



HAL
open science

Radiofréquences et santé

Nathalie Ruaux

► **To cite this version:**

Nathalie Ruaux. Radiofréquences et santé: Comprendre où en est la recherche. Radiofréquences et santé, 2022. anses-04107302

HAL Id: anses-04107302

<https://anses.hal.science/anses-04107302>

Submitted on 26 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Radiofréquences et santé

Comprendre où en est la recherche

Novembre 2022



anses

L'Anses et les effets sanitaires des radiofréquences

L'essor des technologies de communications se traduit par une grande variété d'objets connectés et de services sans fil utilisant des radiofréquences : babyphones, caméras de sécurité, écouteurs, lunettes, montres, porte-clés, tensiomètres... Cette croissance exponentielle n'est pas sans susciter des questionnements qui font l'objet d'une actualité permanente tant du point de vue scientifique et réglementaire que du point de vue politique et sociétal. L'essor des usages est de nature à augmenter l'exposition de la population générale *via* de nouveaux émetteurs fixes, de nouveaux équipements mobiles ou de nouveaux usages (ex. équipement porté près du corps, voire à l'intérieur du corps ou à même la peau).

Depuis plusieurs années, l'Anses est impliquée dans des activités d'expertise dans presque tous les domaines du spectre électromagnétique non ionisant : depuis les extrêmement basses fréquences jusqu'aux ondes millimétriques. En ce qui concerne le déploiement des technologies 5G, l'Agence a collaboré avec l'ANFR pour recueillir les premières mesures d'exposition du public réalisées avant et après la mise en service de la 5G sur 1.500 sites implantés en France. De plus, elle a réalisé du 20 avril au 1^{er} juin 2021 une consultation ouverte pendant laquelle les citoyens pouvaient apporter des contributions et observations sur le rapport d'expertise publié en avril 2021. D'où l'avis actualisé de l'Anses de février 2022 soutenu par un rapport d'expertise complété et enrichi de nouvelles données.

Au regard de l'évolution rapide des technologies qui conduit à l'exploitation de nouvelles bandes de fréquences (comme celles des 3,5 GHz et 26 GHz pour la 5G, en France), il semble primordial, d'une part, d'adapter les méthodologies de mesure et d'évaluation de l'exposition et, d'autre part, d'étudier les effets biologiques et sanitaires des ondes électromagnétiques dans ces bandes de fréquences. À ce jour, le nombre d'utilisateurs et le trafic 5G restent encore limités en France dans la bande de 3,5 GHz tandis que la bande des 26 GHz n'est pas encore exploitée par les opérateurs de téléphonie mobile. La mission de l'Anses s'inscrit dans un contexte en cours de développement et les données disponibles dans la littérature sont encore peu nombreuses.

Pour estimer l'incidence sur la santé et l'environnement des technologies 5G, l'Agence poursuit régulièrement son travail de veille et d'actualisation scientifique. Suite à la production récente de nombreuses données issues de nouvelles études mécanistiques, mais aussi d'études épidémiologiques comme *Mobi-kids* (décembre 2021) ou l'étude clé du « National Toxicology Program » (août 2020) sur le développement de tumeurs chez des rongeurs exposés à des signaux de téléphonie mobile, une expertise s'intéressant aux effets cancérigènes des radiofréquences est en cours à l'Anses, toutes bandes de fréquences confondues.

Enfin, l'Anses s'investit dans la production de nouvelles connaissances scientifiques en soutenant la recherche sur les effets sanitaires des radiofréquences. Ce *Cahier de la recherche* présente ainsi onze projets financés entre 2017 et 2020 via l'appel à projets de recherche

« radiofréquences et santé » du Programme national de recherche environnement-santé-travail (PNR EST). Des projets dits d'investigation exploratoire (PIE) permettent par ailleurs d'acquies de nouvelles connaissances en réponse aux questionnements soulevés par la société civile, par exemple sur les symptômes déclarés à proximité des antennes relais, l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques ou encore les expositions aux nouveaux signaux de télécommunications mobiles dont la 5G. Le besoin de ce type de projet a été identifié grâce au dialogue engagé depuis 2011 avec les parties prenantes associatives ou professionnelles dans le cadre du comité de dialogue « Radiofréquence et santé ».

Pr Benoit VALLET

Directeur général, Anses

Cahiers de la Recherche RADIOFREQUENCES ET SANTE		# 20
11	36	2,37
Projets valorisés	Équipes de recherche impliquées	Millions d'euros alloués

Sommaire

L'Anses et les effets sanitaires des radiofréquences.....	1
Sommaire	3
Introduction générale.....	5
Les voitures connectées	15
Signaux 5G et expositions multiples	17
Les effets potentiels des radiofréquences sur les thermorécepteurs.....	20
Les biais (facteurs) de confusion	22
Usages et exposition des enfants aux nouvelle technologies	24
Le rat comme modèle animal d'étude de l'hypersensibilité électromagnétique.....	26
Nouvelle approche de mesure de l'activité cérébrale sous RF	29
Variation des effets intracérébraux des radiofréquences selon l'état de santé	31
L'exposition prénatale au Wifi	33
Dommmages à l'ADN et ondes millimétriques.....	35
La réponse adaptative aux radiofréquences	38
Abréviations utilisées.....	40
Table des illustrations	42
Mentions légales.....	43
Archives ouvertes.....	44

Avertissement à l'attention des lecteurs

Les présentations des projets de recherche reflètent les points de vue des équipes scientifiques partenaires et n'engagent ni les Ministères de tutelles ou l'Anses et les partenaires associés. Pour toute question, les contacts sont indiqués en tête de chaque article.

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 links for 'Europe & International', 'Collectifs d'experts', 'Programme de recherche', 'Espace presse', and 'FR'. Social media icons for Twitter, Facebook, LinkedIn, and YouTube are also present. Below the navigation bar, the ANSES logo and the text 'Actualités', 'Explorer nos sujets', 'Nous connaître', and 'Nos publications' are visible. The main content area features a date '26/11/2021' and the title 'Les cahiers de la recherche'. A featured article is displayed with a thumbnail image of the journal cover. The article title is 'Notre dernier numéro : Cahier de la recherche n°18 : "L'exposition des enfants" - Comprendre où en est la recherche. (PDF)'. The text of the article discusses chronic diseases, genetic specificities, and the role of epigenetics in development, mentioning examples like the sex of a tortoise egg and the caste of a bee larva.

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

Introduction générale

Depuis l'invention du téléphone à ficelle en 1665, différents dispositifs ont été imaginés pour pouvoir transmettre et recevoir *la voix humaine à distance* : depuis les « tuyaux de conversation » de Jeremy Bentham (1748-1832)¹ aux dispositifs téléphoniques d'Antonio Meucci (1849), de Johann Philipp Reis (1859), d'Alexander Graham Bell et Elisha Gray (1876). Pour fonctionner à grande distance, ces dispositifs nécessitaient une infrastructure ou un réseau de fils électriques qui suivaient principalement les voies de chemin de fer. Aux États-Unis, la première ligne publique fut exploitée en 1880 entre Boston (Massachusetts) et Providence (Rhode Island). En France, un premier réseau urbain fut lancé à Paris en 1879 avant d'être déployé dans les grandes villes françaises². À cette époque, depuis l'invention du télégraphe, on arrivait à transmettre des messages visuels³ ou sonores⁴, mais en aucune manière de voix articulée.

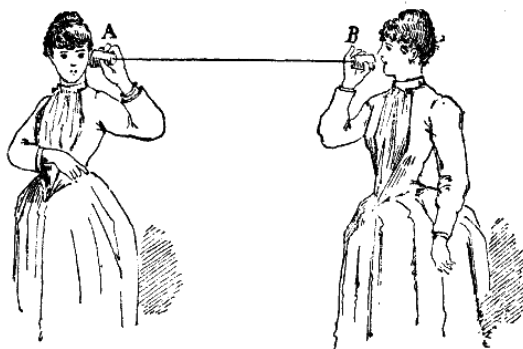


Illustration 1 : Téléphone acoustique de Hooke

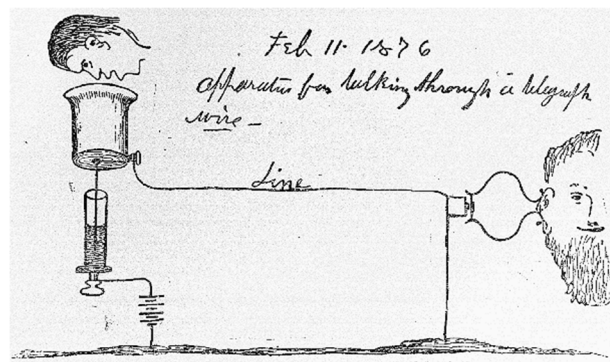


Illustration 2 : Premier schéma du téléphone (Elisha Gray)

Comment faire pour dialoguer à distance ? « Je me suis demandé, par exemple, si la parole elle-même ne pourrait pas être transmise par l'électricité (...) La chose est praticable » écrivait Charles Bourseul⁵ en 1854. Voici comment : le son de la voix fait vibrer une membrane reliée à un aimant, qui (en vibrant à son tour) produit des impulsions électriques. Ces impulsions sont ensuite transmises par des fils électriques (conducteurs) jusqu'au récepteur. Et vice versa.

Faute de crédits de recherche, le savant français ne put poursuivre ses travaux. C'est ainsi qu'Alexander Graham Bell, alors qu'il travaillait avec son assistant⁶ sur un prototype de télégraphe harmonique, réussit pour la première fois en 1876 à transmettre la voix humaine grâce à l'électricité.

Les ondes radio ou hertziennes

Dix ans plus tard, Heinrich Hertz constata au cours d'une expérience que la décharge d'un petit émetteur produit des étincelles sur une bobine voisine. Il essaya de reproduire ce nouveau phénomène à plusieurs reprises, en rapprochant systématiquement émetteur et récepteur. Cela fonctionna : à une distance de deux mètres, le récepteur émit lui aussi des décharges électriques, confirmant selon le

¹ Pour la communication interne dans ses projets de prison panoptique.

² En 1912, on comptait 1 téléphone pour 183 habitants.

³ Télégraphe optique de Claude Chappe (1794).

⁴ Code morse (1832).

⁵ Charles Bourseul, extrait de l'article de presse publié dans *L'Illustration* du 26 août 1854.

⁶ Thomas A. Watson.

physicien *les lois de l'électromagnétisme*⁷ : « Nous avons simplement ces ondes électromagnétiques mystérieuses que nous ne pouvons voir à l'œil nu. Mais elles sont là. »

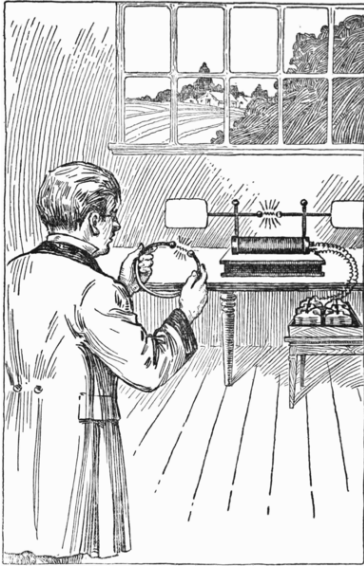


Illustration 3 : L'expérience de Hertz (1886)



Illustration 4 : Le théâtrophone (affiche de Jules Chéret, 1896)

Ainsi, le rayonnement électromagnétique se manifeste sous la forme d'un champ électrique couplé à un champ magnétique. Il se propage sous la forme de petites vagues (ou oscillations), un peu comme une onde à la surface de l'eau après y avoir jeté un caillou⁸. Pour convaincre de l'existence des ondes électromagnétiques, Heinrich Hertz multiplia les expériences⁹ se livrant à un travail acharné jusqu'à sa mort, le 1^{er} janvier 1894. Il ne se doutait pas que sa découverte serait à la base d'un grand nombre d'inventions comme la radio.

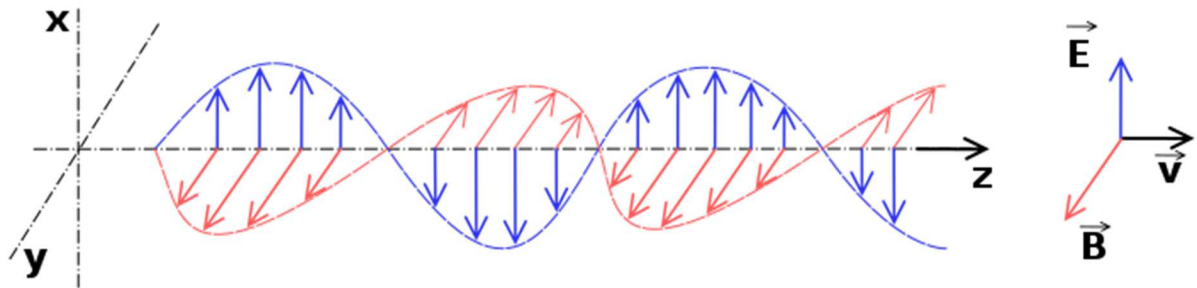


Illustration 5 : Onde électromagnétique, oscillation couplée du champ électrique (E) et du champ magnétique (B)

L'italien Guglielmo Marconi poursuivit ses travaux en 1895 en essayant de les améliorer avec l'utilisation de nouveaux matériels : radioconducteur (cohéreur) d'Édouard Branly, antenne d'Alexandre Popov... Si bien qu'il réalisa la première transmission radio transatlantique entre l'île de Terre-Neuve (Canada) et le comté des Cornouailles (Angleterre) en 1901.

⁷ Théorie de James Maxwell selon laquelle « la lumière et le magnétisme sont deux phénomènes de même nature et que la lumière est une perturbation électromagnétique se propageant dans l'espace selon les lois de l'électromagnétisme » (*A dynamical theory of the Electromagnetic Field*, 1864).

⁸ Pour l'anecdote, on raconte qu'Alexander Graham Bell eut une certaine intuition de la transmission du son en observant les ondes de l'eau sur une rivière.

⁹ Pour détecter les ondes et les rendre perceptibles, mesurer leur fréquence à l'aide d'un stroboscope à miroir tournant, vérifier les équations de propagation de Maxwell...

Pour diffuser une émission, la voix est transformée en signal électrique par le micro. Ce signal oscille au même rythme que la voix ; ils ont la même fréquence (exprimée en hertz). L'antenne émet une onde électromagnétique modulée, qui se propage jusqu'à l'antenne réceptrice du poste de radio.



Illustration 6 : Schéma transmission radio

Aussi appelées radiofréquences (RF), les ondes radio ou hertziennes s'étendent, en termes de fréquence, de dix kilohertz (KHz) à trois cents gigahertz (GHz)¹⁰. Elles parcourent des distances plus ou moins longues. Plus la fréquence des ondes est faible, plus elles se propagent loin et inversement. Le Bluetooth (2,4 GHz), par exemple, a une portée de quelques mètres et les radios FM (entre 87,5 et 108 MHz) une portée de quelques dizaines de kilomètres.

En France, les premières émissions régulières de radio commencèrent la veille de Noël 1921 avec Radio Tour Eiffel¹¹, captée par une poignée de « sans-filistes » sur une longueur d'onde de 2.650 mètres. Contrairement aux stations américaines qui émettent en ondes courtes et moyennes, les premières stations françaises choisissent d'émettre en ondes longues, à la fois pour des raisons techniques et commerciales. D'une part, elles sont mieux captées ; d'autre part, elles ne peuvent être captées par les récepteurs américains (protection de l'industrie radioélectrique naissante en France). Cent ans plus tard, les radiofréquences sont présentes partout : utilisées par les téléphones mobiles, les tablettes, les assistants de navigation (GPS), les objets connectés, les fours micro-ondes, les lasers, etc. Selon l'Insee, plus de 95% de la population âgée de plus de 15 ans est équipée d'un téléphone mobile. Et plus de 40 millions de personnes écoutent la radio chaque jour¹².

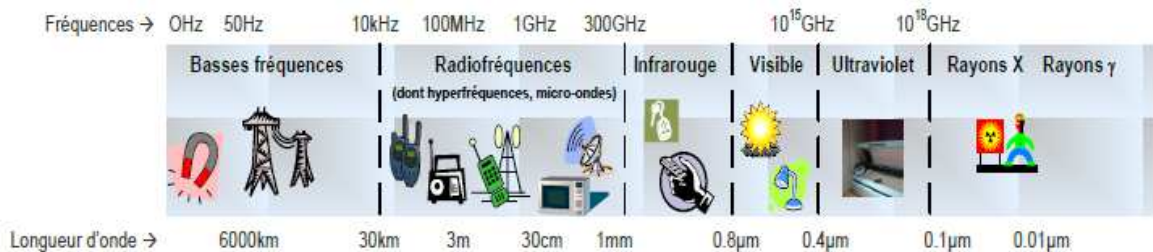


Illustration 7 : Le spectre des ondes électromagnétiques

¹⁰ Selon la définition de l'Union internationale des télécommunications (UIT) : <https://www.itu.int>

¹¹ Du 24 décembre 1921 au 6 juin 1940.

¹² Insee, *Enquête sur les TIC auprès des ménages entre 2009 et 2021*.

Les ondes électromagnétiques se caractérisent par un ensemble de paramètres : la fréquence, la longueur d’onde, l’intensité du champ¹³ électrique, l’intensité du champ magnétique, la vitesse de propagation, etc. « Comme toutes les ondes électromagnétiques, les radiofréquences peuvent interagir avec la matière vivante selon leur fréquence et leur intensité. » Yann Percherancier précise¹⁴ : « Elles peuvent se propager dans la matière : donc, dans notre organisme. » Si les êtres humains sont exposés depuis longtemps au rayonnement électromagnétique artificiel, notamment par la radio, ses effets biologiques sont très discutés en raison de résultats contradictoires.

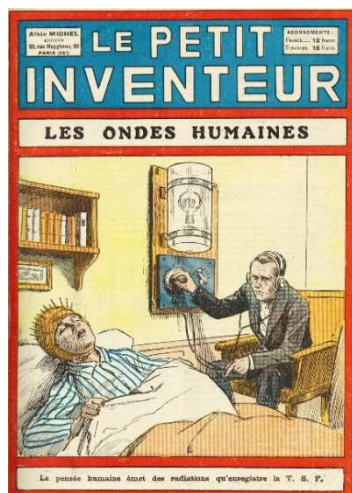


Illustration 8 : Les ondes humaines (Le petit inventeur, 1928)

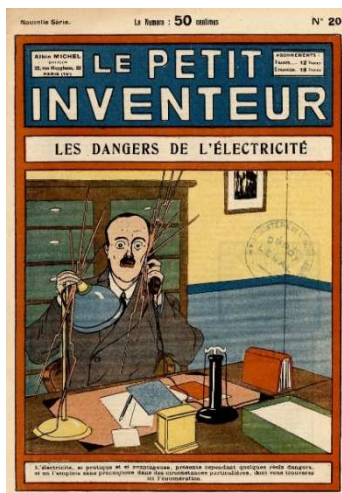


Illustration 9 : Les dangers de l'électricité (Le petit inventeur, 1928)

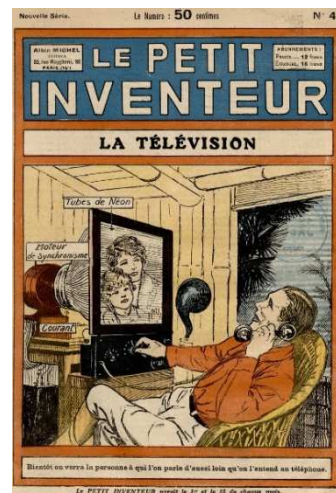


Illustration 10 : La télévision (Le petit inventeur, 1929)

Le bio-électromagnétisme

Le bioélectromagnétisme est le domaine d'étude des mécanismes d'interaction des champs électromagnétiques radiofréquences avec la matière vivante ainsi que des effets biologiques induits par l'exposition aux radiofréquences. Malgré l'intensité des efforts de recherche, nos connaissances en bio-électromagnétisme n'ont pas pu suivre *l'évolution rapide des technologies*.

De fait, l'extrapolation des connaissances issues des précédentes générations de téléphonie mobile aux nouveaux signaux reste délicate :

- D'une part, les signaux ont des caractéristiques distinctes (ex. différentes profondeurs de pénétration dans le corps, modèles d'absorption, modulation d'amplitude) ;
- D'autres part, le concept d'extrapolation ne fait pas l'unanimité.

Les nouvelles technologies de communication

Aujourd'hui, les nouvelles technologies de communication sans fil ont pris une importance cruciale dans notre société contemporaine. Les pratiques se développent et se diversifient. En 2021, 86% des

¹³ Utilisée en physique, la notion de champ traduit l'influence que peut exercer, à distance, un objet sur son environnement.

¹⁴ Yann Percherancier, *Signaux 5G et expositions multiples*, pp. 17-19.

personnes résidant en France ont utilisé Internet au cours des trois derniers mois, contre seulement 65% en 2009¹⁵.

Cette croissance s'accompagne d'une évolution permanente des signaux radioélectriques utilisés pour véhiculer les informations transmises (voix, données...). Les usages de ces technologies, ainsi que les caractéristiques des signaux (bande de fréquences, modulations, niveaux de puissance...) coexistent avec différentes générations de systèmes antérieurs.

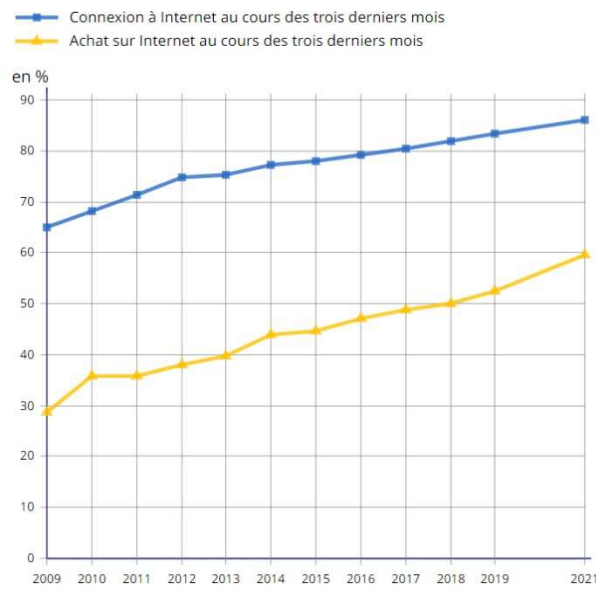


Illustration 11 : Part des personnes (de plus de 15 ans) s'étant connectées à Internet ou ayant fait un achat en ligne au cours des trois derniers mois (Source : Insee, 15 fév. 2022)

Comme le rappelle Rémy Pedoux, l'usage intensif des nouveaux objets communicants et l'accès à des services en ligne toujours plus nombreux entraîne « la saturation des gammes de fréquences existantes et nécessite le recours à des fréquences porteuses plus élevées, dont la technologie 5G et les ondes millimétriques »¹⁶.

La 5^{ème} génération

Initié en Europe depuis 2020, le déploiement commercial de la technologie 5G (pour « 5^{ème} génération ») a pour objectif la mise à disposition de services et applications numériques, à la fois pour les particuliers et les entreprises dans de multiples domaines (ex. jeu en réseau, réalité virtuelle, streaming audio et vidéo, télémédecine). Il porte une promesse d'une société numérisée où tous les objets du quotidien pourront communiquer entre eux : villes et transports intelligents, automatisation industrielle, éducation en ligne... Selon le développement et l'adhésion à ces nouveaux usages, ils sont susceptibles de modifier significativement les expositions de la population ; ils nécessitent, de ce fait, des travaux de recherche et d'expertise pour évaluer les effets sanitaires potentiellement associés.

¹⁵ Insee, *Enquête sur les TIC auprès des ménages entre 2009 et 2021*.

¹⁶ Rémy Pedoux, *Dommages à l'ADN et ondes millimétriques*, pp. 35-37.

- **La 5G versus la 4G**

L'une des finalités du déploiement du réseau mobile 5G est de multiplier les débits (jusqu'à dix fois plus rapides que ceux de la 4G) pour favoriser l'échange des données sans engorger les réseaux existants. Deux nouvelles bandes de fréquences ont ainsi été affectées à la 5G : 3,5 et 26 gigahertz (GHz) qui coexisteront avec les précédentes générations de téléphonie mobile.

Des protocoles ont été définis. Le déploiement commercial en bande 3,5 GHz a commencé en novembre 2020 tandis que certains opérateurs mobiles réalisent déjà des expérimentations pilotes en bande 26 GHz dans plusieurs villes¹⁷ pour tester les nouvelles infrastructures en cours de développement.

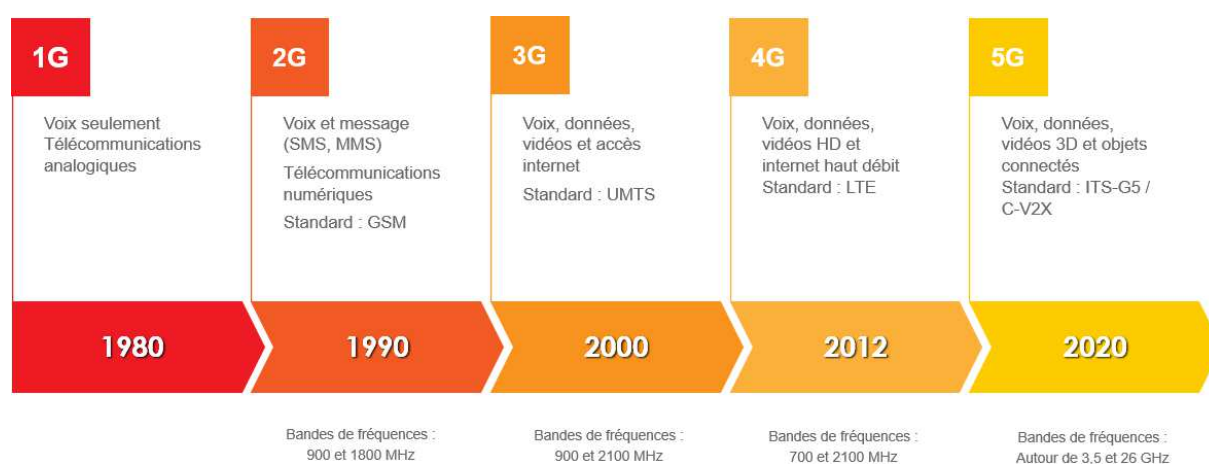


Illustration 12 : Évolution de la 1G à la 5G en France

- **De nouvelles infrastructures de réseau**

En ce qui concerne la 5G, l'utilisation de nouvelles fréquences plus élevées implique également une multiplication des antennes, c'est-à-dire des points d'accès au réseau de télécommunications (ex. stations de base). En effet, les bandes de fréquences basses sont celles qui ont la plus grande longueur d'ondes. A contrario, les bandes de fréquences hautes comme celles des 3,5 et 26 GHz permettent de livrer un meilleur débit, mais elles ont une portée de signal plus limitée : respectivement, 400 mètres et 150 mètres environ en zone urbaine¹⁸. L'accroissement visible du nombre d'émetteurs peut conduire à une préoccupation croissante pour les effets potentiels d'une exposition multiple aux radiofréquences sur la santé humaine.

Deux des projets présentés dans ce nouveau numéro des *Cahiers de la Recherche* s'intéressent ainsi aux effets issus d'expositions multiples (ou combinées) aux signaux 5G :

- EXPOAUTO qui vise à caractériser, selon Gabriella Tognola¹⁹, « l'exposition cumulée des passagers et des piétons aux champs électromagnétiques issus des technologies » présentes dans l'écosystème automobile (voitures connectées) ;

¹⁷ Tableau de bord des expérimentations 5G en France : <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/experimentations-5g-en-france/tableau-de-bord-des-experimentations-5g-en-france.html>

¹⁸ À titre comparatif, la bande de fréquences des 700 MHz a une portée de 2 km en zone urbaine.

¹⁹ Gabriella Tognola, *Les voitures connectées*, pp. 15-17.

- 5G-SAMU qui évalue d'une part, les effets potentiels induits par des signaux 5G à 3,5 GHz « sur les réactions cellulaires au stress, comme la réponse adaptative et l'autophagie »²⁰ (Yann Percherancier) et d'autre part, les effets potentiels d'une exposition combinée avec des champs GSM (2G) et des ondes continues (CW). Il s'inscrit en complément du projet piloté par Muriel Priault sur la réponse adaptative aux radiofréquences²¹.

Un risque d'échauffement

La capacité des radiofréquences à provoquer un échauffement des tissus est bien caractérisée, des valeurs limites d'exposition ont ainsi été définies afin de protéger les populations d'éventuels effets thermiques. La recommandation du Conseil de l'Union européenne du 12 juin 1999 s'appuie sur les valeurs limites définies par la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) : 0,08 W/kg pour le corps entier, 2 W/kg pour la tête et le tronc. Réévaluées régulièrement, ces valeurs n'ont pas été remises en question par les derniers rapports du SCENIHR²² sur les risques sanitaires émergents et nouveaux, ni par l'Icnirp elle-même récemment, en 2020. Pour autant, l'Anses suit avec attention l'évolution de ces référentiels ; elle analyse et commente les projets de textes mis en consultation publique.

- *La marge de sécurité*

Pour établir ses valeurs limites, l'ICNIRP prend une marge de sécurité. Des études faites sur des animaux, des cellules humaines et des modèles numériques ont montré qu'un effet thermique²³ pouvait survenir lorsque le débit d'absorption spécifique (DAS) dépassait la valeur de 4W/kg pour le corps entier et 100 W/kg pour certaines parties du corps les plus exposées comme la tête et le tronc. Un coefficient de 50 a donc été appliqué pour prévenir la population de tout effet thermique éventuel.

Toutefois, s'interrogent René de Sèze et Brahim Selmaoui, « des expérimentations menées en laboratoire ont montré des modifications de l'homéostasie (ex. température) chez des rats juvéniles exposés à des RF de faible intensité. »²⁴ D'où l'objectif du projet MOTHERR « d'évaluer en temps réel sur la matière vivante les effets potentiels de l'exposition aux champs RF (LTE, 5G) ».

De possibles effets biologiques

Depuis une vingtaine d'années, des études ont évoqué d'autres effets possibles : non thermiques. Une attention particulière a été portée sur les effets potentiels des radiofréquences sur la matière vivante, c'est-à-dire sur les effets biologiques. Mais, les résultats obtenus sont souvent contradictoires et le manque de reproductibilité²⁵ ne permet pas de tirer des conclusions robustes.

²⁰ Yann Percherancier, *Signaux 5G et expositions multiples*, pp. 17-19.

²¹ Muriel Priault, *La réponse adaptative aux radiofréquences*, pp. 38-39.

²² Comité scientifique indépendant mis en place en 2004 par la Commission européenne pour la conseiller sur les risques sanitaires émergents et nouveaux.

²³ La valeur de 4W/kg correspond à une augmentation de 1°C du corps humain.

²⁴ René de Sèze et Brahim Selmaoui, *Les effets potentiels des radiofréquences sur les thermorécepteurs*, pp. 20-21

²⁵ Le critère de reproductibilité est l'une des conditions qui permet de s'affranchir d'effets aléatoires ou d'erreurs de jugement. Selon Karl Popper, on ne peut tirer de conclusions que d'un événement bien caractérisé, qui s'est produit plusieurs fois et provoqué par des personnes différentes.

Concernant l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques, la directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 couvre « tous les effets biophysiques connus, directs et indirects, produits par les champs électromagnétiques »²⁶ :

- Effets thermiques tels que l'échauffement des tissus ;
- Effets non thermiques tels que la stimulation des muscles, des nerfs ou des organes sensoriels ;
- Des effets indirects tels une interférence avec des équipements et dispositifs médicaux électroniques, des courants de contact, etc.

Toutefois, en l'état actuel des connaissances scientifiques, la directive ne traite que des effets potentiels à court terme ; elle ne traite pas des effets potentiels à long terme d'une exposition aux radiofréquences, ni même d'une exposition multiple. Or, du fait de l'omniprésence des radiofréquences, un risque pour la santé - même faible - pourrait avoir un impact majeur sur la santé publique.

Des cancérogènes possibles

Commencée en 2000, l'étude Interphone²⁷ reste à ce jour la plus grande étude cas-témoins menée sur l'utilisation des téléphones portables et le risque de cancer du cerveau dans treize pays²⁸ à l'aide d'un protocole commun. Elle a réuni 2.708 cas de gliome²⁹, 2.409 cas de méningiome³⁰, 1.121 cas de neurinome de l'acoustique³¹ (ou schwannome), 109 tumeurs de la glande parotide³² et 7.658 témoins appartenant à la même classe d'âge (entre 30 et 59 ans). Selon le Dr Christopher Wild³³, les données collectées ne permettaient pas « de mettre en évidence un risque accru de cancer cérébral »³⁴. Mais, elles ne permettaient pas non plus de conclure qu'il n'y a pas de risque. Parmi les questions les plus débattues : l'utilisation du téléphone portable et le risque de gliome.

Du 24 au 31 mai 2011, des experts internationaux réunis à Lyon³⁵ sous l'égide du Centre international de recherche sur le cancer (Circ). Après avoir analysé des centaines d'articles scientifiques et examiné l'ensemble des données associées, ils ont considéré que les indications de cancérogénicité étaient « limitées³⁶ chez les utilisateurs de téléphones sans fil pour le gliome et le neurinome de l'acoustique, et insuffisantes³⁷ pour être concluantes pour les autres types de cancers »³⁸. Ainsi, ils ont classé les

²⁶ Art. 1.2 (Objet et champ d'application) et Art. 2 (Définitions).

²⁷ Site internet : <https://interphone.iarc.fr/>

²⁸ Allemagne, Australie, Canada, Danemark, Finlande, France, Israël, Italie, Japon, Norvège, Nouvelle-Zélande, Royaume-Unis et Suède.

²⁹ Le gliome est la forme la plus fréquente de tumeur cérébrale. Ce cancer commence dans les cellules gliales, qui entourent et soutiennent les cellules nerveuses.

³⁰ Un type de tumeur à croissance lente qui se forme dans les méninges (fines membranes qui entourent et protègent le cerveau et la moelle épinière).

³¹ Tumeur presque toujours bénigne du système nerveux périphérique.

³² La glande parotide est la plus grande des glandes salivaires.

³³ Directeur du CIRC, de 2009 à 2018.

³⁴ CIRC, *Publication de l'étude Interphone sur l'utilisation des téléphones portables et le risque de cancer du cerveau*, Communiqué de presse No 200, 17 mai 2010.

³⁵ Du 24 au 31 mai 2011.

³⁶ Une association positive a été établie entre l'exposition à l'agent considéré et la survenue de cancers, et le groupe de travail estime qu'une interprétation causale de cette association est crédible, mais il n'a pas été possible d'exclure avec suffisamment de certitude que le hasard, des biais ou des facteurs de confusion aient pu jouer un rôle.

³⁷ Les études disponibles ne sont pas d'une qualité, d'une concordance ou d'une puissance statistique suffisantes pour permettre de conclure à l'existence ou non d'une relation de cause à effet entre l'exposition et le cancer, ou bien aucune donnée sur le cancer chez l'homme n'est disponible.

³⁸ CIRC, *Le CIRC classe les champs électromagnétiques de radiofréquences comme « peut-être cancérogènes pour l'homme »*, Communiqué de presse No 208, 31 mai 2011.

radiofréquences comme « peut-être cancérogènes pour l’homme » (groupe 2B). Selon le Dr Jonathan Samet³⁹, président de ce groupe de travail : « Cette classification signifie qu’il pourrait y avoir un risque, et qu’il faut donc surveiller de près le lien possible entre les téléphones portables et le risque de cancer ».

Parmi les facteurs de confusion qui empêchent d’établir une relation de causalité, Joachim Schüz recense les biais et les erreurs qui limitent la force des conclusions⁴⁰. De plus, la majorité des cas et des témoins de l’étude Interphone n’étaient pas des utilisateurs intensifs de téléphones mobiles selon les pratiques actuelles. Aujourd’hui, l’utilisation du téléphone mobile est devenue beaucoup plus répandue. Qu’en est-il pour les enfants et les adolescents ? Ont-ils un risque accru de tumeur cérébrale ?

En complément de l’étude internationale Mobi-Kids⁴¹, l’objectif du projet présenté par Monica Guxens (EXPO-ENFANTS) est d’identifier les pratiques et d’analyser les déterminants sociaux de l’exposition réelle des enfants (à différents âges) aux radiofréquences »⁴² des téléphones mobiles, objets connectés et nouvelles technologies.

Une veille scientifique constante

Face au rythme soutenu des publications dans ce domaine, l’Anses maintient une veille scientifique permanente sur le sujet. Depuis sa dernière expertise globale consacrée aux effets sanitaires de l’exposition aux radiofréquences (2013) elle a produit plusieurs expertises spécifiques, en particulier sur :

- Les effets des radiofréquences sur la santé (2016) ;
- L’hypersensibilité aux champs électromagnétiques (2018) ;
- L’exposition aux téléphones de DAS élevés (2019) ;
- L’exposition aux champs électromagnétiques liés au déploiement de la 5G (2020-2022).

Un programme de recherche

En parallèle, l’Anses a créé un programme de recherche « Radiofréquences et santé », doté de deux millions d’euros par an. Piloté par un conseil scientifique dédié, il lance depuis 2013 un appel à projets de recherche spécifique, suivant le même calendrier que celui du programme national de recherche « Environnement Santé Travail » (PNR EST).

L’utilisation croissante des téléphones mobiles soulève de nombreuses questions. Comment évaluer les effets biologiques potentiels induits par les champs électromagnétiques ? Comment déchiffrer ces interactions subtiles entre la matière vivante et les radiofréquences de faible niveau ?

³⁹ Université de Californie du Sud, États-Unis.

⁴⁰ Joachim Schüz, *Les biais (facteurs) de confusion*, pp. 22-24.

⁴¹ Mobi-Kids est une enquête épidémiologique internationale qui porte sur 900 patients atteints d’une tumeur cérébrale et 1.900 témoins de 14 pays. Brigitte Lacour, Thomas Remen, Martine Hours, Elisabeth Cardis. Tumeurs cérébrales et téléphonie mobile chez les jeunes. *Les cahiers de la Recherche. Santé, Environnement, Travail*, ANSES, 2016, Regards sur 10 ans de recherche, le PNR EST de 2006 à 2015, pp.33-34. ([anses-01772417](#))

⁴² Monica Guxens, *Usages et exposition des enfants aux nouvelles technologies*, pp. 24-26

Pour comprendre l’hypersensibilité électromagnétique (EHS), Anne Pereira de Vasconcelos propose « une approche unique » chez un modèle animal qui ouvre des perspectives nouvelles⁴³. En raison de la proximité des téléphones mobiles avec la tête, explique Bruno Bontempi, « c’est le système nerveux central (SNC) qui fait l’objet des plus grandes interrogations ». Pendant des périodes de sensibilité accrues comme la période prénatale, « certaines études conduites chez des mammifères montrent que les gènes et l’environnement agissent de concert »⁴⁴. Son projet WIFIDEV vise ainsi « à évaluer l’effet de ces expositions sur le développement des embryons ainsi que sur le développement du cerveau et son fonctionnement à l’âge adulte ».



Illustration 13 : Exposition aux radiofréquences et santé des enfants (Anses, juin 2016)



Illustration 14 : Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (Anses, mars 2018)



Illustration 15 : Exposition aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie « 5G » (Anses, février 2022)

Delia Arnaud-Cormos explore une technique récente d’imagerie cérébrale, la neuro-imagerie, pour observer *in vivo* l’activité cérébrale (en temps réel) et la connectivité fonctionnelle sur des souris exposées aux radiofréquences » de la manière la moins invasive possible⁴⁵. De la même manière, les travaux présentés ici par Michel Mallat reposent sur des modèles animaux *in vivo* ou *in vitro* ; ce qui permet de mieux appréhender les effets biologiques des RF et leurs éventuels impacts sanitaires. « Ils confortent l’hypothèse d’une augmentation de la sensibilité de cellules cérébrales au signaux GSM ou LTE lors de réactions neuroinflammatoires. »⁴⁶

⁴³ Anne Pereira de Vasconcelos, *Le rat comme modèle animal d’étude de l’hypersensibilité électromagnétique*, pp. 26-28.

⁴⁴ Bruno Bontempi, *L’exposition prénatale au Wifi*, pp. 33-35.

⁴⁵ Delia Arnaud-Cormos, *Nouvelle approche de mesure de l’activité cérébrale sous RF*, pp. 29-30.

⁴⁶ Michel Mallat, *Variation des effets intracérébraux des radiofréquences selon l’état de santé*, pp. 31-33.

Les voitures connectées

Exposition cumulative induites par des champs électromagnétiques radiofréquences induits chez les humains par les nouvelles technologies associées aux services automobiles et aux objets connectés

Gabriella TOGNOLA, Consiglio Nazionale delle Ricerche IEIIT, Milan, Italie

Équipes partenaires : **Joe Wiart**, Institut Mines Telecom, Telecom Paris Tech, Chaire 2M, Paris – **Joseph Wout**, IMEC Waves Research Group, Gent, Belgique

Projet de recherche (en cours depuis déc. 2020 - Durée : 40 mois) – Financement : 239.928 € – Contact : gabriella.tognola@ieiit.cnr.it

Mots-clés : technologie, automobile, technologies de l'information et de la communication, exposition, radiofréquence, internet, communications, absorption onde, dosimétrie, dosimètre, champ électromagnétique, rayonnement électromagnétique

Dès aujourd'hui, 98% des voitures neuves vendues dans le monde sont connectées à Internet et équipées de services d'information et de communication⁴⁷. En France, 12,8 millions de voitures sont déjà connectées⁴⁸ à des fins d'aide à la navigation (ex. information trafic, assistance à la conduite, notification de zone de dangerosité pour le conducteur) et de services d'info-divertissement (ex. musique en streaming, vidéo à la demande pour les passagers de la voiture) si bien qu'elles donnent un bon aperçu de « l'internet des objets » (IoT en anglais).

⁴⁷ Les voitures connectées, faits et chiffres, Statista Research Department, 2021 : https://fr.statista.com/themes/3695/les-voitures-connectees/#dossierContents_outerWrapper

⁴⁸ Projection du nombre de voitures connectées en circulation en France de 2017 à 2022, Statista Research Department, 2022 : <https://fr.statista.com/statistiques/669112/projection-nombre-voitures-connectees-circulation-france/>

L'écosystème automobile

Dans une voiture récente, la connectivité repose sur les technologies réseau LTE⁴⁹ et LTE Advanced (4G). Elle façonne l'expérience des conducteurs en fournissant au niveau le plus élémentaire, des informations sur l'aide à la conduite (ex. localisation, trafic, sécurité) et génère aussi des besoins croissants : d'où la multiplication des capteurs sur les véhicules et la présence d'écrans (voire de multi-écrans) à l'intérieur de l'habitacle.

Pour favoriser l'échange d'information et améliorer la communication, deux technologies sont disponibles :

- L'ITS-G5 (dérivé du Wi-Fi) qui utilise la bande de fréquences 5,9 GHz ;
- Le C-V2X qui utilise les réseaux cellulaires des opérateurs de téléphonie mobile et doit intégrer à terme la 5G.

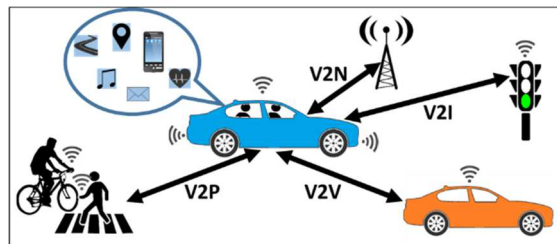


Illustration 16 : L'écosystème automobile (Crédits : Gabriella Tognola)

Mais, ces deux technologies ne sont pas interoperables, c'est-à-dire qu'une voiture équipée d'une technologie ne peut pas communiquer avec une voiture équipée de l'autre technologie. Dans ce contexte de transition numérique, la Commission européenne chargée du déploiement des « Systèmes de Transports Intelligents » (STI) a émis en mars 2019 un règlement délégué qui donne l'avantage à l'ITS-G5 tout en laissant la porte ouverte à d'autres technologies susceptibles d'être déployées dans l'avenir.

⁴⁹ De l'anglais « Long Term Evolution » (norme en télécommunications définie par le 3GPP).

De plus, l'écosystème de la voiture connectée implique, outre les constructeurs automobiles, un grand nombre d'acteurs tels que les équipementiers. Il suppose aussi d'adapter les infrastructures de la route (ex. capteurs de chaussée, panneaux communicants, réseaux de communication) si bien que la question de l'exposition de la population est loin d'être triviale.

Les scénarios d'exposition

L'écosystème automobile forme un environnement complexe et dynamique, dû à la multitude et à la variété des facteurs qui peuvent influencer l'exposition (ex. la distance par rapport aux sources, le type et le nombre de technologies embarquées dans la voiture, l'infrastructure routière, le nombre de voitures connectées à proximité, le contexte d'utilisation⁵⁰, les caractéristiques des personnes...). Construire un modèle déterministe de l'exposition impliquerait que toutes les variables susceptibles d'influencer l'exposition aient été identifiées et que les relations de causes à effets de causes à effets entre ces variables aient été explicitées et caractérisées ; ce qui est pratiquement impossible.

Pour anticiper ce que sera l'exposition de la population dans ce nouvel écosystème, nous envisageons des approches probabilistes (statistiques) novatrices, basées sur des études précédentes déjà financées par le PNR EST : Mobi-Expo⁵¹, CREST⁵², AMPERE⁵³, EXPO-

ENFANT... sans oublier de possibles synergies avec des projets européens tels que GERoNiMO⁵⁴ et CONCORDA⁵⁵.

Le projet de recherche : EXPOAUTO

L'écosystème automobile est au cœur du projet EXPOAUTO, dont l'objectif principal est de caractériser l'exposition cumulée des passagers et des piétons (adultes, enfants, nouveaux-nés, femmes enceintes...) aux champs électromagnétiques issus des technologies présentes dans l'écosystème automobile, dont la 5G.

Méthodologie

La méthodologie mise en œuvre repose sur quatre phases :

1. **Identifier les technologies**, les protocoles et les modes d'utilisation des différents dispositifs « IoT » au niveau des voitures connectées, de l'infrastructure routière et des individus
2. **Mesurer les champs électromagnétiques** émis par les voitures connectées dans des conditions réelles⁵⁶ et expérimentales
3. **Effectuer une dosimétrie précise** de la puissance véhiculée par les RF (de 5,9 GHz à 70 GHz) absorbée par les utilisateurs des voitures connectées et les piétons, dans différents organes et tissus (y compris, les yeux)
4. **Déterminer l'exposition cumulée** des utilisateurs de voitures connectées et des piétons (sur la base des résultats obtenus en phases 2 et 3) avec des méthodes statistiques avancées (ex. algorithmes de

⁵⁰ Ex. pendant les courts trajets par rapport aux longs trajets, pendant les déplacements quotidiens, pendant les voyages d'agrément...

⁵¹ Mobi-Expo, *Caractérisation des conditions d'utilisation de téléphones portables et d'exposition aux radiofréquences dans une étude épidémiologique multicentrique*, projet porté par Martine Vrijheid (2011-RF-216)

⁵² CREST, *Caractérisation de l'exposition aux radiofréquences (RF) induite par les nouveaux usages et les nouvelles technologies des systèmes de communications mobiles*, projet porté par Elisabeth Cardis (2013-RF-22)

⁵³ AMPERE, *Caractérisation de l'exposition résidentielle aux ondes RF*, projet porté par Joe Wiart (2016-RF-4)

⁵⁴ *Generalised EMF Research using Novel Methods*, <https://www.isglobal.org/en/-/geronimo-generalized-emf-research-using-novel-methods-an-integrated-approach-from-research-to-risk-assessment-and-support-to-risk-management>

⁵⁵ *Connected Corridor for Driving Automation*, <https://ertico.com/concorda/> dans le cadre du programme européen H2020.

⁵⁶ Sur route en Belgique, en France et en Italie.

« *Machine Learning* », prise en compte des effets aléatoires ou stochastiques) capables de modéliser la complexité du réel.

Résultats préliminaires

Les activités réalisées jusqu'à présent ont été axées sur la caractérisation technique et électromagnétique des principales technologies (ex. Bluetooth, WiFi, 4G/5G) utilisées dans la voiture connectée et les radars automobiles. Ces caractéristiques découlent à la fois de l'examen de des normes techniques et de mesures expérimentales effectuées en laboratoire et sur la route avec une voiture réelle.

En ce qui concerne la dose d'exposition RF pour les passagers du véhicule et les piétons à proximité de la voiture connectée, des simulations numériques sont réalisées à l'aide de fantômes humains réalistes afin d'évaluer l'exposition corps entier et localement dans différents tissus et organes (ex. la peau, la tête, les yeux et la région génitale).

Publications :

Tognola G, Bonato M, Benini M, Aerts S, Gallucci S, Chiamarello E, Fiocchi S, Parazzini M, Masini BM, Joseph W, Wiart J, Ravazzani P, « Survey of Exposure to RF Electromagnetic Fields in the Connected Car, » *IEEE Access*, 2022, 10, pp. 47764-47781, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3170035.

Bonato M, Tognola G, Benini M, Gallucci S, Chiamarello E, Fiocchi S, Parazzini M, « Assessment of SAR in Road-Users from 5G-V2X Vehicular Connectivity Based on Computational Simulations, » *Sensors*, 2022, 22, p. 6564. doi : 10.3390/s22176564

Benini M, Parazzini M, Bonato M, Gallucci S, Chiamarello E, Fiocchi S, Tognola G, « Road user RF exposure from ITS-5.9 GHz vehicular connectivity, » *Sensors*, 2022, doi: 10.3390/s22186986

Signaux 5G et expositions multiples

Signaux 5G et expositions multiples : recherche d'effets cellulaires et moléculaires

Yann PERCHERANCIER, Université de Bordeaux, IMS CNRS UMR 5218 - Talence

Équipe partenaire : **Philippe Lévêque**, Université de Limoges, XLIM CNRS - Limoges

Projet de recherche (en cours depuis janvier 2020) –

Financement : 242.299 € – Contact :

yann.percherancier@ims-bordeaux.fr

Mots-clés : exposition multiple, exposition, radiofréquence, stress cellulaire, cellule, molécule, cellules de la peau, neurones, télécommunication, technologie, communications, santé publique

Depuis une vingtaine d'années, les radiofréquences sont présentes partout : largement utilisées dans le domaine des télécommunications (téléphones mobiles, tablettes, objets connectés...). Pour éviter le risque de saturation des réseaux et fluidifier le partage de données, la cinquième génération (5G) de réseaux sans fil doit progressivement remplacer la quatrième (4G)⁵⁷ en proposant des débits plus importants et des temps de latence plus courts.

On comptait ainsi plus de cinq milliards d'utilisateurs de mobiles dans le monde en janvier 2020 : soit 67% de la population totale⁵⁸.

Des incertitudes

Comme toutes les ondes électromagnétiques, les radiofréquences (RF) peuvent interagir avec la matière vivante selon leur fréquence et leur intensité. Elles peuvent se propager dans la matière : donc, dans notre organisme. Parmi

⁵⁷ LTE advanced (de l'anglais, « Long term Evolution »)

⁵⁸ De janvier 2019 à janvier 2020, le nombre d'utilisateurs de mobiles a augmenté de 2,4%. Cette croissance a été plus rapide que celle de la population mondiale qui n'a cru que de 1,1% sur la même période. (Source : rapport *Digital 2020* de *We are Social*)

les effets produits, on distingue les effets thermiques⁵⁹ des effets « non thermiques »⁶⁰ qui, à ce jour, font l'objet de débats. En effet, les RF ont des caractéristiques distinctes (ex. différentes profondeurs de pénétration dans le corps, modèles d'absorption, modulation d'amplitude). Si la capacité des RF à provoquer un échauffement des tissus⁶¹ est bien caractérisée, des incertitudes subsistent sur les effets biologiques potentiels qui pourraient résulter d'une exposition aux champs électromagnétiques de faible intensité.

La modulation d'amplitude

Bien que la majorité des études récentes n'aient signalé aucun effet propre à la modulation d'amplitude⁶², certains travaux (dont les nôtres) indiquent de possibles effets spécifiques des signaux RF modulés en amplitude sur l'activité électrique des neurones. Or, aucune hypothèse plausible ne permet d'expliquer les mécanismes sous-jacents de ces effets dits « non thermiques »⁶³. En l'absence d'effets fiables et reproductibles, il est donc difficile d'en tirer des conclusions.

À notre connaissance, aucune étude n'a encore évalué l'effet des signaux 5G (émis seuls ou en combinaison avec d'autres signaux) sur la matière vivante. Évaluer si les nouvelles technologies RF induisent ou non une réponse au stress cellulaire *in vitro* ou impactent l'activité électrique des neurones dans des conditions d'exposition bien contrôlées est une étape essentielle pour un déploiement sûr et une évaluation des risques portant sur tous les effets potentiels des signaux 5G sur la santé.

⁵⁹ Validés sur le plan physique.

⁶⁰ Ces effets « non thermiques » font référence à des effets qui ne sont pas causés par l'élévation de la température des tissus.

⁶¹ Relaxation diélectrique.

⁶² Utilisée pour transférer des informations.

⁶³ C'est-à-dire qui ne sont pas causés par l'élévation de la température des tissus vivants.

Le projet de recherche : 5G-SAMU

Lors d'une étude précédente⁶⁴, nous avons identifié une réponse différentielle potentielle induite par les champs GSM (2G) et les ondes CW modulés par impulsion. À 17-28 jours, des cultures neuronales⁶⁵ ont été soumises *in vitro* à des expositions RF de quinze minutes, à des DAS allant de 0,01 à 9,2 W/kg. Les signaux GSM et CW ont entraîné une nette diminution de la différenciation neuronale pendant l'exposition. Cet effet est devenu plus marqué pour les niveaux plus élevés de DAS et s'est poursuivi au-delà de la fin de l'exposition. À noter : à un niveau de DAS moyen, l'amplitude de l'effet était plus grande avec le signal GSM qu'avec le CW.

Nos études fournissent ainsi des preuves uniques d'une diminution de l'activité électrique des cultures neuronales corticales pendant l'exposition aux RF et suggèrent qu'une partie du mécanisme est non thermique. Ces résultats sont similaires à ceux d'un groupe de recherche américain et nécessitent donc une évaluation des effets de la modulation 5G à 3,5 GHz sur l'activité électrique des neurones.

Durant les vingt dernières années, la possibilité que l'exposition aux RF induise des réponses de stress cellulaire dans d'autres types de cellules a été évaluée en tenant compte de différents phénomènes biochimiques (ex. intégrité de l'ADN, capacité de réparation, apoptose⁶⁶, expression des protéines). Les effets observés étaient faibles, souvent proches de la limite de détection. En 2013, le groupe de travail du CIRC a donc conclu qu'il y avait peu de preuves que les champs RF induisent l'apoptose dans les cellules humaines *in vitro*. Mais depuis, le nombre d'études portant sur les effets apoptotiques des RF dans les lignées

⁶⁴ MOTUS, *MOdulation dU Signal RF et effets sur le cerveau : approche in vivo et in vitro*, étude financée par le PNR EST (2015-RF-19)

⁶⁵ À partir de cortex cérébraux embryonnaires de rats.

⁶⁶ Mort cellulaire programmée.

cellulaires et les cellules primaires a considérablement augmenté.

Objectifs

Les effets potentiels des signaux RF sur les réactions cellulaires au stress, comme la réponse adaptative et l'autophagie, sont d'un intérêt croissant. Actuellement, nous évaluons l'effet des champs UMTS (3G) à 1,95 GHz sur ces deux mécanismes cellulaires⁶⁷. Nous proposons de compléter cette étude dans le cadre de l'exposition aux signaux 5G.

Les effets des signaux 5G seront systématiquement comparés aux signaux CW à 3,5 et 1,8 GHz. Enfin, nous envisageons d'étudier l'effet de l'exposition combinée de la 5G à 3,5 GHz et du GSM à 1,8 GHz.

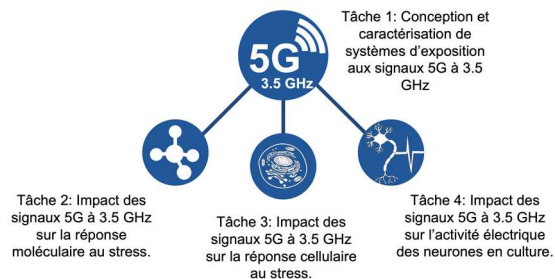


Illustration 17 : Le projet de recherche 5G-SAMU (Crédits : Yann Percherancier)

Notre objectif est ici de déterminer si les champs RF 5G à 3,5 GHz (à divers niveaux de DAS jusqu'à 4W/kg) sont en mesure de :

- Diminuer l'activité électrique neuronale, comme nous l'avons déjà observé pour le signal 2G à 1,8 GHz
- Induire une réponse cellulaire et moléculaire au stress dans des cellules cibles des signaux 5G comme les fibroblastes et les kératinocytes de la peau.

La voie RAS/MAP⁶⁸ kinases, l'activation des protéines de choc thermique, l'induction du stress mitochondrial, le stress du réticulum endoplasmique et l'apoptose seront mesurées après exposition aux signaux 5G à 3,5 GHz.

⁶⁷ ADAPT, Réponse adaptative aux champs radiofréquences : l'autophagie est-elle la clé ?, étude financée par le PNR EST (2017-RF-12)

⁶⁸ De l'anglais « *Retrovirus Associated Sequences* » et « *Mitogen-activated protein* »

Les effets potentiels des radiofréquences sur les thermorécepteurs

Modélisation numérique de l'interaction des champs RF sur les récepteurs thermiques : mécanismes et expérimentations *vivo* et *in vitro*

René DE SEZE et Brahim SELMAOUI, Ineris, TEAM Peri/Tox, Verneuil-en-Halatte

Équipes partenaires : **Yann Percherancier**, IMS CNRS UMR 5218, Talence – **Christian Person**, Telecom Bretagne, Brest – **Francesca Apollonio**, Department of Information Engineering, Electronics and Telecommunications Sapienza, Université de Rome, Italie

Projet de recherche (en cours depuis nov. 2020 - Durée : 40 mois) – Financement : 199.935 € – Contact : brahim.selmaoui@ineris.fr

Mots-clés : radiofréquence, interaction, modélisation, thermorégulation, température corporelle, récepteur, antagoniste, mécanisme action, expérimentation animale, in vivo, in vitro, modèle, molécule, dosimétrie, souris, technologies de l'information et de la communication

À ce jour, les seuls effets connus et validés des radiofréquences (RF) sur la matière vivante sont les effets thermiques tels que l'échauffement des tissus. En raison des risques associés, des recommandations et des normes ont été définies afin d'assurer la protection de la population générale (restrictions de base). Ainsi, les valeurs limites d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques imposées par la réglementation correspondent au débit d'absorption spécifique (DAS), qui s'exprime en watts par kilogramme (W/kg) : 0,08 W/kg (corps entier) et 2W/kg (pour la tête ou le tronc)⁶⁹.

⁶⁹ Décret No 2002-775 du 3 mai 2002 qui transpose en droit français la recommandation européenne 1999/519/CE du 12 juillet 1999 à partir du guide ICNIRP pour l'établissement de limites d'exposition (1998).

Toutefois, des expérimentations menées en laboratoire ont montré des modifications de l'homéostasie (ex. température) chez des rats juvéniles exposés à des RF de faible intensité⁷⁰.

La thermorégulation

Exposé au chaud ou au froid, l'organisme met en œuvre des mécanismes de régulation qui lui permettent de se maintenir à une température souhaitée. Ces mécanismes reposent sur un équilibre constant (homéostasie) entre les apports et les pertes de chaleur (ex. apport alimentaire, activité locomotrice, sommeil). Après avoir exposé des rats⁷¹ pendant cinq semaines (23h/24, 7j/7) à des ondes de faible intensité⁷², il a été observé que ceux-ci adoptaient une stratégie d'évitement des températures les plus basses⁷³.

Cette réaction proviendrait d'une sensibilité accrue au froid due à un effet direct des RF sur les thermorécepteurs possédant une protéine TRPM-8, elle-même sensible au froid. Face à cette hypothèse, la question des effets potentiels des RF sur la matière vivante aux niveaux cellulaires et moléculaires se pose notamment sur les protéines impliquées dans la réponse au stress cellulaire telles que d'autres canaux TRP⁷⁴.

⁷⁰ Amandine Pelletier, Jean-Pierre Libert, *Effets cumulés des ONIE : co-exposition aux ONIE et à une contrainte thermique*, Cairn.info :

<https://doi.org/10.3917/re1.103.0023>

Pelletier, A., et al. (2013). "Effects of chronic exposure to radiofrequency electromagnetic fields on energy balance in developing rats." *Environmental Science and Pollution Research* 20(5): 2735 - 2746

⁷¹ Âgés de trois semaines.

⁷² Du type de celles émises par des antennes relais (900 MHz, 1 V/m, 0,3 W/kg).

⁷³ Les animaux étaient libres de se déplacer dans trois enceintes régulées chacune à des températures différentes (24, 28 et 31°C).

⁷⁴ De l'anglais « *Transient Receptor Potential* ».

La technique du BRET

Au cours des vingt dernières années, les approches basées sur le transfert d'énergie par résonance (RET) ont offert de nouvelles possibilités pour suivre en temps réel et sur des cellules vivantes, les interactions entre protéines ou leurs changements de conformation. Afin de pouvoir exposer des cellules vivantes aux champs RF, cette technique a nécessité la mise au point d'un dispositif expérimental à l'aide de sondes BRET (bioluminescence), basé sur les canaux TRP thermosensibles et sur des fibres optiques reliées à un spectromètre. Cette technique prometteuse est de plus en plus utilisée pour l'étude de l'activité protéique dans la matière vivante⁷⁵.

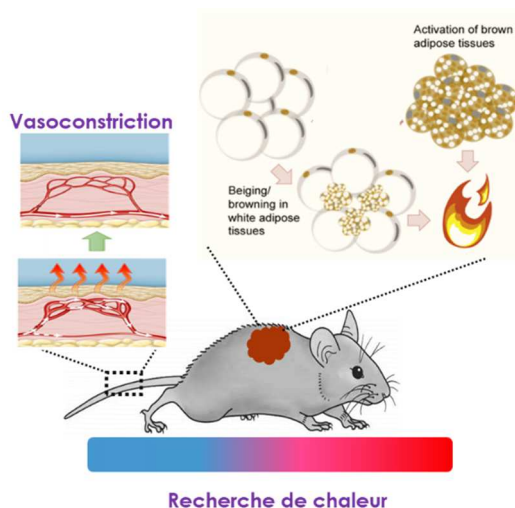


Illustration 18 : La régulation thermique, en réponse au froid (Auteur : Thi Cuc Mai)

Le projet de recherche : MOTHERR

L'objectif de cette étude est d'évaluer en temps réel sur la matière vivante (fibroblastes

primaires et lignées cellulaires) les effets potentiels de l'exposition aux champs RF (LTE, 5G)⁷⁶ en suivant l'activité des canaux ioniques TRP à l'aide de la technique du BRET.

Méthodologie

En parallèle, nous mènerons des expériences pharmacologiques *in vivo* avec différents composés actifs (médicaments) pour vérifier la spécificité des effets observés et leur corrélation avec les expériences *in vitro*.

En outre, un modèle numérique (dynamique moléculaire) permettra de décrire les mécanismes d'interaction et de vérifier si les effets observés peuvent s'expliquer par des modèles « classiques » d'interaction. L'étude des effets des RF sur les différents récepteurs thermiques sera aussi recherchée, en fonction des températures ambiantes et du froid (ex. interaction possible avec des agonistes/antagonistes).

Résultats préliminaires

- Les sondes TRP ont été conçues et leur réponse en fonction de la température a été caractérisée. Les premiers résultats avec exposition RF n'ont pas montré de modification.
- Les modèles de canaux récepteurs TRP ont été élaborés afin d'étudier l'interaction des radiofréquences avec leur configuration.
- L'utilisation d'antagonistes a montré différents effets sur la cinétique thermique entre les animaux exposés et contrôles.
- Un effet sur l'hormone de stimulation thyroïdienne TSH a été observé, et les concentrations des hormones thyroïdiennes T3 et T4 sont étudiées plus en détail.

⁷⁵ RF-BioCell, *Etude en temps réel des effets cellulaires globaux des champs radiofréquences*, projet porté par Yann Percherancier (2013-RF-195) - Yann Percherancier. Mémoire pour l'obtention de L'Habilitation à Diriger des Recherches Etude des effets cellulaires et moléculaires des champs électromagnétiques. Sciences du Vivant [q-bio]. Université de Bordeaux, 2017. (tel-02525164)

⁷⁶ De 4 mW/kg à 4W/kg.

Les biais (facteurs) de confusion

Téléphones portables et risque de gliome : effet de diverses erreurs dans l'estimation du risque de l'étude multinationale de cas-témoins Interphone

Joachim SCHÜZ, IARC, Environment and Lifestyle Epidemiology Branch, Lyon

Équipes partenaires : **Rémi Béranger**, Université de Rennes 1, Irset Inserm U1085, Rennes – **Susanna Lagorio**, Department of Oncology and Molecular Medicine, Istituto superiore di sanità, Rome, Italie

Projet de recherche (de décembre 2018 à juin 2022)
– Financement : 175.174 € – Contact : schuzj@iarc.who.int

Mots-clés : téléphone mobile, risque de gliome, erreur de mesure, évaluation, simulation

Le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC, Lyon) a classé en 2011, les champs électromagnétiques de radiofréquence (RF-EMF) comme étant possiblement cancérigènes (Groupe 2B)⁷⁷. Bien qu'à ce jour les preuves tirées de la littérature ont été jugées limitées, notamment en raison de certains résultats divergents, certaines études cas-témoins sur le sujet ont rapporté des associations positives. Les résultats de la plus grande étude cas-témoins menée (INTERPHONE⁷⁸) portant sur 13 pays différents, ont montrés une association positive entre l'utilisation du téléphone mobile et le risque de gliome – la forme plus fréquente de tumeur cérébrale – avec une augmentation de risque de 40% parmi les 10% d'utilisateurs les plus élevés de téléphone mobile. Cette étude a également montré une diminution significative

⁷⁷ International Agency for Research on Cancer (IARC). Non-ionizing radiation. Part 2, Radiofrequency electromagnetic fields. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 102, Lyon, 2013

² International Journal of Epidemiology, Volume 39, Issue 3, June 2010, Pages 675–694, <https://doi.org/10.1093/ije/dyq079> - Site internet : <https://interphone.iarc.fr/>

du risque de gliome parmi les utilisateurs faibles ou modérés ce qui a été considéré comme biologiquement peu probable et interprété comme une preuve claire de la présence de biais et de facteurs de confusion au sein de l'étude. Il est donc essentiel d'identifier les types de biais ou d'erreurs de mesure qui pourraient conduire une fonction de risque similaire afin d'obtenir une interprétation valable des résultats de cette étude.

Biais potentiel

Les principaux résultats de l'étude INTERPHONE suggèrent une relation exposition-risque en forme de « J » entre l'utilisation du téléphone mobile et le risque de gliome et en particulier, une :

- Augmentation du risque (*odds ratio*, OR > 1) de gliome parmi les plus « gros utilisateurs » de téléphones mobile⁷⁹;
- Diminution significative du risque (OR < 1) de gliome parmi les utilisateurs faibles ou modérés⁸⁰.

Toutefois, un effet protecteur de l'utilisation du téléphone mobile sur le risque de gliome parmi les utilisateurs faibles ou modérés – par rapport aux utilisateurs non-réguliers – est très peu probable d'un point de vue biologique et reflèterait donc la présence de biais et d'erreurs de mesure de l'exposition au sein de l'étude INTERPHONE.

Le participants (cas de gliome et témoins⁸¹) de l'étude INTERPHONE ont été interrogés à l'aide d'un questionnaire sur leur utilisation passée du téléphone mobile. L'autodéclaration de l'utilisation du téléphone mobile peut être biaisée. Parmi les principaux biais identifiés et discutés, figurent :

⁷⁹ OR = 1,40 ; IC (intervalle de confiance) à 95%, 1,03–1,89.

⁸⁰ OR = 0,81 ; IC (intervalle de confiance) à 95%, 0,70–0,94.

⁸¹ Témoins tirés au sort sur les listes électorales.

- **Le biais de participation (ou de sélection)** : biais de participation différentielle parmi les témoins, où l'utilisation reportée du téléphone mobile était plus importante chez les témoins participants que les non-participants à l'étude conduisant à une sur-représentation des utilisateurs ; pouvant ainsi créer une fausse association avec l'utilisation du téléphone mobile.
- **Le biais de rappel (ou de mémorisation) de l'exposition/utilisation du téléphone mobile** : Une sous-estimation de l'utilisation reportée du téléphone mobile chez les faibles utilisateurs et, à contrario, une sur-estimation de l'utilisation par les utilisateurs les plus importants ont été observées. De plus, des valeurs non plausibles (exagérées) de l'utilisation autodéclarée du téléphone mobile étaient plus fréquentes parmi les cas que les témoins, ce qui pourrait conduire, *in fine*, à une association positive fictive (pouvant suggérer d'une certaine manière l'origine à leur maladie).

Le projet de recherche : INTER-CAL

L'objectif principal de cette étude est de créer un modèle scientifiquement cohérent des divers biais et incertitudes présents dans l'étude cas-témoins INTERPHONE, afin de déterminer si les estimations de risque rapportées dans cette étude pouvaient être compatibles avec l'hypothèse d'absence d'association entre l'utilisation du téléphone mobile et le risque de gliome ; une fois les incertitudes et biais pris en compte.

Methodologie

Nous nous sommes appuyés sur des analyses de simulation de type Monte-Carlo basées sur

un modèle de « régression logistique »⁸² pour estimer le risque de gliome selon des catégories (déciles⁸³) d'utilisation du téléphone mobile. A partir des données disponibles des études de validation de l'étude cas-témoins INTERPHONE, plusieurs scénarios de biais et d'incertitudes ont été définis et examinés en comparant les données d'utilisation autodéclarées par les participants (pouvant être biaisé et supposé être sujette à erreur) à celles fournies par les opérateurs de téléphonie mobiles (supposé « vraie »).



Illustration 19 : Site Interphone, <https://interphone.iarc.fr/>

L'analyse du risque a été réalisée en générant des données de type cas-témoins - similaire à l'étude INTERPHONE - basées sur un échantillon de 3000 sujets (1000 cas et 2000 témoins) pour lequel deux estimateurs d'exposition au téléphone mobile étaient disponibles : la « vraie » exposition et celle biaisé selon le scénario considéré. Nous avons utilisé une approche hiérarchique bayésienne afin de tenir compte de l'hétérogénéité des données d'utilisation du téléphone mobile dans les pays de l'étude INTERPHONE.

Résultats

Nos résultats de simulations basés sur les scénarios les plus réalistes issus des études de validation d'INTERPHONE montrent que le

⁸² Modèle statistique.

⁸³ En statistique, un décile est chacune des 9 valeurs qui divisent un jeu de données en 10 groupes d'effectifs égaux.

modèle biaisé le plus probable est entièrement compatible avec la relation exposition-risque en forme de « J » observée dans l'étude INTERPHONE. Bien qu'une certaine incertitude résiduelle subsiste⁸⁴, les données de l'étude INTER-CAL modifient l'évaluation globale, rendant moins probable le lien de causalité entre l'utilisation intensive du téléphone mobile et un risque accru de gliome.

Néanmoins en raison des différents biais inhérents aux études cas-témoins, des études de cohortes dites « prospectives » sont une alternative attrayante, fournissant davantage de preuves solides afin de savoir si l'utilisation du téléphone portable est liée à un risque accru de cancer.

Usages et exposition des enfants aux nouvelles technologies

Caractérisation des usages et de l'exposition réelle ponctuelle et cumulée aux radiofréquences de dispositifs mobiles communicants – y compris nouvelles technologies – chez les enfants à différents âges

Monica GUXENS, ISGlobal, Barcelone, Espagne

Équipes partenaires : **Anke Huss**, Universiteit Utrecht, Division Environmental Epidemiology, Utrecht, Pays-Bas – **Cécile Chevrier**, Université de Rennes 1, Irset-Inserm UMR 1085, Rennes – **Barbara Heude**, Inserm, UMR 1153, CRESS, Équipe 6 EAROH, Villejuif – **Joe Wiart**, Telecom Paris Tech, Chaire C2M, Paris – **Joseph Wout**, IMEC, WAVES research group, Gent, Belgique – **Kinga Polanska**, Nofer Institute of Occupational Medicine, Lodz, Pologne

Projet de recherche (en cours depuis 2019) -
Financement : 399.983 € – Contact :
monica.guxens@isglobal.org

Mots-clés : exposition, enfant, technologie, communications, radiofréquence
--

Ces dernières années, les usages des téléphones mobiles et objets connectés ont considérablement évolué, notamment chez les enfants et les adolescents. De plus en plus de dispositifs leur sont dédiés (ex. jouets radiocommandés, consoles de jeux, lunettes multimédia, veille-bébés) ou prennent en charge des applications spécifiques (ex. vidéo streaming, e-learning) : d'où l'utilisation accrue de portables pour des usages autres que la téléphonie (ex. photographie, musique, envoi de SMS ou « textos », participation à des réseaux sociaux).

Si le rapport des enfants et des adolescents a évolué par rapport aux smartphones et appareils sans fil, nous disposons, à l'heure actuelle, de peu d'informations objectives sur les modes d'utilisation de ces dispositifs – de nombreuses études s'étant focalisé jusqu'à

⁸⁴ Les échantillons des études de validation peuvent aussi être sujet à certains biais.

présent sur l'estimation de l'exposition des adultes et l'évaluation de risques potentiels au niveau de la population générale.

Les déterminants sociaux et facteurs de risque

Connaître les modalités d'usages des portables (ex. téléphone, tablette, ordinateur) par les enfants et les adolescents pourrait être utile pour réduire leur exposition. Ces modalités sont multiples ; elles varient selon les contextes sociaux et familiaux, d'autant plus que les offres commerciales des opérateurs (ex. forfait famille, multi-branchement) ont favorisé la pénétration des TIC dans les foyers français.



Illustration 20 : Lunettes de réalité virtuelle (Crédits : Getty Images)

Récemment, des enquêtes comme celles d'Hadopi⁸⁵ ont permis de caractériser, chez les 8-14 ans (mai 2017), la diversification des pratiques culturelles dématérialisées. Néanmoins, elles interviennent dans le domaine des sciences sociales et, si elles font ressortir l'inquiétude des parents, ne permettent pas d'étudier le lien entre l'exposition des jeunes aux radiofréquences et les effets biologiques et sanitaires éventuels.

Le projet de recherche : EXPO-ENFANTS

L'objectif principal du projet EXPO-ENFANTS est d'identifier les pratiques et

d'analyser les déterminants sociaux de l'exposition réelle des enfants (à différents âges) aux radiofréquences des dispositifs mobiles communicants :

1. Recueillir des informations et des données sur les usages multiples des téléphones mobiles et objets connectés dans des études de cohortes d'enfants et d'adolescents dites « prospectives »⁸⁶ ;
2. Étudier les déterminants sociaux des différents dispositifs utilisés par les jeunes à travers une recherche bibliographique en comparant d'une part, les offres des opérateurs de téléphonie mobile et en étudiant d'autre part, la relation entre les déterminants sociologiques et les perspectives de développement de l'enfant ;
3. Estimer l'exposition des enfants et des adolescents aux champs électromagnétiques (ex. tête, corps entier) selon l'âge, le dispositif émetteur, le type d'application, de même que le recueil de données d'usage du téléphone mobile et la durée d'utilisation.

Méthodologie

Pour caractériser l'exposition des enfants et des adolescents, le projet s'appuiera sur six cohortes d'enfants existantes dans trois pays européens (France, Pays-Bas, Pologne et Espagne) et une nouvelle cohorte reclurée à l'école :

- **Enfants 3-6 ans**
 - SEPAGES (France)⁸⁷
 - YOUth Baby & child (Pays-Bas)⁸⁸
 - Cohorte à l'école (Espagne)
- **Enfants 9-13 ans**
 - EDEN (France)⁸⁹
 - INMA (Espagne)⁹⁰

⁸⁶ La période de suivi débute à la date de mise en place de l'enquête.

⁸⁷ <https://sepages.inserm.fr/fr/accueil/>

⁸⁸ Cohorte suivie dans le temps :

<https://www.uu.nl/en/research/youth-cohort-study>

⁸⁹ <http://eden.vjf.inserm.fr/>

⁹⁰ https://www.isglobal.org/en/project/-/asset_publisher/qf6QOKuKkIC3/content/proyecto-inma-infancia-y-medio-ambiente

⁸⁵ Génération dite « smartphone natives ».

- Cohorte à l'école (Espagne)
- **Adolescents 14-17 ans**
 - EDEN (France)⁹¹
 - PÉLAGIE (France)⁹²
 - GENERATION R Study (Pays-Bas)⁹³
 - INMA (Espagne)
 - REPRO_PL (Pologne)
 - Cohorte à l'école (Espagne)

Le rat comme modèle animal d'étude de l'hypersensibilité électromagnétique

Effet des radiofréquences (5G, 2 fréquences) chez le sujet sain et dépressif : approches comportementale et neurobiologique de l'hypersensibilité électromagnétique (EHS) chez le rat

Anne PEREIRA DE VASCONCELOS,
Université de Strasbourg, CNRS UMR 7364,
Strasbourg

Équipe partenaire : **Myles H. Capstick**, IT'IS
Foundation, Zurich

Projet de recherche (en cours depuis décembre 2020 - durée : 48 mois) – Financement : 293.988 €
– Contact : pereira@unistra.fr

Mots-clés : hypersensibilité électromagnétique, exposition, radiofréquences, rayonnement électromagnétique, expérimentation animale, modèle, cognition, mémoire, dépression, anxiété, étiologie, rat, technologies de l'information et de la communication, seuil de la douleur, phénotype, physiopathologie, symptomatologie, champs électromagnétiques, sexe/genre

L'hypersensibilité électromagnétique (EHS) se caractérise par divers symptômes que les personnes attribuent à leur exposition aux champs électromagnétiques (CEM). Selon l'OMS, cette hypersensibilité présente des analogies avec d'autres syndromes inexpliqués comme l'intolérance aux odeurs chimiques (SIOC) ou l'hypersensibilité chimique multiple (MCS) : troubles associés à des facteurs environnementaux, qui, comme l'EHS, restent « non expliqués sur le plan médical et dont les effets sont préjudiciables pour la santé des personnes »⁹⁴.

⁹¹ <http://eden.vjf.inserm.fr/>

⁹² <https://www.pelagie-inserm.fr/>

⁹³ <https://generationr.nl/researchers/>

⁹⁴ Cité dans le rapport de l'Anses, *Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique aux champs électromagnétiques*, Édition scientifique, mars 2018, p. 4.

L'hypersensibilité électromagnétique (EHS)

L'OMS a retenu trois critères pour caractériser l'EHS⁹⁵ :

1. La perception par les sujets de symptômes fonctionnels divers non spécifiques⁹⁶ (ex. troubles du sommeil, maux de tête, symptômes cutanés) ;
2. L'absence d'évidences clinique et biologique permettant d'expliquer ces symptômes ;
3. L'attribution, par les sujets eux-mêmes, de ces symptômes à une exposition à des champs électromagnétiques, eux-mêmes diversifiés.

Quelques études montrent que les personnes se déclarant EHS sont plus anxieuses et déprimées que la moyenne de la population générale. Mais, il n'est pas possible de dire si cette composante psychique est la cause ou la conséquence des symptômes ressentis par ces personnes. De plus, les plaintes exprimées font référence à différentes sources d'exposition : principalement les radiofréquences (ex. téléphones mobiles, Wi-Fi, antennes relais), mais aussi les basses ou extrêmement basses fréquences (ex. lignes électriques) dont les modes d'interaction avec la matière vivante sont très différents.

Un modèle animal

Selon les dernières estimations de l'OMS, 5% des adultes souffrent de dépression : soit, plus de 300 millions de personnes dans le monde⁹⁷. C'est une des principales causes de morbidité et d'incapacité. La dépression se traduit notamment :

- Chez les hommes, par une perte de poids, un ralentissement psychomoteur

et des pensées autodestructrices ou suicidaires ;

- Chez les femmes, par une augmentation de l'appétit, des douleurs et troubles gastro-intestinaux.

Cette maladie touche davantage les femmes que les hommes. Elle accroît d'autant plus le risque de co-morbidité qu'elle établit des liens étroits avec d'autres troubles, notamment l'anxiété, ou des maladies non transmissibles.



Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Mars 2018 Édition scientifique



Illustration 21 : Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (Anses, Édition scientifique, mars 2018)

Pour comprendre la dépression, les modèles animaux peuvent jouer un rôle important. En effet, les neurosciences affectives ont clairement démontré que les mammifères partageaient beaucoup de mécanismes neuronaux, qui sous-tendent les émotions. Chez les rongeurs, par exemple, la dépression est associée à un ensemble de phénotypes qui peuvent être mesurés de manière fiable (ex. modification de l'appétit, baisse de la concentration, indécision, anhédonie).

⁹⁵ *Id.*

⁹⁶ Un symptôme est dit « non spécifique » lorsqu'il peut exprimer plusieurs maladies différentes.

⁹⁷ Augmentation de 18% de 2005 à 2015.

Parmi les modèles animaux, il s'est avéré que les rats FSL⁹⁸ constituent un bon modèle génétique de dépression. Comme les personnes déprimées, ils manifestent des modifications d'appétit, des pertes d'énergie, des altérations du sommeil, des difficultés dans les relations sociales...

Le projet de recherche : RADIODEP

La relation de cause à effet entre les radiofréquences et l'EHS n'étant pas validée sur le plan scientifique, le projet RADIODEP propose de répondre aux questions suivantes :

- La personne dépressive perçoit-elle les RF différemment d'une personne en bonne santé ?
- La dépression est-elle la cause ou la conséquence de l'EHS ?
- L'EHS concerne-t-elle plutôt les femmes (comme la dépression, l'anxiété et les plaintes somatiques) ?

Cette approche unique de l'EHS chez un modèle animal de dépression pose la question du rôle des états affectifs (émotionnels) dans la symptomatologie et du lien avec les RF. Elle ouvre des perspectives nouvelles – l'absence de modèle animal freinant jusqu'à ce jour la compréhension de l'étiologie et de la physiopathologie de l'EHS.

Méthodologie

Pour la première fois, deux signaux 5G seront étudiés :

- Une fréquence basse (900 MHz), qui pénètre dans l'organisme ;
- Une fréquence haute (26 GHz), qui n'y pénètre théoriquement pas.

Après l'adaptation d'une chambre réverbérante aux signaux 5G pour l'exposition des rats en cage d'élevage, des tests comportementaux seront effectués avant, pendant et après une exposition chronique (4 semaines, 5 j/sem, 4h/j) de rats FSL mâles et femelles et leurs

contrôles (rats Sprague-Dawley). Ces tests ciblent l'activité locomotrice, l'anxiété, la dépression, la mémoire à court et à long terme, la flexibilité cognitive, et la sensibilité à la douleur. Ainsi, l'étude des sphères cognitive et affective et leurs corrélats neurobiologiques sera effectuée en lien avec le phénotype (dépressif ou non), l'exposition aux RF et le sexe.

⁹⁸ De l'anglais « *Flinders Sensitive Line* ».

Nouvelle approche de mesure de l'activité cérébrale sous RF

Imagerie ultrasonore fonctionnelle du cerveau de rongeurs sous exposition RF

Delia Arnaud-Cormos, Xlim, UMR 7252 CNR - Limoges

Équipe partenaire : **Yann Percherancier**, Université de Bordeaux I, IMS CNRS UMR 5218 - Talence

Étude de faisabilité (de déc. 2018 à mai 2020) – Financement : 49.712 € – Contact : delia.arnaud-cormos@xlim.fr

Mots-clés : cerveau, in vivo, expérimentation animale, radiofréquence, imagerie ultrasonore, rayonnement électromagnétique, téléphone mobile, système nerveux central, dosimétrie, absorption onde, interaction, neurone, échodoppler

Un grand nombre de recherche ont été menées, ces vingt dernières années, pour répondre aux nombreuses questions soulevées par l'utilisation croissante des téléphones portables et/ou des systèmes de télécommunications sans fil. Mais les résultats sont souvent contradictoires et ne parviennent pas à démêler les mécanismes d'interaction entre les neurones et les rayonnements des téléphones portables. Comment évaluer les effets biologiques potentiels induits par les champs électromagnétiques ? Comment déchiffrer ces interactions subtiles entre la matière vivante et les radiofréquences (RF) de faible niveau ?

Une nouvelle technique révolutionnaire laisse entrevoir de nouvelles possibilités pour observer *in vivo* l'activité cérébrale (en temps réel) et la connectivité fonctionnelle⁹⁹ sur des souris exposées aux radiofréquences.

⁹⁹ Manière dont les différentes régions du cerveau interagissent entre elles et forment des réseaux dits « fonctionnels » (en anglais, « *resting state networks* »).

La neuro-imagerie

La neuro-imagerie est une technique récente d'imagerie cérébrale ; elle permet de suivre l'activité du cerveau à travers des changements des flux sanguins. Grâce à une nouvelle méthode « fUS »¹⁰⁰, qui marque l'introduction des ultrasons dans cette forme d'imagerie cérébrale, elle permet d'« imager » en temps quasi-réel l'activité cérébrale chez de petits animaux (ex. rongeurs) avec une grande résolution spatiale et temporelle.

Par conséquent, notre objectif est d'essayer de tirer parti de cette technique au cours d'un protocole expérimental, pour affiner les mesures obtenues lors de l'exposition de souris aux RF de faible intensité.

Le projet de recherche : RadioFlow

Après avoir amélioré le rapport « signal » à « bruit » des images, nous avons exploité un système qui permet d'« imager » le cerveau de la souris anesthésiée par échographie Doppler, c'est-à-dire de la manière la moins invasive possible¹⁰¹. Ainsi, les principaux objectifs de notre projet sont :

1. Le développement et la caractérisation d'un système « tête seule » pour l'enregistrement de l'activité cérébrale des souris lors de leur exposition aux radiofréquences ;
2. La réalisation de tests préliminaires pour évaluer l'efficacité de cette nouvelle application pour la surveillance de l'activité cérébrale des souris ;
3. L'obtention, à partir des investigations *in vivo*, de résultats préliminaires sur cette activité cérébrale pendant l'exposition aux RF.

¹⁰⁰ De l'anglais « *functional ultrasound imaging* ».

¹⁰¹ Sans chirurgie lourde et injection d'agents de contraste.

Méthodologie

Un nouveau système expérimental a été conçu pour permettre simultanément :

- L'exposition des souris « tête seule » aux champs RF à l'aide d'une antenne dipôle¹⁰² (ou dipolaire) ;
- L'enregistrement de l'activité cérébrale avec une sonde à ultrasons (fUS) développée par la startup Iconeus¹⁰³.

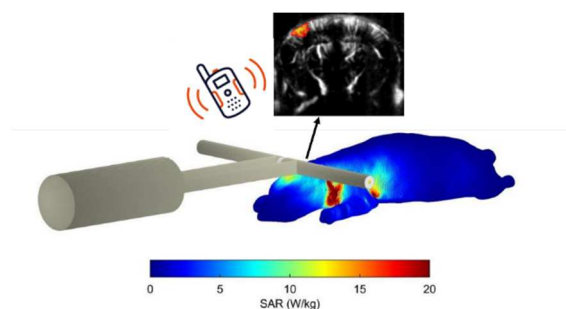


Illustration 22 : Suivi de l'activité cérébrale de souris pendant l'exposition aux RF (Crédits : XLIM-IMS)

Pour fournir une dosimétrie complète et précise de l'interaction entre le champ électromagnétique généré par l'antenne et les souris, trois modèles « fantômes » ont été utilisés et caractérisés, de forme de plus en plus réaliste : rectangulaire plat, souris simplifiée et en forme de souris.

Le débit d'absorption spécifique¹⁰⁴ (DAS) du système d'exposition a été évalué au moyen de mesures de température expérimentales et de simulations numériques de champ électrique. Sur la base de la dosimétrie, des expositions ont été réalisées à des valeurs DAS de 2W/kg, 6 W/kg, CW¹⁰⁵ et GSM¹⁰⁶.

¹⁰² Antenne constituée de deux brins métalliques, alimentée en son milieu pour transmettre (ou recevoir) de l'énergie électromagnétique : adaptée, ici, à la fréquence considérée de 1,8 gigahertz (GHz).

¹⁰³ Site internet : <http://iconeus.com>

¹⁰⁴ Ou SAR en anglais « *Specific Absorption Rate* ».

¹⁰⁵ De l'anglais « *continuous wave* » pour onde continue : onde électromagnétique d'amplitude et de fréquence constantes.

Résultats

Pour la première fois, nous avons évalué dans cette étude, la possibilité d'analyser les réponses cérébrales en temps réel des souris lors d'une exposition aux RF. Ces travaux constituent une première étape fondamentale pour une étude plus poussée des interactions entre RF et le système nerveux central.

L'analyse des résultats obtenus à 6 W/kg ne montre clairement aucun impact de l'exposition sur la réponse évoquée dans le cortex sensoriel primaire¹⁰⁷ « S1HL » gauche, après stimulation des moustaches controlatérales et de la matrice de connectivité fonctionnelle moyenne. Les résultats complémentaires à 2W/kg vont faire aussi l'objet d'une analyse approfondie.

Nous envisageons de poursuivre nos efforts pour évaluer les effets des RF, sur l'activité cérébrale de souris éveillées et apporter de précieuses informations, en particulier lors de l'étude de nouveaux signaux.

Publications :

R. Orlacchio, Y. Percherancier, F. Poulletier de Gannes, A. Hurtier, I. Lagroye, P. Leveque, D. Arnaud-Cormos, "In Vivo Functional Ultrasound (fUS) Real-Time Imaging of Mice Brain Under Radiofrequency Exposure". *Bioelectromagnetics*, Avril 2022.

¹⁰⁶ De l'anglais « *Global System for Mobile Communication* », norme numérique pour la téléphonie mobile.

¹⁰⁷ Cortex sensoriel primaire, membres postérieurs. De l'anglais, « *Primary sensory cortex hind limb* ».

Variation des effets intracérébraux des radiofréquences selon l'état de santé

Effets des radiofréquences 2G et 4G de la téléphonie mobile sur la microglie activée et l'activité neuronale en contexte neuroinflammatoire

Michel MALLAT, ICM, Inserm U1127, CNRS UMR 7225, Sorbonne Université, Paris

Équipes partenaires : **Séverine Boillée**, ICM, INSERM U.1127, CNRS UMR 7225, Sorbonne Université, Paris – **Jean-Marc Edeline**, Institut des Neurosciences Paris-Saclay, UMR 9197, CNRS, Université Paris Saclay, Centre CEA Saclay – **Philippe Lévêque**, XLIM, UMR 7252 CNRS Université de Limoges, Limoges

Projet de recherche (Durée : 44 mois) –
Financement : 276.345 € – Contact :
michel.mallat@upmc.fr

Mots-clés : inflammation, système nerveux central, cerveau, neurone, microglie, culture cellulaire, radiofréquence, téléphonie mobile, absorption onde, effet biologique, risque sanitaire, neurotransmission, électrophysiologie, modèle animal, rat, souris, modélisation, *in vivo*, *in vitro*, ARN messenger, cytokine, histone

Les états neuroinflammatoires sont des composants importants de nombreuses pathologies à caractères résolutifs ou évolutifs et qui touchent directement ou indirectement le système nerveux central (SNC). Il s'agit notamment de maladies neurodégénératives ou métaboliques, de certaines infections virales ou bactériennes, de l'épilepsie, d'affections psychiatriques, d'accidents vasculaires, de tumeurs cérébrales, ou d'atteintes traumatiques du SNC. Ces réactions neuro-inflammatoires impliquent des modifications morphologiques et fonctionnelles de cellules cérébrales, qui influent sur l'activité des réseaux neuronaux et qui peuvent favoriser ou au contraire limiter l'émergence ou le développement de lésions cérébrales.

L'activation de la microglie

Présentes dans toutes les structures du SNC, les cellules de la microglie font partie du système immunitaire dit « inné ». L'activation de la microglie survient lors de pathologies touchant le SNC et elle joue un rôle clé dans le développement et le contrôle des réactions neuroinflammatoires. Bien que ses caractéristiques varient selon le contexte pathologique, l'activation microgliale comporte typiquement un élargissement ou des modifications de la capacité des cellules à produire des médiateurs de l'inflammation.

Le projet de recherche : 2-4Ginf

Notre hypothèse de travail est que la sensibilité ou la réponse des cellules cérébrales aux RF peut varier selon l'état de santé des sujets exposés. Les travaux présentés ici reposent sur des modèles animaux *in vivo* ou *in vitro* compatibles avec des analyses aux niveaux cellulaires et moléculaires, ce qui permet de mieux appréhender les effets biologiques des RF et leurs éventuels impacts sanitaires. Ils font suite à des études antérieures¹⁰⁸, qui montraient que, chez des rats sujets à une neuro-inflammation aigue, une exposition de la tête à des RF de type GSM-1800 MHz (2G) pouvait provoquer des modifications transitoires de la morphologie des cellules microgliales et de la neurotransmission.

Ces observations incitaient à approfondir l'analyse des effets des signaux GSM sur des cellules clés de la neuroinflammation tel que la microglie et ils posaient la question des effets d'autres signaux électromagnétiques utilisés par la téléphonie mobile, sur les individus sujets à des états neuroinflammatoires.

¹⁰⁸ Projets Neurinf 1800 (2015-RF-12) et Microg-1800 (2013-RF-03) financés par le PNR EST. Cf. Michel Mallat. 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. *Les cahiers de la Recherche. Santé, Environnement, Travail*, ANSES, 2017, Radiofréquences et santé, pp.26-28. ([anses-01791399](https://doi.org/10.18128/anses-01791399))

Objectifs

Notre projet avait pour but de rechercher *in vivo* des effets des signaux LTE -1800 MHz (4G) sur l'activité électrique des neurones et la morphologie de la microglie dans le contexte d'un épisode neuroinflammatoire aigu. Un second volet visait notamment à approfondir la caractérisation des effets des signaux GSM-1800 MHz sur la microglie selon l'état d'activation des cellules, par utilisation de cultures cellulaires (approche *in vitro*).

Méthodologie

Les analyses *in vivo* ont été menées sur des rats sujets ou non à un état neuroinflammatoire aigu¹⁰⁹ et exposés à des signaux LTE-1800 MHz (4G) d'une durée de 2h et d'incidence limitée à la tête. Elles ont comporté la détermination des puissances absorbées par le tissu cérébral (DAS : débit d'absorption spécifique), une analyse électrophysiologique de l'activité des neurones et une étude morphologique de la microglie menés au niveau du cortex auditif¹¹⁰.

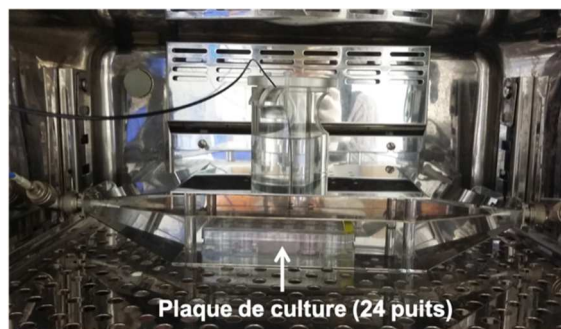


Illustration 23 : Plaque de culture (24 puits) insérée dans un dispositif logé à l'intérieur d'une étuve de culture. L'alimentation électrique du dispositif permet une exposition calibrée des cellules microglialesensemencées dans les puits de culture à des signaux de type GSM 1800MHz (Crédits : Michel Mallat)

Les analyses *in vitro* ont exploité un système conçu pour l'exposition de cultures cellulaires aux signaux GSM, et appliqué à des cellules

microgliales purifiées à partir de cerveaux de souris normales. Les cultures microgliales ont et soumises ou non à des traitements par des activateurs chimiques avant et pendant les expositions aux signaux GSM. Les analyses ont porté sur l'expression microgliale de marques épigénétiques (protéines associées à l'ADN de type histones méthylées ou acétylées) ou de gènes codant pour des médiateurs de l'inflammation (cytokines, enzymes), par quantification de taux de protéines, d'activités enzymatiques ou d'ARN messagers correspondants.

Résultats

• Études *in vivo*

Les observations *in vivo* ont porté sur le cortex auditif de rats au niveau duquel le DAS moyen résultant d'une exposition aux signaux LTE, atteignait la valeur de 0,5 W/kg. Chez des rats sujets à un état neuroinflammatoire aigu, l'exposition aux signaux LTE a entraîné des modifications de l'activité électrique des neurones avec une réduction de la force de la réponse évoquée par des sons purs ou par des vocalisations naturelles, ainsi qu'une augmentation du seuil acoustique dans les basses et moyennes fréquences, qui se manifestent entre 3 et 6 h après la fin de l'exposition. Ces changements sont survenus en l'absence de modification de l'étendue des zones corticales occupées par les corps cellulaires et les prolongements des cellules microgliales. Chez les rats sains, une même exposition aux signaux LTE n'a pas provoqué de changement des seuils acoustiques ou de la force des réponses neuronales induites par les stimuli sonores.

• Études *in vitro*

Il est apparu que l'exposition *in vitro* de cellules microgliales purifiées à des signaux GSM-1800 MHz peut entraîner des augmentations ou des diminutions de taux intracellulaires d'ARN messagers codant pour

¹⁰⁹ Induite par traitement au lipopolysaccharide (LPS).

¹¹⁰ Niveau à partir duquel les analyses de l'activité neuronale ont été réalisées.

des cytokines impliquées dans des réactions neuroinflammatoires ou pour des enzymes productrices de forme réactives de l'oxygène ou catalysant la déméthylation ou la déacétylation d'histones. Ces modifications de taux d'ARN ont été observées dans des cellules activées par un agent proinflammatoire tel que le lipopolysaccharide. Elles surviennent en réponse à des expositions aux signaux GSM d'une durée de 15 h avec des valeurs du DAS égales ou supérieures à 0.65 W/kg. Aucune modification reproductible n'a été observée au niveau du taux ou de l'activité enzymatique des protéines testées. L'impact fonctionnel de ces modulations d'ARN messagers reste donc incertain. Par ailleurs, les taux d'ARNm sont restés inchangés dans des cultures microgliales exposées aux signaux GSM en l'absence de traitement activateur des cellules.

Conclusions

Nos travaux montrent des modifications de l'activité neuronale ou de l'expression de gènes microgliaux induites par des signaux LTE- ou GSM-1800 MHz, dans des contextes expérimentaux qui modélisent des réactions neuroinflammatoires aiguës. Ils confortent l'hypothèse d'une augmentation de la sensibilité de cellules cérébrales aux signaux GSM ou LTE lors de réactions neuroinflammatoires. Cependant, les modifications rapportées ont été observées en réponse à des expositions prolongées et à des valeurs du DAS ($\geq 0,5$ W/kg) qui restent plus élevées que celles évaluées au niveau du cortex cérébral humain dans des situations d'usage de téléphones portables.

Publications :

Souffi S, Lameth J, Gaucher Q, Arnaud-Cormos D, Lévêque P, Edeline JM, Mallat M. Exposure to 1800 MHz LTE electromagnetic fields under proinflammatory conditions decreases the response strength and increases the acoustic threshold of auditory cortical neurons. *Sci Rep* 12, 4063 (2022) <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07923-9>

L'exposition prénatale au Wifi

Exposition prénatale aux signaux radiofréquences de type Wifi : effets sur le développement neuronal et le comportement à l'âge adulte chez la souris

Bruno BONTEMPI, CNRS UMR 5293, IMN-Université de Bordeaux, Centre Broca Nouvelle-Aquitaine, Bordeaux

Équipes partenaires : **Philippe Lévêque**, XLIM CNRS-Université de Limoges, Limoges - **Émilie Pacary**, Neurocente Magendie, INSERM U1215-Université de Bordeaux, Bordeaux

Projet de recherche (de janvier 2019 à juin 2022) –
Financement : 199.680 € – Contact : bruno.bontempi@u-bordeaux.fr

Mots-clés : neurone, expérimentation animale, dosimétrie, radiofréquence, exposition prénatale, souris, système nerveux central, enfant, nouveau-né

Suite au développement important des technologies radiofréquences (RF), la loi No 2015-136 dite « Abeille »¹¹¹ pose le principe de sobriété face à l'exposition du public aux ondes électromagnétiques. Elle vise à protéger plus particulièrement les enfants, en interdisant le Wi-fi dans les espaces dédiés à l'accueil, au repos et aux activités des établissements collectifs accueillant des enfants de moins de trois ans. Cependant, peu de données sont disponibles sur les effets d'une exposition au Wi-Fi survenant au début de la vie ou pendant la période de gestation. Cela suscite d'une part, l'inquiétude du public et nécessite d'autre part, des recherches supplémentaires quant aux effets potentiellement dangereux de ce type d'exposition pour la santé. En raison de la proximité des téléphones mobiles avec la tête, c'est le système nerveux central (SNC) qui fait l'objet des plus grandes interrogations.

¹¹¹ Loi No 2015-136 promulguée le 9 février 2015 (sous l'impulsion de la députée Laurence Abeille) relative à la sobriété, la transparence, l'information et la concertation en matière d'exposition aux ondes électromagnétiques.

Le développement du cerveau

Dès les premiers mois de la grossesse, le cerveau commence à se former et à évoluer. Au cours de la vie embryonnaire, quelques milliers de neurones naissent, migrent et se différencient ; ils doivent communiquer entre eux (s'interconnecter) pour que le cerveau puisse fonctionner. Un défaut dans la formation des circuits neuronaux¹¹² et/ou dans l'organisation du cerveau peut entraîner des déficiences cognitives et une susceptibilité accrue à des altérations psychiatriques et neurologiques majeurs tels le trouble du déficit de l'attention (hyperactivité), les troubles du spectre autistique ou la schizophrénie.

Or, certaines études conduites chez des mammifères montrent que les gènes et l'environnement agissent de concert pendant des périodes de sensibilité accrues (ex. période prénatale, petite enfance, adolescence).

Le projet de recherche : WIFIDEV

Étant donné que nous sommes exposés en quasi permanence aux signaux Wi-Fi, notre projet visait à évaluer l'effet de ces expositions sur le développement des embryons ainsi que sur le développement du cerveau et son fonctionnement à l'âge adulte. Pour ce faire, nous avons utilisé des souris non-consanguines mâles et femelles comme modèle d'étude préférentiel, car les mécanismes de base du développement du cerveau, de la distribution cellulaire et de la maturation du cerveau sont comparables à ceux du cerveau humain.

Méthodologie

L'exposition des souris aux RF de type Wi-Fi a été effectuée en continu, 24 heures sur 24, du premier jour de la gestation au vingt-et-unième jour après la naissance – cette période couvrant

les principales phases du développement cérébral :

- Les équipements d'exposition comportaient deux cages d'exposition, l'une servant à l'exposition aux signaux Wi-Fi et l'autre faisant office de témoin¹¹³ ;
- Les réglages et l'étalonnage des niveaux d'exposition ont été effectués pour garantir les valeurs de débit d'absorption spécifiques (DAS) souhaitées, c'est-à-dire 0,08 W/kg corps entier¹¹⁴.
- Le développement du cortex cérébral et les processus associés ont été caractérisés pour évaluer :
 - L'impact de l'exposition au Wi-Fi sur les processus de développement neuronal ;
 - Les conséquences sur le développement de l'architecture neuronale, qui joue un rôle clé dans la connectivité des futurs neurones ;
 Les conséquences comportementales à l'âge adulte à l'aide de paradigmes ciblant les fonctions motrices, l'anxiété, l'interaction sociale ainsi que certains aspects de la dépression et des capacités d'apprentissage et de mémoire.

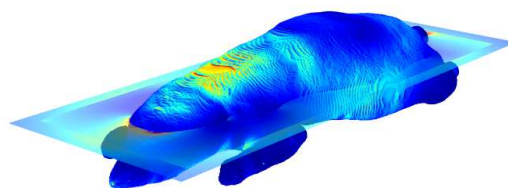


Illustration 24 : Exemple de Débit d'Absorption Spécifique (DAS) et cartographie de champ électromagnétique (plan horizontal) lors de l'exposition d'un modèle de souris à un signal de type Wi-Fi de 2,45 GHz (Crédits : Philippe Lévêque, Xlim, CNRS Université de Limoges)

¹¹³ Absence de RF.

¹¹⁴ Pour une souris de 20 à 25 grammes, le générateur et l'amplificateur ont été réglés pour générer un champ électrique dans la zone d'exposition autour de 20V/m (valeur cohérente avec les valeurs de référence pour l'exposition chez l'homme : 61 V/m effectifs pour un DAS de 0,08 W/kg corps entier.

¹¹² À la naissance, le cerveau d'un nouveau-né compte déjà cent milliards de neurones environ.

Résultats

Nos travaux n'ont pas révélé d'effets positifs ou négatifs significatifs des RF de type Wi-Fi ni sur le poids de la femelle gestante, les tailles des portées, le ratio mâle/femelle ou la croissance des souriceaux, ni sur le développement de leur cerveau et de leurs comportements à l'âge adulte. Compte-tenu de ces résultats, nous ne recommandons pas de changement dans les normes de protection actuelle des populations.

Toutefois, si aucun risque direct ne semble apparaître chez des souris normales (sans comorbidités), l'exposition aux signaux Wi-Fi pourrait constituer un risque pour des personnes fragilisées par un environnement ou une génétique à risque. Une analyse comportementale similaire pourrait être réalisée chez des animaux ayant déjà une pathologie développementale légère ou subissant, par exemple, un stress chronique.

Dommages à l'ADN et ondes millimétriques

Analyse de la voie de réponse aux dommages à l'ADN en réponse à une co-exposition comprenant les ondes millimétriques

Rémy PEDEUX, Inserm U1242, COSS, Équipe Proteostasis and Cancer (PROSAC), Université Rennes 1

Équipes partenaires : **Yves Le Dréan**, Irset, Inserm U1085, Équipe Transcription, Environnement & Cancer, Université Rennes 1 – **Maxim Zhadobov**, IETR, UMR CNRS 6164, Université Rennes 1

Étude de faisabilité (de nov. 2019 à oct. 2021) -
Financement : 49.853 € – Contact :
remy.pedoux@univ-rennes1.fr

Mots-clés : exposition multiple, radiofréquence, rayonnement électromagnétique, onde millimétrique, exposition, technologie information communication, génotoxicité, cellule, ADN, stress oxydant, étude faisabilité, technologie, communications, télécommunication, évaluation risque

L'usage intensif des technologies radiofréquences (RF) et des services associés (applications mobiles, flux audio et vidéo en *streaming*, réseaux sociaux...) entraîne la saturation des gammes de fréquences existantes et nécessite le recours à des fréquences porteuses plus élevées, dont la technologie 5G¹¹⁵ et les ondes millimétriques. En France, il est prévu d'exploiter deux nouvelles bandes de fréquences (3,5 GHz et 26 GHz), la limite supérieure de ce spectre de fréquences concernant les ondes millimétriques, peu utilisées en télécommunication et donc moins étudiées, jusqu'à présent, que les RF en ce qui concerne leur innocuité.

La réparation de l'ADN

En réponse aux inquiétudes sociétales, de très nombreuses équipes de recherche ont étudié les effets des RF susceptibles de compromettre

¹¹⁵ Cinquième génération.

l'intégrité physique ou fonctionnelle du génome (génétoxicité). Bien qu'aucun effet pérenne « sur la perte de l'intégrité de l'ADN n'a(it) été mis en évidence en condition thermique », les experts de l'Anses reconnaissent toutefois qu'« il n'est pas impossible que dans certaines conditions, les RF induisent des cassures de l'ADN (...) Néanmoins, ces dernières sont souvent de faible ampleur (proche du bruit de fond naturel) et sont probablement rapidement réparées. Elles sont vraisemblablement sans conséquence pour l'intégrité des chromosomes. »¹¹⁶



Illustration 25 : Radiofréquences et santé (Anses, oct. 2013)

Ces conclusions suggèrent que les systèmes de réparation de l'ADN sont suffisamment efficaces pour gérer les altérations subies lors de l'exposition aux RF. Ainsi, si l'hypothèse d'une relation entre exposition, stress oxydant

et effet génotoxique¹¹⁷ est vraie, alors les dégâts occasionnés ne sont pas assez nombreux pour déborder la capacité autoréparatrice des cellules.

Cependant, du point de vue de l'analyse du risque, il reste maintenant à confirmer que les systèmes de réparation sont bien mobilisés sous exposition et évaluer l'impact que pourrait avoir cette exposition sur des personnes présentant des défauts génétiques au niveau de certains de ces systèmes.

Les ondes millimétriques

Les ondes millimétriques (OMM) correspondent aux fréquences comprises entre 30 et 300 GHz¹¹⁸. Comparées aux radiofréquences, l'énergie transmise au corps est absorbée très localement. Ce qui implique que la profondeur de pénétration de ces ondes est plus faible et son corolaire, qu'une exposition aux OMM induit en surface du corps, un débit d'absorption spécifique (DAS) bien plus élevé.

Les effets biologiques des OMM peuvent être divisés en deux catégories : les effets thermiques (avérés) pour les rayonnements de forte puissance et les effets non-thermiques (toujours controversés) à plus faible puissance. À certains niveaux de puissance intermédiaire¹¹⁹, ces ondes sont utilisées en thérapie¹²⁰ dans les pays de l'ex-Union Soviétique. Ce qui suggère que des interactions sont possibles entre les OMM et les organismes vivants.

Avant l'utilisation massive de ces nouvelles technologies de communication par le grand public, il convenait de vérifier si une exposition aux OMM pouvait ou non entraîner des lésions de l'ADN, les réparer...

¹¹⁷ Hypothèse avancée par Kesari et al.

¹¹⁸ De 1 mm à 10 mm en termes de longueur d'onde.

¹¹⁹ À la limite des effets thermiques de 5 à 15 mW/cm².

¹²⁰ Gammes utilisées : 42,2 GHz, 53,6 GHz et 61,2 GHz.

¹¹⁶ Radiofréquences et santé, Avis de l'Anses, octobre 2013.

Le projet de recherche : CoExpO

En utilisant des approches et des méthodologies novatrices, notre projet était d'apporter des connaissances complémentaires sur les effets biologiques ou sanitaires des OMM, en amont de leur déploiement dans le grand public. Il répondait ainsi aux thématiques prioritaires de l'Anses : tenir compte « des évolutions d'utilisation de fréquences liées aux nouveaux usages et nouvelles technologies de communication. »

L'objectif était de réaliser une étude pilote d'une durée d'un an, afin de vérifier s'il était nécessaire d'étudier plus en détail, l'impact des OMM sur la réponse aux dommages à l'ADN nucléaire lorsqu'il y a co-exposition avec un stress génotoxique¹²¹.

Méthodologie

Nos travaux se sont concentrés sur :

- Les dommages induits par des cassures double-brin de l'ADN car ce sont des lésions à haut risque (cancérogènes) ;
- Les dommages produits par un stress oxydatif car ils sont très fréquents et affectent aussi la réplication de l'ADN.

Trois lignées cellulaires ont été utilisées *in vitro* :

- Deux lignées de cellules humaines de peau car cet organe est la cible privilégiée des OMM ;
- Une lignée de cellules tumorales « U2OS »¹²² classiquement utilisées dans l'étude des voies de signalisation des dommages à l'ADN et leur réparation.
- Enfin, les cellules ont été placées dans un incubateur à 37°C et exposées à une fréquence de 60 GHz comme

précédemment décrit¹²³. Pour la majorité des expériences, la densité de puissance incidente correspondait au maximum d'exposition autorisée par les normes actuellement en vigueur, soit 1 mW/cm².

Résultats

Une première série d'expériences montre qu'une exposition aiguë aux OMM n'induit pas de dommages à l'ADN nécessitant l'activation des voies de signalisation de la réponse aux dommages. De même, le consortium n'a pas mis en évidence d'effet potentialisateur des ondes sur ces voies de signalisation, ce qui semble indiquer que les OMM ne sont pas co-génotoxiques non plus. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par de nombreuses études *in vitro* sur les RF. Ils devront être confirmées par des méthodes de détection plus sensibles. **Car, en utilisant des techniques très sensibles, jamais utilisées jusqu'à présent pour ce type d'étude, le consortium a montré qu'il pourrait y avoir un effet des OMM sur la capacité des cellules à réparer des cassures double brin de l'ADN dans un contexte de co-exposition.** Les résultats obtenus étant significatifs, mais faible en termes d'effet, il sera nécessaire de répéter ces expériences pour les confirmer et bien caractériser le phénomène. Au final, il semble donc que le basculement vers des fréquences plus élevées ne change pas radicalement la donne en ce qui concerne la dangerosité directe de l'exposition mais des études complémentaires, utilisant des méthodes très sensibles seront nécessaires le confirmer.

¹²¹ En général, pour acquérir des connaissances détaillées et claires, l'effet d'un seul stress « à la fois » est étudié. En réalité, les cellules sont souvent soumises à l'action de plusieurs stress auxquels elles doivent répondre et/ou s'adapter.

¹²² Ostéosarcome humain.

¹²³ Alexis J. Haas, Yann Le Page, Maxim Zhadobov, Artem Boriskin, Ronan Sauleau and Yves Le Drean. Impact of 60-GHz Millimeter Waves on Stress and Pain-Related Protein Expression in Differentiating Neuron-Like Cells. *Bioelectromagnetics* 37:444-454 (2016)

La réponse adaptative aux radiofréquences

Réponse adaptative aux champs radiofréquence : l'autophagie est-elle la clé ?

Muriel PRIAULT, CNRS, IBGC CNRS UMR 5095, Bordeaux

Équipes partenaires : **Maria Rosaria Scarfi**, CNR-IREA, Naples (Italie) – **Isabelle Lagroye**, École Pratique des Hautes Études, Laboratoire IMS, Talence

Projet de recherche (de janvier 2018 à février 2021) – Financement : 251.160 € – Contact : muriel.priault@ibgc.cnrs.fr

Mots-clés : radiofréquence, champ électromagnétique, réponse adaptative, autophagie, test comète, neuroblastome, cellule tumorale, cellule

Les effets des radiofréquences (RF) sur la santé du public ont fait l'objet de multiples études donnant des résultats très éclectiques. Pour le moment, aucun effet génotoxique (endommagement de l'ADN) des RF n'a été démontré. ADAPT explore au contraire la possibilité que le préconditionnement à des RF puisse protéger des dommages à l'ADN si le modèle est exposé à des agents génotoxiques.

L'autophagie

Considérée comme un processus physiologique essentiel, l'autophagie se produit au niveau cellulaire en réponse à différents stress (ex. stress oxydant, stress nutritif, infection virale ou bactérienne). C'est un mécanisme intracellulaire qui permet de dégrader puis recycler les composants cellulaires non essentiels ou endommagés pour protéger les cellules.

Afin d'évaluer les effets protecteurs potentiels des RF, des cellules humaines ont été exposées en laboratoire à des signaux GSM-900 combinés avec un traitement par un agent oxydant, la ménadione (MD) produisant des

effets génotoxiques. Une diminution du stress génotoxique a été observée par comparaison avec des cellules non pré-exposées aux RF: c'est la réponse adaptative (RA). Comme le mécanisme moléculaire de la RA reste inconnu, ce système expérimental ouvre la possibilité d'explorer si l'autophagie a été déclenchée au cours de la RA.

Le projet de recherche : ADAPT

Devant la variabilité des résultats obtenus dans le domaine des RF et du bioélectromagnétisme, nous avons voulu tester si un effet bénéfique pouvait être observé : notamment, par la stimulation d'une réponse au stress (ou autophagie).

Les objectifs consistaient par ordre d'importance à :

1. Parvenir à ce que deux laboratoires reproduisent de façon indépendante la réponse adaptative observée suite à l'exposition cumulée « RF+ménadione » de cellules SH-SY5Y ;
2. Déterminer si l'autophagie est la voie de signalisation mise en place dans la réponse adaptative ;
3. Déterminer le rôle du stress oxydant (ROS) dans la réponse adaptative ;
4. Explorer *in vitro* et *in vivo* de nouveaux paramètres pour la mise en place de la réponse adaptative.

Méthodologie

Les paramètres *in vitro* pour lesquelles une réponse adaptative avait été systématiquement observée, sont les suivants :

Cellules	SH-SY5Yensemencées à 800 000 cellules par puits
Durée/fréquence d'exposition	Pendant 3h (48h après ensemencement)
	Pendant 10h (48h après ensemencement)
	De 53h à 63h après ensemencement
RF	1h par jour sur 3 jours (dès 24h après ensemencement)
	1950 MHz, UMTS, DAS 0,3 W/kg
Ménadione	1950 MHz, UMTS, DAS 1,25 W/kg
	10 µM pendant 1h avant récolte

Résultats

Bien que les deux laboratoires aient respecté le même protocole expérimental, ils n'ont pas réussi à obtenir les mêmes résultats. De plus, les mesures de l'activité autophagique ne montrent pas de différence significative entre des cellules exposées aux RF seules ou des cellules pré-conditionnées aux RF et exposées à la ménadione. Par contre, si l'autophagie est inhibée, la réponse adaptative n'est plus observée, ce qui indique un lien entre ces deux phénomènes.

Les résultats obtenus par ce projet de recherche confirment donc la grande variabilité des phénomènes biologiques mesurés en réponse aux radiofréquences. La question de l'implication de l'autophagie dans la réponse adaptative nécessite de nouvelles études plus approfondies pour documenter de façon plus exhaustive les arguments.

Publications :

Inhibition of Autophagy Negates Radiofrequency-Induced Adaptive Response in SH-SY5Y Neuroblastoma Cells.

Sannino A, Scarfi MR, Dufossée M, Romeo S, Poeta L, Prouzet-Mauléon V, Priault M, Zeni O. *Int J Mol Sci.* 2022 Jul 29;23(15):8414.

doi: [10.3390/ijms23158414](https://doi.org/10.3390/ijms23158414). PMID: 35955556

Label-Free Study of the Global Cell Behavior during Exposure to Environmental Radiofrequency Fields in the Presence or Absence of Pro-Apoptotic or Pro-Autophagic Treatments.

Joushomme A, Garenne A, Dufossée M, Renom R, Ruigrok HJ, Chappe YL, Canovi A, Patrignoni L, Hurtier A, Poulletier de Gannes F, Lagroye I, Lévêque P, Lewis N, Priault M, Arnaud-Cormos D, Percherancier Y. *Int J Mol Sci.* 2022 Jan 8;23(2):658.

doi: [10.3390/ijms23020658](https://doi.org/10.3390/ijms23020658). PMID: 35054844

Abréviations utilisées

3GPP, De l'anglais « 3rd Generation Partnership Project » (consortium)

5G, Cinquième génération

Afsset, Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

ANFR, Agence nationale des fréquences

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

Arcep, Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse

BRET, De l'anglais « Bioluminescence Resonance Energy Transfer »

CEA, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

CEM, Champs électromagnétiques

CIRC, Centre international de recherche sur le cancer

CNRS, Centre national de la recherche scientifique

C-V2X, De l'anglais « cellular vehicle to X »

CW, De l'anglais « continuous wave » (onde continue)

D-2HG, D-2 hydroxyglutarate (oncométabolite)

DAS, Débit d'absorption spécifique

EA, Équipe d'accueil

EBF, Extrêmement basse fréquence

EHS, De l'anglais « Electromagnetic hypersensitivity » (hypersensibilité électromagnétique)

FSL, De l'anglais « Flinders Sensitive Line »

fUS, De l'anglais « functional ultrasound imaging »

GHz, Gigahertz

GPS, De l'anglais « Global Positioning System » (assistant de navigation)

GSM, De l'anglais « Global System for Mobile Communication » (2G)

IC, Indice de confiance

Icnirp, Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants

INCa, Institut national du cancer

Ineris, Institut national de l'environnement industriel et des risques

Inrae, Institut national de la recherche agronomique

INRS, Institut national de recherche et de sécurité

Inserm, Institut national de la santé et de la recherche médicale

IoT, De l'anglais « Internet Of Things » (Internet des Objets)

Itmo, Institut thématique multi-organisme

ITS, De l'anglais « Intelligent Transport System » (Système de transport intelligent ou STI)

LPS, Lipopolysaccharides

LTE, De l'anglais « Long Term Evolution »

MAP, De l'anglais « Mitogen-activated protein »

MMS, De l'anglais « Multimedia Message Service »

OMM, Onde millimétrique

OMS, Organisation mondiale de la santé

ONIE, Ondes non ionisantes électromagnétiques

OR, Odds ratio (rapport des chances ou rapport des cotes)

PNR EST, Programme national de recherche en Environnement-Santé-Travail

PST, Plan santé au travail

RAS, De l'anglais « Retrovirus Associated Sequences »

RF, Radiofréquences

ROS, De l'anglais « Reactive oxygen species »
(Espèces Réactives de l'Oxygène)

S1HL, Cortex sensoriel primaire, membres postérieurs. De l'anglais, « Primary sensory cortex hind limb »

SCENIHR, Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux

SCM, Sensibilité chimique multiple

SMS, De l'anglais « Short Message Service »

SNC, Système nerveux central

SLA, Sclérose latérale amyotrophique

TRP, De l'anglais « Transient Receptor Potential »
(potentiel de récepteur transitoire)

UMR, Unité mixte de recherche

UMTS, De l'anglais "Universal Mobile Telecommunications System" (3G)

WiFi, De l'anglais « wireless fidelity »

Table des illustrations

Illustration 1 : Téléphone acoustique de Hooke	5
Illustration 2 : Premier schéma du téléphone (Elisha Gray).....	5
Illustration 3 : L'expérience de Hertz (1886).....	6
Illustration 4 : Le théâtrophone (affiche de Jules Chéret, 1896).....	6
Illustration 5 : Onde électromagnétique, oscillation couplée du champ électrique (E) et du champ magnétique (B).....	6
Illustration 6 : Schéma transmission radio	7
Illustration 7 : Le spectre des ondes électromagnétiques	7
Illustration 8 : Les ondes humaines (Le petit inventeur, 1928).....	8
Illustration 9 : Les dangers de l'électricité (Le petit inventeur, 1928).....	8
Illustration 10 : La télévision (Le petit inventeur, 1929)	8
Illustration 11 : Part des personnes (de plus de 15 ans) s'étant connectées à Internet ou ayant fait un achat en ligne au cours des trois derniers mois (Source : Insee, 15 fév. 2022)	9
Illustration 12 : Évolution de la 1G à la 5G en France	10
Illustration 13 : Exposition aux radiofréquences et santé des enfants (Anses, juin 2016)	14
Illustration 14 : Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (Anses, mars 2018).....	14
Illustration 15 : Exposition aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie « 5G » (Anses, février 2022)	14
Illustration 16 : L'écosystème automobile (Crédits : Gabriella Tognola)	15
Illustration 17 : Le projet de recherche 5G-SAMU (Crédits : Yann Percherancier)	19
Illustration 18 : La régulation thermique, en réponse au froid (Auteur : Thi Cuc Mai).....	21
Illustration 19 : Site Interphone, https://interphone.iarc.fr/	23
Illustration 20 : Lunettes de réalité virtuelle (Crédits : Getty Images).....	25
Illustration 21 : Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (Anses, Édition scientifique, mars 2018).....	27
Illustration 22 : Suivi de l'activité cérébrale de souris pendant l'exposition aux RF (Crédits : XLIM-IMS)	30
Illustration 23 : Plaque de culture (24 puits) insérée dans un dispositif logé à l'intérieur d'une étuve de culture (Crédits : Michel Mallat)	32
Illustration 24 : Exemple de Débit d'Absorption Spécifique (DAS) et cartographie de champ électromagnétique (plan horizontal) lors de l'exposition d'un modèle de souris à un signal de type Wi-Fi de 2,45 GHz (Crédits : Philippe Lévêque, Xlim, CNRS Université de Limoges).....	34
Illustration 25 : Radiofréquences et santé (Anses, oct. 2013)	36

Mentions légales

Ce numéro des *Cahiers de la Recherche* 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).

Ont contribué à ce numéro

Delia Arnaud-Cosmos, Xlim, Limoges – **Bruno Bontempi**, CNRS UMR 5293, Bordeaux - **Monica Guxens**, ISGlobal, Barcelone – **Michel Mallat**, Sorbonne Université, Paris – **Rémy Pedeux**, PROSAC, Université de Rennes 1 – **Yann Percherancier**, UMR 5218, Talence - **Anne Pereira de Vasconcelos**, CNRS UMR 7364, Strasbourg – **Muriel Priault**, CNRS, IBGC CNRS UMR 5095, Bordeaux - **Joachim Schüz**, IARC, Lyon – **Brahim Selmaoui** et **René de Sèze**, Ineris, Verneuil-en-Halatte - **Gabrielle Tognola**, IEIIT, Milan

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des contributeurs, et plus particulièrement Henri Bastos, Liacine Bouaoun, Fabrice Coutureau-Vicaire, Aurélie Desbrée, Isabelle Domain, Christine Druesne, Laëticia Dubois, Céline Fernandes, Sophie Guitton, Delphine Lascar, Ivan Le Gallo, Sophie Le Quellec, Philippe Lévêque, Flore Mathurin, Olivier Merckel, Lucie Moreels, Anne-Laure Moriaux, Frieda Ngoué, Aurélie Pajon, Sabine Puisseux, Virginie Sadé, Matthieu Schuler, Nathalie Thieriet, Anne Tilloy

Directeur de la publication :

Pr Benoit Vallet (Directeur général, Anses)

Conception et réalisation :

Nathalie Ruaux (Direction financement Recherche et Veille, Anses)

Suivez l'actualité de l'Agence sur les réseaux sociaux



@Anses_fr



<https://www.linkedin.com/company/french-agency-for-food-environmental-and-occupational-health-&-safety-anses->

Archives ouvertes

HAL-Anses est la plateforme d'auto-archivage permettant le dépôt et la consultation de l'ensemble de la production scientifique des chercheurs et des évaluateurs scientifiques de l'Anses (hors avis).

Découvrez la collection des *Cahiers de la Recherche* sur la plateforme d'archive ouverte HAL-Anses !

The screenshot displays the HAL-Anses website. At the top, there is a navigation bar with the HAL logo and the text 'LES CAHIERS DE LA RECHERCHE Santé, Environnement, Travail'. To the right are the logos for the République Française and Anses. Below the navigation bar, there are tabs for 'Page d'accueil', 'Consultation', 'Recherche', and 'Site internet'. The main content area is divided into two columns. The left column, titled 'ACTUALITÉS', features an article titled 'L'EXPOSITION DES ENFANTS (01/12/2021)' with a detailed text block. The right column, titled 'RECHERCHE', contains a search bar with the placeholder text 'Termes de recherche (* pour tous)' and a list of 'MOTS CLÉS' including terms like Nanoparticule, Pesticide, Alimentation, Rhinite, Interaction, Épidémiologie, etc. At the bottom of the screenshot, there is a URL: https://hal-anses.archives-ouvertes.fr/CAHIERS_DE_LA_RECHERCHE.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL est destinée au dépôt et à la diffusion d'articles scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.





anses

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