliter l'identification des spécificités de l'hypersensibilité électromagnétique, une

comparaison est prévue avec un échantillon de personnes souffrant d'un autre syndrome médicalement inexpliqué, mais non attribué à l'environnement : la fibromyalgie.

Les partenaires :

Daniel Benamouzig

Centre de Sociologie des Organisations – Sciences Po – Paris

Pascal Cathebras

CHU de Saint-Etienne – Service de médecine interne – Saint-Etienne

Magali Robelet

Centre Max Weber – Lyon

Durée : 24 mois

Financement : 48 K€

Contact : daniel.benamouzig@sciences-po.fr

⁵⁶ La présence d'autres maladies ou troubles susceptibles d'expliquer les symptômes rapportés étant souvent considérés comme des critères d'exclusion.

Téléphones mobiles et santé

La cohorte Cosmos-France, une étude adossée à Constances

Isabelle DELTOUR

Mots-clés : cohorte, exposition, téléphone mobile, champs électromagnétique, radiofréquence

Cosmos est une étude de cohorte internationale qui vise à évaluer si l'usage des téléphones mobiles et autres technologies de communication sans fil (ex. Wifi, sans fil DECT, tablettes) a des conséquences pour la santé humaine. La France est le sixième pays participant après le Danemark, la Finlande, la Suède, les Pays-Bas et le Royaume Uni⁵⁷. L'objectif est d'observer sur une longue période les pathologies apparaissant dans une population aussi vaste que possible et de chercher un lien éventuel entre ces pathologies et l'usage de terminaux mobiles. La cohorte Cosmos inclut actuellement 290.000 participants⁵⁸ et le consortium reste ouvert à de nouveaux partenaires. Seul un grand nombre de participants permettra en effet d'établir ou d'infirmer des corrélations entre un excès de risque pour certaines pathologies et l'usage des nouvelles technologies de communication.

Fin 2013, l'Anses a confié au Centre international de Recherche sur le Cancer, la mise en œuvre de cette participation française, Cosmos-France.

La cohorte Cosmos-France

La cohorte Cosmos-France est adossée à une cohorte déjà existante, financée dans le cadre du Programme Investissements d'avenir et par l'Assurance Maladie, la cohorte Constances⁵⁹. En d'autres termes, les participants de Cosmos-France sont recrutés parmi les 200.000 participants de Constances.

L'une des difficultés de ce type d'étude est l'évaluation des expositions aux radiofréquences. La

méthode couramment pratiquée est fondée sur la localisation du lieu de résidence et des questionnaires sur l'usage du téléphone, avec toutefois des incertitudes sur les temps d'utilisation. Les promoteurs de l'étude Cosmos ont choisi d'aller au-delà, en recoupant diverses données. Les expositions sont évaluées à partir de données issues de sources variées mais aussi de données de trafic issues des opérateurs. Les données de trafic donnent accès à d'une information objective sur les consommations téléphoniques et pallient les difficultés des participants à évaluer leur consommation téléphonique. L'équipe de recherche sollicite les volontaires Constances à autoriser la communication de leurs volumes de trafic téléphonique pendant trois mois par an par leurs opérateurs de téléphonie mobile ; un dispositif spécifique a été mis en place pour concilier anonymisation des données et possibilité de recoupement avec l'apparition de problèmes de santé.

Une fois obtenue l'autorisation de la gouvernance de Constances, la première partie du projet a consisté à obtenir d'une part les accords des opérateurs (Orange, Bouygues Telecom, SFR) et d'autre part à obtenir l'autorisation de la Commission nationale Informatique et Liberté. Les recrutements de participants vont démarrer en 2017. On vise le recrutement de 15.000 personnes au moins.

Ensuite la logistique de Constances permettra de suivre l'état de santé des participants à Cosmos au cours du temps et de répertorier l'apparition de

Centre international de Recherche sur le Cancer, section Environnement et Radiation, Lyon

⁵⁷ Site internet : www.thecosmosproject.org/

⁵⁸ 105.000 au Royaume Uni, 90.000 aux Pays-Bas, 50.000 en Suède, 30.000 au Danemark et 15.000 en Finlande.

⁵⁹ Cohorte épidémiologique « généraliste » constituée d'un échantillon représentatif de 200.000 adultes âgés de 18 à 69 ans (à l'inclusion), consultants des Centres d'examen de santé (CES) de la Sécurité sociale. Site internet : <http://www.constances.fr/>

diverses pathologies. Les cancers et les tumeurs bénignes du cerveau, du sang et de la peau, les maladies neurologiques (par exemple, la maladie d'Alzheimer), les accidents vasculaires cérébraux, et différents symptômes (ex. pertes d'audition, acouphènes, maux de têtes migraineux, troubles du sommeil), la qualité de vie, et de la mémoire entrent dans cette liste.

À la fois les données de trafic et les questionnaires de santé sont normalisés au niveau de l'Europe. L'ensemble des données permettra de comparer le risque d'apparition de pathologies chez des personnes très peu exposées et d'autres plus exposées.

Les partenaires :

Joachim Schüz et Isabelle Deltour

Centre international de Recherche sur le Cancer, section Environnement et radiation, Lyon

Marie Zins, Marcel Goldberg et Céline Ribet

UMS 011 Inserm-UVSQ, "Cohortes épidémiologiques en population" - Infrastructure Constances

Durée : 84 mois

Financement tranche 1 (CRD 2013 Anses-CIRC) :
328 k€ (HT)

Contact : DeltourI@iarc.fr


Glossaire


2G	<i>Cf. GSM.</i>
3G	<i>Cf. UMTS.</i>
4G	<i>Cf. LTE.</i>
A	
ANFR	<i>Agence nationale des fréquences.</i>
Arcep	Autorité de régulation des communications électroniques et des postes.
B	
BAN	De l'anglais, " <i>Body Area Network</i> " : réseau corporel sans fil (utilisé par ex. dans les domaines sportif et de la ré-éducation physique) qui consiste à interconnecter sur, autour ou dans le corps humain des dispositifs pouvant effectuer des mesures (capteurs) ou agir de façon active (actionneurs).
C	
CIRC	Centre International de Recherche sur le Cancer.
D	
DAS	Débit d'Absorption Spécifique (aussi connu sous sa dénomination anglais "SAR") : indice correspondant à la puissance électromagnétique absorbée par les tissus du corps (sous forme de chaleur). Il s'exprime en watt par kilogramme.
DECT	De l'anglais, " <i>Digital Enhanced Cordless Telecommunications</i> " (téléphone sans fil). C'est une norme de communication utilisée par les téléphones sans fil définissant la manière dont un combiné téléphonique communique avec la base.
E	
EHS	« Électrohypersensibilité », ou Hypersensibilité aux ondes électromagnétiques.
ELF	" <i>Extremely low frequency</i> " (Extrêmement basse fréquence). Ce terme s'applique aux ondes électromagnétiques basses fréquences générées par des phénomènes naturels ou des dispositifs par exemple liés au transport d'électricité comme les lignes haute tension ou les transformateurs.
ELISA	De l'anglais, " <i>Enzyme-linked immunosorbent assay</i> ". Test permettant par exemple de détecter la présence d'un anticorps dans le sérum.
EM	Electromagnétique.
F	
FDTD	De l'anglais, " <i>Finite Difference in Time Domain</i> " : méthode de calcul utilisée pour résoudre les équations de Maxwell décrivant la propagation des ondes électromagnétiques.
G	
GFAP	De l'anglais, " <i>Glial fibrillary acidic peptide</i> ". Elle se trouve dans des structures en forme de filament présentes dans diverses cellules du système nerveux.
GSM	De l'anglais, " <i>Global System for Mobile Communications</i> " : norme utilisée dans les télécommunications mise en service dans les années 1990. Elle concerne des bandes de fréquences autour de 900 MHz et de 1800 MHz. Elle est adaptée à des transmissions à faibles débits comme la voix. Elle est également connue sous l'appellation "2G".
I	
ICNIRP	" <i>International Commission on Non-Ionizing Radiation protection</i> " : instance internationale domiciliée en Allemagne qui a pour mission d'évaluer le risque associé à des rayonnements non ionisants et de proposer des valeurs limites d'exposition.
Injection IP	Injection intrapéritonéale.
IRM	Imagerie par résonance magnétique.
ITU	" <i>International Telecommunication Union</i> " : Agence des Nations Unies qui travaille sur des questions techniques sur les radiofréquences et la normalisation.
L	
LAN	De l'anglais, " <i>Local Area Network</i> " : réseau informatique local c'est-à-dire à une échelle géographique relativement restreinte (ex. site d'entreprise, habitation particulière...).

LPS	Lipopolysaccharides. Ce sont des molécules qui se trouvent sur la face externe de certaines bactéries. Ces molécules sont connues pour provoquer des réactions inflammatoires.
LTE	De l'anglais, " <i>Long Term Evolution</i> " : norme de communication, apparue dans les années 2010, qui permet des débits de communication importants. Elle est connue sous l'appellation "4G".
M	
MHz	Mégahertz. Les ondes utilisées en téléphonie mobile ont des fréquences de l'ordre du millier de MHz.
O	
OEM	Ondes électromagnétiques.
OMM	Ondes millimétriques. Ce sont des ondes électromagnétiques dont la fréquence se mesure en dizaine de milliers de MHz. Elles sont nommées ainsi parce que leur longueur d'onde se mesure en millimètre (Une onde à 60 000 MHz a une longueur d'onde de 5 mm).
R	
RF	Radiofréquences.
RFID	De l'anglais, " <i>Radio frequency identification</i> " : cette technologie utilise des ondes radiofréquences qui permettent un échange d'information entre un interrogateur et un dispositif souvent appelé « étiquette », sans contact.
S	
SAR	<i>Cf. DAS.</i>
SIM	De l'anglais, " <i>Subscriber Identity Module</i> " : carte à puce qui contient des informations permettant d'identifier l'abonné à un service de téléphonie mobile.
SNC	Système nerveux central.
U	
UMTS	De l'anglais, " <i>Universal Mobile Telecommunications System</i> " : norme de communication déployée dans les années 2000 qui permet des transmissions beaucoup plus rapides que la génération précédente. Elle est également connue sous l'appellation "3G".
V	
VoIP	Voix sur IP (de l'anglais, " <i>Voice over IP</i> "). Technique permettant de transmettre les voix par Internet.
w	
WBSAR	De l'anglais, " <i>Whole Body averaged Specific Absorption Rate</i> " : puissance absorbée lors de l'utilisation d'un appareil, moyennée sur l'ensemble du corps (<i>cf. SAR ou DAS</i>).
Wi-Fi	De l'anglais, " <i>Wireless Fidelity</i> " : ensemble de protocoles de communication sans fil.
WLAN	De l'anglais, " <i>Wireless LAN</i> " : réseau LAN sans fil (<i>cf. LAN</i>).
WPAN	De l'anglais, " <i>Wireless Personal Area Network</i> " : réseau individuel sans fil, qui permet à des objets situés près de leur propriétaire de communiquer. C'est par exemple le cas d'une montre ou d'un casque audio connecté et d'un <i>smartphone</i> .
WPT	De l'anglais, " <i>Wireless Power Transfer</i> " (transfert d'énergie sans fil) : technique permettant de transmettre de la puissance électrique sans contact, celle-ci étant transportée par une onde électromagnétique. Elle est utilisée par exemple dans les chargeurs de batterie sans fil.

 **Mentions légales**

Ce dossier a été réalisé par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) dans le cadre de l'animation et de la valorisation du Programme National de Recherche en Environnement-Santé-Travail (PNR EST).

Nous remercions l'ensemble des contributeurs, et plus particulièrement Régine Boutrais, Agnès Brion, Paulina Cervantès, Fabrice Coutureau, Laëtitia Dubois, Aude Guérin, Sophie Guitton, Delphine Lascar, Gérard Lasfargues, Louis Laurent, Céline Leterq, Alima Marie, Olivier Merckel, Jean-Nicolas Ormsby, Aurélie Pajon, Sophie Parel, Anne Tilloy.

 **Directeur de la publication :**

Roger GENET (Directeur général, Anses)


 **Conception et réalisation :**

Nathalie RUAUX (Direction Recherche et Veille, Anses)

 **Remerciements pour les crédits photographiques :**

Sauf mention contraire, les illustrations proviennent de la banque d'images Getty. Les photographies fournies par les chercheurs sont libres de droit et/ou disponibles selon les termes de la *Creative Commons Paternité version générique 2.5* ou versions ultérieures (inspirés des termes de la GNU Free Documentation Licence) : <http://creativecommons.org/licenses/>



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  @Anses_fr

