

# Introduction

## Les ONIEA : un domaine sous-exploré et délicat à exploiter, mais prometteur

Par Dominique DRON et Ilarion PAVEL

Conseil général de l'Économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies (CGEJET)

Les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (ONIEA) naturelles sont utilisées par les organismes vivants, végétaux et animaux, qu'ils en émettent ou les perçoivent et les interprètent. En outre, les fréquences des ondes produites par les activités humaines s'étendent sans cesse. La connaissance et les utilisations des ONIEA se développent rapidement, ainsi que la découverte d'effets insoupçonnés. Malgré une recherche publique reconnue, la France semble sous-estimer les potentialités médicales, industrielles et agroalimentaires de ces champs en pleine expansion.

Les sons et les champs électromagnétiques non ionisants sont continûment utilisés par les organismes vivants, végétaux et animaux, qu'ils en émettent ou les perçoivent et les interprètent. Aussi différents qu'ils puissent paraître, les processus qu'ils initient dans les cellules de ces organismes sont proches, tant pour leur reconnaissance membranaire que pour les réactions cellulaires qu'ils peuvent induire. Cette parenté des actions biologiques des ondes électromagnétiques et des ondes acoustiques nous a conduit à les regrouper du point de vue de leurs effets et de leurs utilisations envisageables, dans le cadre de deux rapports successifs du Conseil général de l'Économie<sup>(1)</sup>.

La subtilité de ces interactions fait l'objet de développements scientifiques et techniques très rapides, et pour certains très récents. La recherche publique française ainsi que certaines PME sont bien placées internationalement sur ces sujets. Mais force est de constater que la plupart des institutions, des administrations comme des entreprises, semblent sous-estimer dangereusement la puissance de ce domaine, en termes tant de potentialités notamment médicales que d'impacts humains et environnementaux, les unes n'allant pas sans les autres d'un point de vue biologique.

(1) DRON D., MAGNE Y. & PAVEL I. (2019), « Enjeux des usages industriels et commerciaux des ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques », [https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions\\_services/cge/ondes.pdf](https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/ondes.pdf) ; DRON D. & PAVEL I. (2020), « Innover avec les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (ONIEA/NIEAW) », <https://www.economie.gouv.fr/cge/ondes-usages-emergents>

### Champs et ondes naturels et de synthèse

#### Champs et ondes naturels

Notre univers, à l'état naturel, foisonne de champs électriques et magnétiques, parfois couplés à des ondes électromagnétiques et parcourus d'ondes acoustiques. Les ondes électromagnétiques sont portées par des photons, les ondes acoustiques par les molécules de l'air ; les phénomènes physiques sont donc très différents. En revanche, seuls ou couplés à d'autres signaux, ces champs et ces ondes fournissent aux êtres vivants – animaux, végétaux, macro- ou micro-organismes – des informations aussi importantes que les perceptions chimiques (goût, odorat) ou le sens du toucher : il peut s'agir de l'heure de la journée, de l'orientation dans l'espace, de la météorologie, de la vision nocturne, ou de tous les messages sonores intra- ou interspécifiques situés ou non dans le spectre de l'audition humaine.

**Les signaux électromagnétiques** sont intéressants pour les organismes vivants, car ils sont beaucoup plus rapides que les signaux chimiques (qui eux sont de l'ordre du cm/sec) et demandent moins de dépenses énergétiques.

Les champs magnétiques et électriques sont associés à une source électrique ou magnétique. Lorsqu'ils ne varient pas, il s'agit de champs statiques<sup>(2)</sup>.

(2) C'est le cas du champ électrique de la Terre (de 100 à 150 V/m par beau temps et jusqu'à 10 à 15 kV/m sous un orage) et de son champ magnétique (30 à 70 µT, selon la latitude).

Selon les lois de l'électromagnétisme, toute variation d'un champ électrique crée un champ magnétique, et inversement. Les ondes électromagnétiques sont constituées par le couplage d'un champ électrique et d'un champ magnétique orthogonaux, elles se déplacent à la vitesse de la lumière dans la même direction ; ce couplage s'auto-entretient même en l'absence d'influence des sources des ondes, et ce sur de longues distances, et pratiquement à l'infini dans le vide. Comme toute onde, une onde électromagnétique est caractérisée par sa fréquence (ou sa longueur d'onde) et sa puissance.

Suivant les lois quantiques, toute onde électromagnétique est constituée de quanta, appelés photons, dont l'énergie est proportionnelle à leur fréquence. Ainsi, à partir de l'ultraviolet (12,4 eV et plus<sup>(3)</sup>), cette énergie est suffisante pour arracher des électrons aux atomes rencontrés, il s'agit des ondes dites ionisantes ; l'ultraviolet extrême, les rayons X et gamma, qui sont observés à l'état naturel dans le rayonnement solaire ou produits par la désintégration, sont des éléments radioactifs. Les rayonnements ionisants connaissent des applications importantes en matière d'imagerie médicale et de traitement de cancers (les rayons X, notamment). Ils interviennent également dans les réacteurs nucléaires pour la production d'énergie ou dans le fonctionnement des armes thermonucléaires<sup>(4)</sup>.

En-deçà de 12,4 eV, les ondes électromagnétiques sont dites non ionisantes (ONIE). À l'état naturel, il s'agit du rayonnement solaire ultraviolet, visible ou infrarouge, mais aussi, à des fréquences beaucoup plus basses (de 0 à 80 Hz), des ondes électromagnétiques engendrées par les organismes vivants, par exemple dans leur cerveau<sup>(5)</sup>.

**Une onde acoustique** est une vibration mécanique qui se propage de proche en proche, dans un milieu matériel gazeux, liquide ou solide, en particulier dans l'air. Elle est produite par l'oscillation d'une source qui communique cette vibration aux molécules de l'air.

Les organismes vivants, qu'ils soient dotés ou non d'organes de perception acoustique spécialisés, reçoivent et émettent de tels signaux sur des spectres de fréquences très variables. Et plus encore, ils les interprètent et les utilisent. Les émissions animales vont des infrasons (baleines, éléphants, girafes) aux ultrasons (chauve-souris, dauphins). Les plantes sont capables d'interpréter des signaux acoustiques couvrant une grande part du spectre, et sembleraient même en émettre qui soient interprétables par d'autres plantes, par exemple en cas de sécheresse<sup>(6)</sup>.

(3) Soit des fréquences supérieures à 3 PHz, et des longueurs d'onde inférieures à 100 nm.

(4) Les ondes ionisantes ne sont pas traitées dans ce numéro.

(5) [https://fr.wikipedia.org/wiki/Rythme\\_c%C3%A9%99%C3%A9%99](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rythme_c%C3%A9%99%C3%A9%99)

(6) Voir rapport CGE 2019 ; MISHRA Ratnesh Chandra, GHOSH Ritesh & BAE Hanhong (2016), "Plant acoustics: in the search of a sound mechanism for sound signaling in plants", *Journal of Experimental Botany*, vol. 67, n°15, pp. 4483-4494, doi:10.1093/jxb/erw235 ; FERNANDEZ-JARAMILLO *et al.* (2018), "Effects of acoustic waves on plants: an agricultural, ecological, molecular and biochemical perspective", *Scientae Horticulturae* 235 (218), pp. 340-348.

Bien que les ondes acoustiques soient connues et utilisées par les humains depuis longtemps, elles restent plus difficiles à mesurer que les ondes électromagnétiques.

### Les ondes non ionisantes d'origine anthropique

Le développement des activités humaines et celui de diverses technologies et de leur industrialisation ont ajouté des ONIEA non intentionnelles à cet univers. Ainsi, des ondes acoustiques sont apparues dans l'environnement sous la forme de bruits d'origine mécanique (les équipements agricoles et artisanaux, puis les machines industrielles, les forages, les explosifs), thermique (moteurs à explosion, bang sonique) ou électrique (moteurs électriques), avec l'apparition de nouveaux spectres fréquentiels, notamment les basses fréquences et les ultrasons, qui non perçus par l'oreille humaine le sont par le corps humain et d'autres espèces.

Des ondes électromagnétiques non intentionnelles sont également apparues dans les perceptions humaines. C'est le cas par exemple des ondes électromagnétiques dépassant les limites habituelles des équipements ménagers, comme les fours à micro-ondes ou les plaques à induction.

Enfin, et surtout, des ondes électromagnétiques ou acoustiques ont été volontairement développées et utilisées, en système ouvert ou en milieu confiné.

En milieu ouvert, il s'agit essentiellement des usages faits en matière de communication et de mesure. Ainsi, après la voix humaine et les instruments de musique, ce sont tous les équipements de télécommunications depuis les tambours jusqu'aux radiofréquences en passant par les sémaphores, mais aussi les instruments de mesure radars ou lidars, ainsi que les ondes acoustiques de très basse fréquence à usage militaire, pétrolier ou halieutique. Les fréquences de communications dites 5G, qui occupent les plages allant de 3,4 à 3,8 GHz, la plage 26-28 GHz, puis les bandes se situant entre 38 et 60 GHz, devraient venir s'ajouter à ce large paysage de signaux. Ces utilisations sont décrites dans ce numéro par René de Seze pour les ondes non ionisantes électromagnétiques (ONIE) et par Paul Avan pour les ondes non ionisantes acoustiques (ONIA). L'encadrement réglementaire des ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (ONIEA) en France est exposé par Natalie Commeau et Philippe Bodénez.

En milieu contrôlé, de nombreux usages médicaux existent aussi bien pour les ONIE que pour les ONIA ; les ultrasons sont aussi employés comme facilitateurs de réactions en sonochimie, etc. Les nombreuses utilisations émergentes des ONIEA sont détaillées dans plusieurs articles publiés dans ce numéro : pour les ondes acoustiques, Jean-François Aubry, David Attali et Alexandre Dizeux au plan scientifique, David Caumartin sous l'angle de l'activité d'une PME médicale, et Grégory Chatel en matière de sonochimie. Pour les ondes électromagnétiques, Yves Le Dréan et Morgane Lebosq décrivent les développements des ondes millimétriques en médecine. Marilena Radoiu dresse, quant à elle, les perspectives de la chimie assistée par micro-ondes, tandis qu'Illarion Pavel présente celles

des ondes Terahertz dans l'industrie, et que Hervé Floch, Patrice Gamand et leurs co-auteurs mettent en exergue les usages agroalimentaires des ONIE.

## Usages et impacts potentiels des ONIEA : deux faces de la même médaille

Les ONIEA intentionnellement développées en milieu ouvert, et destinées à porter des informations et donc à éviter les brouillages, n'existent donc pas, par construction, dans la nature. Nombre d'ONIEA anthropiques non intentionnelles sont également inédites. Elles introduisent des perturbations de plus en plus fréquentes dans les spectres perçus et utilisés par les organismes vivants. Ce caractère à la fois inédit et invasif des ONIEA anthropiques en milieu ouvert justifie l'étude de leurs impacts à la fois individuels et cumulés.

En outre, pris un par un, les intérêts par exemple médicaux des ONIEA sont dus à leur interaction avec certains fonctionnements physiologiques ; l'étude de leurs effets non intentionnels constitue donc tout autant une nécessité évidente d'un point de vue biologique qu'un moyen de découvrir d'autres usages, notamment thérapeutiques.

Les ONIEA agissent sur la membrane des cellules, en particulier *via* les canaux contrôlant les flux de calcium intracellulaires<sup>(7)</sup>. Les effets déjà observés des ONIEA sont très contrastés<sup>(8)</sup> : il peut s'agir de la stimulation de la croissance ou de la multiplication cellulaires (réacteurs à algues) ou, au contraire, de l'endommagement des membranes, de l'altération de l'équilibre acido-basique de la cellule ou de sa division mitotique, de la mise en résonance d'organismes de petite taille<sup>(9)</sup> ou encore de la modification des particules calciques servant à l'orientation des oiseaux ou des abeilles. Des processus quantiques sont aussi évoqués, par exemple dans le cas de la photosynthèse<sup>(10)</sup>. L'utilisation des ondes acoustiques comme stimulateurs ou orienteurs de croissance ou de multiplication végétales, voire plus particulièrement comme stimulateur des défenses, est très peu étudiée en France, contrairement à d'autres pays<sup>(11)</sup>.

Par ailleurs, des travaux de laboratoire ont montré des interactions synergiques entre les sons et les radiofré-

quences<sup>(12)</sup>, et font soupçonner l'intérêt de telles synergies dans la réduction des processus pro-inflammatoires. Enfin, certains traitements médicaux associent ONIE et ONIA.

La perturbation de certains modes neuronaux par des radiofréquences est observée en laboratoire, par exemple au département de bioélectronique des Mines de Saint-Étienne ou à l'Université de Bordeaux (voir l'Encadré inséré dans l'article d'Amandine Pelletier et Jean-Pierre Libert), tandis que des séquences acoustiques ciblées semblent induire une modulation orientable de synthèses protéiques, comme le démontre Olivier Gallet en collaboration avec la TPE Genodics.

Ces modes d'action fondent en parallèle des perspectives d'utilisation à un niveau cellulaire très fin, mais aussi des possibilités d'impacts non souhaités tout aussi subtils et puissants. Ainsi, le programme PERITOX a récemment montré chez le jeune rat qu'une exposition de cinq jours de celui-ci à des radiofréquences de 900 MHz accroissait ses lymphocytes B au détriment de ses lymphocytes T, ce qui tend à accroître la réponse inflammatoire cellulaire et à réduire la résistance aux virus et aux cancers<sup>(13)</sup>. C'est ce que décrivent Amandine Pelletier et Jean-Pierre Libert.

De réelles difficultés expérimentales ainsi que la sous-estimation des facteurs croisés (comme l'exposition concomitante à des polluants ou à un stress thermique) avaient rendu, pendant des années, nombre d'expérimentations sur les impacts des ONIE peu reproductibles. Aujourd'hui, les mécanismes d'action sont mieux connus et les dispositifs expérimentaux ont été, quant à eux, perfectionnés, qu'il s'agisse de tester des cellules, des groupes de neurones ou des organismes vivants comme les rongeurs. Il en est de même pour les ONIA, notamment pour mesurer les effets potentiels des basses fréquences. Olivier Merckel présente dans ce numéro les questions qui restent encore ouvertes en matière d'impacts des ONIA sur la santé et l'environnement.

## Un champ scientifique et concurrentiel actif que la France sous-estime

Sur un plan biologique, alors que la France du XIX<sup>e</sup> siècle était pionnière dans les utilisations médicales de l'électricité et du magnétisme, les institutions françaises comme les entreprises sont, paradoxalement, aujourd'hui majoritairement réticentes à explorer ces champs, par comparaison avec les domaines de la biochimie et de la biologie moléculaire et de synthèse. David Caumartin explique ainsi la viscosité procédurale et culturelle dont pâtit, en France, une PME de pointe dans le domaine des ultrasons médicaux. Pedro Ferrandiz, quant à lui, retrace trente années d'indifférence de la France vis-à-vis de ses observations (concrétisées par un brevet des années 1990) sur les effets de séquences acoustiques sur la croissance des plantes et sur la résistance de celles-ci aux pathogènes, et ce jusqu'à ce qu'un laboratoire ait la curiosité et le courage, en 2016, d'examiner ce sujet, avec la surprise pour le directeur de ce laboratoire (Olivier Gallet) de voir ces

(7) Le mécanisme sous-jacent pourrait être mécanique (tension membranaire), électrique (dépolarisation) ou de reconnaissance vibratoire.

(8) Pour d'autres exemples, voir les rapports CGE 2019 et 2020.

(9) Rapport CGE 2020, p. 46 : Selon Thielens A. *et al.* (2018) – "Exposure of insects to radiofrequency electromagnetic fields from 2 to 120 GHz", *Nature Scientific reports* 8:3924 –, faire passer au-dessus de 6 GHz 10 % des radiofréquences auxquelles sont exposés les insectes étudiés conduit à une augmentation de l'absorption des fréquences allant de 3 à 370 %, induisant des perturbations de leur morphologie, de leur physiologie et de leur comportement atteignant un maximum aux longueurs d'onde correspondant à la longueur de leur corps.

(10) Voir rapport CGE 2019, p. 46.

(11) Voir rapports CGE 2019 et 2020 : États-Unis, Russie, Allemagne, Royaume-Uni...

(12) Par exemple, le programme PERITOX-INERIS sur le sommeil et la régulation thermique de jeunes rats.

(13) Voir rapport CGE 2020, p. 44.

phénomènes confirmés : il s'agit maintenant d'en élucider les fondements. Dans l'intervalle, plusieurs pays ont travaillé sur un thème voisin, et la Chine, bien que s'appuyant sur des bases moins précises, a fondé le Centre de recherche en ingénierie et physique agricole de Qingdao et a commencé à vendre des stimulateurs acoustiques des défenses pour les cultures <sup>(14)</sup>.

La France accuse ainsi un retard qui réside moins dans la compréhension des interactions entre ONIEA et systèmes vivants que dans le développement de leur exploitation, notamment industrielle ; une situation en retrait si l'on compare à ce qui se passe, par exemple aux États-Unis, au vaste panorama décrit par Yves Frenot, Xavier Bressaud et Kevin Kok Héang, ou en Allemagne, dont Julien Potier présente l'organisation et les nombreux programmes, mais aussi au Royaume-Uni, en Finlande ou en Russie.

Par exemple, la DARPA a lancé en 2016 un appel à propositions couvrant l'ensemble des interactions des ondes avec le vivant, alors qu'Alphabet et GlaxoSmithKline créaient, la même année, une filiale de bioélectronique médicale, Galvani Bioelectronics, dotée de près de 700 millions de dollars sur sept ans et ciblant les maladies mentales et les maladies chroniques.

Parmi les découvertes récentes les plus frappantes, on peut citer celle de l'Université d'Iowa : cette université associée à l'hôpital d'Iowa City a montré qu'un champ électrique statique associé à un champ magnétique statique pouvait soigner de façon durable le diabète de type 2 chez la souris, ce qui ouvre effectivement la porte aux ONIE en matière de traitement des maladies chroniques <sup>(15)</sup>. Des champs magnétiques très basses fréquences et des ondes électromagnétiques pulsées s'avèreraient également à même de réguler les réactions inflammatoires des organismes. Ces voies sont prometteuses pour le traite-

ment des maladies auto-immunes, telles que les maladies neuro-dégénératives <sup>(16)</sup>. Cette capacité à réduire le niveau inflammatoire pourrait être aussi utilisée pour arriver à maîtriser des maladies comme la Covid-19.

## Conclusion

Les utilisations des ONIEA sont un domaine en pleine expansion, notamment dans l'industrie et dans le secteur médical. Sous peine d'être absente de ce champ, la France doit structurer de toute urgence sa R&D et ses secteurs industriels touchant aux ondes non ionisantes. Or, l'investissement français en R&D, notamment public, sur les ONIEA dans leur ensemble (hormis les systèmes de télécommunications) est modeste au regard de l'effort consenti par certains de nos voisins, chez lesquels il permet des développements industriels et médicaux considérables.

La France dispose néanmoins de plusieurs équipes transdisciplinaires de recherche publique internationalement connues et à l'origine de plusieurs premières mondiales, et est forte d'une présence reconnue dans le domaine des évaluations des impacts sanitaires des ondes considérées, qui peuvent aussi révéler en contrepoint des potentiels thérapeutiques importants en conditions contrôlées. Cette dynamique serait source de développements économiques originaux à potentiel mondial sur certains champs des ONIEA, tout en permettant d'en détecter les effets négatifs possibles, qui sont toujours périlleux à terme pour les entreprises.

En particulier, la nécessité de réduire les effets des perturbateurs endocriniens et des toxiques sur l'environnement et la santé *via* la chimie verte et l'agroécologie, ainsi que l'impact social, humain et économique de la crise de la Covid-19, doivent pousser la R&D sur les ONIEA ainsi que l'industrialisation en France de traitements et processus de fabrication fondés sur ces ondes pour que les laboratoires et les entreprises français prennent toute leur place dans ce domaine en pleine explosion.

(14) Voir rapport CGE 2019, p. 52.

(15) CARTER *et al.* (2020), *Exposure to static electric and magnetic fields treats type2-diabetes*, CellPress, 6 octobre, <https://www.cell.com/cell-metabolism/fulltext/S1550-4131%2820%2930490-3>

(16) Voir rapport CGE 2020, p. 27.