

Panorama des ondes non ionisantes électromagnétiques (ONIE) et de leurs principaux usages

Par Dr René de SEZE

Médecin et chercheur à l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)

Il existe de nombreuses applications des champs électromagnétiques. Certaines sont bien connues du grand public. Elles utilisent une fonction informationnelle transportée par les ondes, notamment dans le domaine des radios et télécommunications. D'autres sont plus des applications de niche, industrielles ou médicales. De nombreuses technologies utilisent la fonction énergétique de chauffage par ondes radiofréquences (ou micro-ondes). La mise en évidence de certains phénomènes surprenants exige l'introduction de nouveaux mécanismes d'interaction entre le champ électromagnétique et le vivant, ce qui ouvre de nouveaux horizons à des développements technologiques et nécessite des travaux de recherche audacieux et un soutien dans la durée de la part d'industriels visionnaires porteurs d'une stratégie à long terme.

Introduction

Les utilisations des ondes non ionisantes électromagnétiques (ONIE), connues surtout en télécommunications, sont en plein développement dans d'autres secteurs : médecine, industrie, agroalimentaire...

Nous dressons dans cet article un panorama de ces ondes non ionisantes électromagnétiques (ONIE), et présentons quelques exemples de relations existant entre la recherche publique et les entreprises dans ce domaine. Seront notamment décrits les rapports entre les phénomènes électromagnétiques non ionisants et les tissus vivants, ainsi que leurs principaux usages actuels.

Les ONIE dans notre environnement

Au sein du domicile de chacun de nous, différents appareils fonctionnant à l'électricité émettent des champs électromagnétiques (CEM ⁽¹⁾) lors de leur utilisation : ce sont les appareils électroménagers, la télévision, les ordinateurs, les tablettes, les lampes fluoro-compactes (basse consommation) ou à LEDs, etc. La fréquence utilisée ici est de 50 Hz ; elle est appelée « extrêmement basse fréquence », correspondant à l'acronyme ELF en anglais. Dans ces applications, le champ produit n'est pas intention-

nel mais un épiphénomène : il résulte du courant qui fait fonctionner les équipements.

Une application majeure des ondes ou champs électromagnétiques est le domaine des radiocommunications (téléphonie mobile, WiFi, bluetooth, télécommandes, objets et vêtements communicants...). En téléphonie mobile, plusieurs générations coexistent en Europe : le GSM 900 et le GSM 1800 (ces chiffres correspondent à la fréquence en MHz) communément appelés 2G ; l'UMTS 2100 et UMTS 900 correspondant à la 3G, et la 4G ou LTE (Long Term Evolution, à 800 MHz, 900 MHz, 1 800 MHz, 2 600 MHz et 4 700 MHz) ; la 5G (à 3,5 GHz et 26 GHz) ouvre, quant à elle, au monde des objets connectés ou communicants. Les puissances des terminaux sont comprises entre 1 et 250 mW. Celle du WiFi est de l'ordre de 100 mW, à une fréquence de 2,45 GHz. Ces fréquences sont appelées radiofréquences (RF), car elles sont comprises entre 9 kHz et 300 GHz.

Un moyen classique constituant une alternative au WiFi pour transférer de l'information en réseau, et qui est souvent utilisé pour l'Internet domestique, est constitué par les courants porteurs en ligne ou CPL. Il s'agit d'une modulation du signal électrique du circuit d'alimentation en 50 Hz, à des fréquences de l'ordre de dizaines de kilohertz. C'est aussi cette technologie qui est utilisée dans certains compteurs communicants comme les compteurs Linky (ANSES, 2017). Les fils électriques n'étant pas conçus pour « rayonner », le champ produit décroît très rapidement autour des fils, et reste ainsi de très faible intensité.

(1) L'attention est appelée sur le fait que dans le domaine des radiocommunications, l'acronyme CEM est aussi fréquemment employé pour désigner la compatibilité électromagnétique.

Ces deux types d'applications illustrent l'aspect informationnel du rayonnement électromagnétique, celui qui permet de transporter de l'information à distance.

Dans la gamme des radiofréquences, les CEM sont également utilisés dans l'industrie et dans des applications médicales comme moyens d'information ou de production d'énergie. C'est notamment le cas des puces d'identification appelées RFID, des portiques antivols, des fours à induction, des presses à souder le plastique, qui fonctionnent à des fréquences se situant entre 20 kHz et 30 MHz, et des fours micro-ondes à plus haute fréquence (2,45 GHz – puissance variant de 600 à 1 200 W pour les applications domestiques). De nouvelles applications actuellement en développement concernent la recharge de batteries, dont celles des véhicules, le fonctionnement ou la recharge d'équipements sans fil à distance – on parle alors d'« électricité sans fil » –, les objets communicants, dont des montres, des vêtements, des équipements de sport, et l'imagerie THz. Une autre méthode en développement, appelée technologie par impulsions magnétiques, connaît déjà de nombreuses applications industrielles : soudure sans contact, sertissage, découpage de pièces métalliques...

Les expositions liées aux ONIE

Il existe deux types de champs : le champ électrique, exprimé en volts par mètre (V/m), et le champ magnétique, communément exprimé en teslas (T), milliteslas (mT) ou en microteslas (μT). Ces champs peuvent être stables dans le temps : on dit qu'ils sont « statiques » ou variables, et leur fréquence de variation (le nombre d'oscillations par seconde) s'exprime en hertz (Hz). Lorsqu'ils sont variables, l'existence d'un type de champ (électrique ou magnétique) devient indissociable de l'autre : cela produit une onde électromagnétique. Elle se caractérise par sa densité d'exposition exprimée en W/m^2 lorsqu'elle est absorbée en superficie, ou par le débit d'absorption spécifique ou DAS

en W/kg lorsqu'elle est absorbée plus en profondeur. L'intensité des champs produits peut varier en fonction de la puissance des équipements et de la distance à laquelle ils sont utilisés (de quelques μT à plusieurs mT et de quelques V/m à quelques centaines de V/m). Un rapport du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) établi en 2011 pour le compte de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) inclut une synthèse des niveaux d'exposition à différentes sources électromagnétiques basses fréquences (voir la Figure 1 ci-dessous).

Appareils électriques	Champ magnétique (μT)	Champ électrique (V/m)
Radio réveil A	0,08	16
Bouilloire électrique A	0,06	11
Grille-pain	0,21	10
Lave-vaisselle	0,21	9
Radio-réveil B	0,14	30
Machine à café express	0,7	8
Four à micro-ondes A	3,6	13
Cuisinière mixte	0,2	6
Four à micro-ondes B	7	4
Table à induction	0,2	32
Sèche-cheveux	0,05	28
Alimentation de PC	0,02	18
Bouilloire électrique B	0,05	18
Téléviseur LCD 15 p	0,01	75

Figure 1 : Mesures de l'intensité des champs magnétiques et électriques produits par différents équipements, à une distance de 30 centimètres.

Des exemples d'équipements en fonction de leur gamme de fréquences sont présentés ci-dessous (voir la Figure 2 ci-après).

Dans le cas des téléphones mobiles, l'exposition des utilisateurs est en lien avec l'usage qu'ils en font. En raison de la proximité du corps et de la décroissance rapide du champ avec la distance, la puissance mesurée est celle absorbée dans les tissus les plus exposés (les plus proches du combiné – exposition locale). La puissance absorbée, ou DAS (débit d'absorption spécifique), est moyennée sur un volume de 10 g et est le plus souvent de l'ordre de 0,2 à 1,5 W/kg , pour une utilisation vocale au contact de l'oreille.

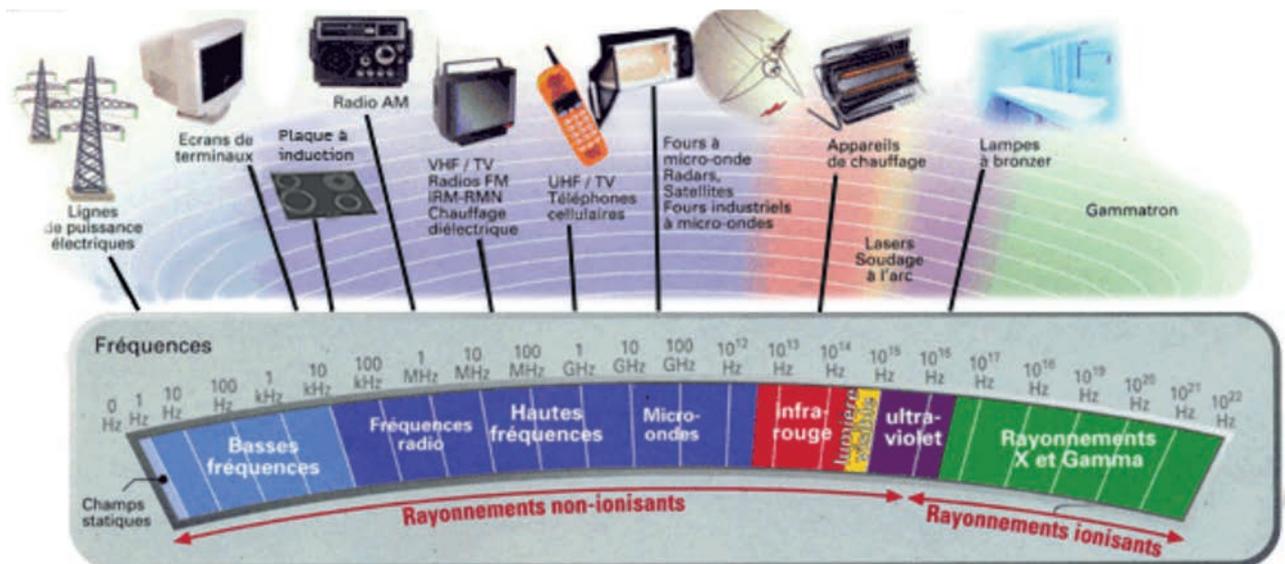


Figure 2 : Spectre des fréquences – Illustration de quelques applications dans chaque gamme de fréquences.

Elle peut être moindre pour le cerveau, mais plus importante au contact d'une autre partie du corps (la cuisse lorsque le téléphone est dans la poche, la main, etc.), lorsque le téléphone est utilisé pour des transferts de données : chargement de fichiers, visualisation de films ou d'émissions, consultation sur Internet...

Un autre type d'exposition provient des antennes relais de téléphonie mobile, des antennes de radiodiffusion et de télévision. Ces sources émettent en continu, à des fréquences se situant entre 10 kHz et 6 GHz. La puissance d'une station de base est supérieure à celle d'un téléphone mobile, mais, compte-tenu de la distance entre ces équipements et le corps humain, la puissance absorbée par l'organisme est 1 000 à 10 000 fois moindre que lors d'une conversation avec un téléphone portable. On dit dans ce cas que l'exposition est « corps entier » (c'est-à-dire sur l'ensemble du corps). Avec la 5G, des antennes pourraient être installées à des distances moindres par rapport aux personnes, et il pourrait y avoir, localement et temporairement, des expositions plus importantes, même si elles devraient être plus faibles en moyenne sur la durée et dans l'espace.

Des expositions plus spécifiques au milieu médical (ICNIRP, 2017) sont liées, d'une part, aux examens d'imagerie médicale par résonance magnétique (IRM – champ statique s'échelonnant de 0,15 à 2 T – et même jusqu'à 7 T pour les plus récents utilisés en recherche médicale) et, d'autre part, à des traitements en rééducation physique ou à des applications cosmétiques (ICNIRP, 2020). Avec la miniaturisation des composants et l'essor des nanomatériaux, la bioélectronique, au travers plus précisément de l'électroceutique, trouve de nombreuses applications dans le domaine médical, du diagnostic ou de la thérapeutique.

Outre les applications manufacturées, il existe des champs naturels : le champ magnétique terrestre est un champ statique de l'ordre de 50 μ T. Il existe aussi autour de nous un champ électrique produit par une couche supérieure de l'atmosphère, l'ionosphère ; son intensité est de 100 V/m par beau temps. Les orages peuvent en générer un de plusieurs kV/m. Des champs électriques et magnétiques sont aussi produits par l'activité électrique des cellules de l'organisme, nerveuses et musculaires, et sont utilisés à des fins diagnostiques. Et à des niveaux beaucoup plus faibles, il existe un rayonnement astronomique d'ondes radiofréquences.

Les processus biologiques mis en jeu de façon volontaire ou involontaire par les ONIE chez les organismes vivants

Les applications décrites précédemment sont fondées sur les mécanismes d'interaction des CEM avec la matière inerte ou biologique (de Seze, 2015). Une grande partie de ces phénomènes sont bien compris et bénéficient d'une explication mécanistique, parfois très simple, et quelquefois plus complexe, notamment avec le vivant. Classiquement, un champ électrique peut agir sur des électrons, des ions ou des molécules polarisées ; un champ magnétique peut

agir sur un moment magnétique, et un champ magnétique variable peut aussi engendrer des courants (courants de Foucault ou courants de Faraday). Il peut aussi exister des effets quantiques basés sur la formation de niveaux d'énergie discrets sous l'action d'un champ magnétique (effet Zeeman) ou d'un champ électrique (effet Stark). Comme indiqué précédemment, l'interaction d'un champ ou d'une onde avec un milieu peut s'exprimer par le contenu des signaux véhiculés (fonction informationnelle) ou par l'absorption de l'énergie produite (fonction énergétique).

Sans entrer dans les détails, nous précisons que le déplacement d'électrons dans un champ électrique est à la base des télécommunications radio, des télécommandes et de la RFID, établies par l'intermédiaire d'un champ électrique variable qui se propage entre les antennes et les composants électroniques sous forme d'ondes électromagnétiques. Dans un milieu hydraté, comme l'est typiquement le milieu vivant, le déplacement des molécules d'eau polarisées fait l'objet d'une absorption diélectrique, qui se traduit par un échauffement. C'est le principe du four à micro-ondes et de nombreuses applications industrielles. Combiné à un champ magnétique statique qui oriente les moments magnétiques et dédouble ainsi les niveaux d'énergie de molécules, ions ou particules élémentaires comme les électrons et les nucléons, un champ de radiofréquences peut produire le phénomène de résonance paramagnétique électronique⁽²⁾ ou celui de résonance magnétique nucléaire⁽³⁾. Ces phénomènes sont principalement utilisés en biologie et en médecine. Dans le domaine des basses fréquences, un champ électrique variable peut aussi provoquer un échauffement, voire une fusion des matériaux conducteurs. Un champ électrique à basse fréquence pénètre peu les milieux biologiques, mais un champ magnétique variable peut y induire des courants et, par conséquent, produire ou modifier des potentiels d'action sur les cellules excitables, en particulier les neurones. Ce phénomène est utilisé dans la magnéto-neurostimulation, principalement pour réaliser des diagnostics, mais aussi dans quelques applications thé-

(2) La résonance paramagnétique électronique (RPE) désigne la propriété de certains électrons non appariés à pouvoir absorber, puis réémettre l'énergie d'un rayonnement électromagnétique lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique, en raison de leur important moment magnétique (définition adaptée de Wikipedia : https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sonance_paramagn%C3%A9tique_%C3%A9lectronique#Lev%C3%A9e_de_d%C3%A9g%C3%A9n%C3%A9rescence_entre_moments_magn%C3%A9tiques).

(3) La résonance magnétique nucléaire (RMN) est un phénomène lié à la propriété de certains noyaux atomiques possédant comme dans le cas de la RPE, un moment magnétique important lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique. Lorsqu'ils sont soumis à un rayonnement électromagnétique (radiofréquence), le plus souvent appliqué sous forme d'impulsions, les noyaux atomiques peuvent absorber l'énergie du rayonnement, puis la relâcher lors de la relaxation. L'énergie mise en jeu lors de ce phénomène de résonance correspond à une fréquence très précise dépendant du champ magnétique et d'autres facteurs moléculaires (définition adaptée de Wikipedia : [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sonance_magn%C3%A9tique_nucl%C3%A9aire#:~:text=La%20r%C3%A9sonance%20magn%C3%A9tique%20nucl%C3%A9aire%20\(RMN,plac%C3%A9s%20dans%20un%20champ%20magn%C3%A9tique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sonance_magn%C3%A9tique_nucl%C3%A9aire#:~:text=La%20r%C3%A9sonance%20magn%C3%A9tique%20nucl%C3%A9aire%20(RMN,plac%C3%A9s%20dans%20un%20champ%20magn%C3%A9tique))).

rapeutiques, comme la stimulation magnétique transcrânienne.

Un autre phénomène, sensoriel et sans conséquence pathologique, est la perception de sensations lumineuses ou colorées sous exposition à un champ magnétique variable de quelques dizaines de hertz et quelques milliteslas (Modolo, Hassan *et al.*, 2020). Ce phénomène, appelé magnéto-phosphènes, ne constitue pas un risque sanitaire. Le mécanisme d'interaction qui lui est classiquement attribué se traduirait par des courants induits qui entraîneraient une dé-polarisation des récepteurs ou des nerfs visuels. Cette explication reste à vérifier, des études sont menées en ce sens.

Dans le domaine des effets quantiques, un mécanisme mis en évidence dans la magnéto-navigation chez les oiseaux dans le champ terrestre repose sur une modification de la durée de la liaison entre deux molécules dans un champ magnétique, ce qui modifie l'équilibre des proportions entre les produits de certaines réactions chimiques. Ce mécanisme est plus communément appelé « mécanisme des paires de radicaux libres » (Hore et Mouritsen, 2016).

Il a été montré par ailleurs que des rongeurs exposés à des champs RF de faible intensité réagissaient comme s'ils avaient froid (Mai, Delanaud *et al.*, 2020 ; Mai, Braun *et al.*, 2021). Des travaux récents confirment une action des RF sur différents aspects de la régulation thermique (épisodes de thermogénèse, vasoconstriction...), sans que ceux-ci suggèrent pour l'instant des risques sanitaires potentiels qui en découleraient.

Enfin, un article récent décrit le cas de souris diabétiques guéries par la combinaison d'un champ magnétique et d'un champ électrique. Ces observations, qui devront également faire l'objet d'explorations mécanistiques fondamentales, ouvrent la voie à des possibilités thérapeutiques extrêmement nouvelles et prometteuses (Carter, Huang *et al.*, 2020).

Par ailleurs, il faut souligner que la plupart des applications prennent leur source dans des travaux souvent de longue durée de recherche publique, qu'il s'agisse du domaine des télécommunications ou d'applications industrielles ou médicales spécifiques. Certaines applications médicales font aujourd'hui partie de notre quotidien : IRM, physiothérapie, magnéto-neurostimulation, électrothérapie... D'autres, reposant sur des mécanismes non identifiés à ce jour, restent considérées pour l'instant comme marginales et ne sont pas financées par des agences de recherche ou de grands groupes industriels ; elles font l'objet de travaux de recherche qui restent en France assez confidentiels comparativement à d'autres pays (magnétothérapie, par exemple). Ainsi, l'utilisation des champs magnétiques pulsés pour traiter les pseudarthroses⁽⁴⁾ a fait l'objet de nombreux travaux aux États-Unis, en Italie et en Belgique, alors qu'ils ne sont que très rares en France. Certains hôpitaux russes recourent à de très nombreuses applications

des champs électromagnétiques, allant du laser au champ magnétique statique, pour traiter de multiples pathologies. Des applications thermiques des ondes radiofréquences sont également mises en œuvre comme traitement anticancéreux dans des hôpitaux chinois.

Liens entre la recherche publique et les entreprises

Une grande majorité des applications commerciales ont d'abord reposé sur des travaux de recherche publique, tant dans le domaine des télécommunications que dans celui du diagnostic médical ou de la bioélectronique à visée thérapeutique. Elles bénéficient dans la durée de ces coopérations lorsque celles-ci ont lieu. Ces travaux peuvent faire l'objet de l'attribution de bourses CIFRE, éventuellement de bourses universitaires allouées par le ministère de la Recherche et de l'Enseignement supérieur ou encore de réponses favorables à leur candidature à des appels d'offres d'agences de recherche (comme l'ANR ou l'ANSES), de fondations (comme la Fondation pour la recherche médicale) ou de l'Union européenne. Certains travaux aux fondements scientifiques encore insuffisamment clarifiés sont paradoxalement difficiles à faire accepter par les comités scientifiques, alors même qu'il s'agit justement de potentielles ruptures. Ils font parfois l'objet de contrats passés directement entre les entreprises qui fabriquent les équipements et les équipes de recherche, mais les montants concernés restent faibles et revêtent un caractère occasionnel, ce qui ne permet pas de mener des travaux élaborés dans la durée (comme c'est souvent le cas avec des doctorants) et donc d'avancer véritablement sur la voie de compréhensions nouvelles.

Conclusion

À côté d'applications grand public en plein développement concernant les télécommunications, les ondes non ionisantes électromagnétiques sont l'objet de nombreuses applications industrielles moins connues, se rapprochant davantage de logiques « de niche » en termes de volumes. En outre, les progrès de la miniaturisation et l'essor des nanocomposants ouvrent un vaste champ à la bioélectronique médicale ou au secteur du fitness. Enfin, de nouveaux effets de mieux en mieux prouvés relèvent de mécanismes pour l'instant incompris, qui justifieraient des travaux rigoureux pour mieux les identifier et en faire émerger les potentielles applications. Il est regrettable que ces développements potentiels soient considérés avec frivolité par la plupart des acteurs privés et publics, y compris les académiques.

Références

ADEME & LNE, rapport d'étude n°M010492 « Estimation de l'impact sanitaire des principales sources de champ électromagnétique en environnement résidentiel », Laboratoire de compatibilité électromagnétique (direction des essais) et Laboratoire de métrologie haute fréquence (direction de la métrologie scientifique et industrielle), 15 novembre 2011.

ANSES, rapport « Exposition de la population aux champs électromagnétiques émis par les "compteurs communicants" », juin 2017.

(4) Défaut de consolidation après fracture osseuse dans lequel le cal de réparation reste cartilagineux au lieu de s'ossifier.

CARTER C. S., HUANG S. C., SEARBY C. C., CASSAIDY B., MILLER M. J., GRZESIK W. J. *et al.* (2020), "Exposure to Static Magnetic and Electric Fields Treats Type 2 Diabetes", *Cell Metab* 32(4), pp. 561-574.e567.

Colloque ARET, « Les agents physiques, dangers et risques émergents liés aux ondes », Paris, 4-5 juin 2015.

DE SEZE R. (2006), *Mécanismes d'interaction des champs électromagnétiques avec les systèmes biologiques*.

HORE P. J. & MOURITSEN H. (2016), "The Radical-Pair Mechanism of Magnetoreception", *Annu. Rev. Biophys.* 45, pp. 299-344.

ICNIRP, "Statement on diagnostic devices using nonionizing radiation: existing regulations and potential health risks", *Health Physics* 112(3), 2017, pp. 305-321.

ICNIRP, "ICNIRP statement – Intended human exposure to non-ionizing radiation for cosmetic purposes", *Health Phys.* 118(5), 2020, pp. 562-579.

MAI T. C., DELANAUD S., BACH V., BRAUN A., PELLETIER A. & DE SEZE R. (2020), "Effect of non-thermal radiofrequency on body temperature in mice", *Scientific Reports* 10(1): 5724.

MODOLO J., HASSAN M., RUFFINI G. & LEGROS A. (2020), "Probing the circuits of conscious perception with magnetophosphores", *J Neural Eng* 17(3): 036034.

Références plus générales

CGE, « Innover avec les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (ONIEA/NIEAW) – Conditions d'un développement dynamique et sûr en France », 4 septembre 2020.

CGEDD/CGE/IGF/IGAS, « Déploiement de la 5G en France et dans le monde : aspects techniques et sanitaires », septembre 2020.

PERRIN Anne & SOUQUES Martine (Éds) (2018), *Champs électromagnétiques, environnement et santé – 2^{ème} édition*, Paris, EDP Sciences, Collection « InterSections. SFRP », ISBN : 978-2-7598-2258-4.

Portail interministériel d'information sur les radiofréquences « Portail radiofréquences santé – Environnement » : www.radiofrquences.gouv.fr

Site ondes-info de l'INERIS : <https://ondes-info.ineris.fr>