

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »
Charles Coquebert, Journal des mines n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)



Les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques : nouveaux savoirs, nouveaux enjeux

UNE SÉRIE DES
ANNALES
DES MINES
FONDÉES EN 1794

N° 103
JUILLET 2021

Publiées avec le soutien
de l'Institut MinesTélécom

UNE SÉRIE DES
**ANNALES
 DES MINES**
 FONDÉES EN 1794

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

ISSN : 1268-4783

Série trimestrielle • n°103 - juillet 2021

Rédaction

Conseil général de l'Économie (CGEJET), Ministère de
 l'Économie, des Finances et de la Relance
 120, rue de Bercy - Télédock 797 - 75572 Paris Cedex 12
 Tél : 01 53 18 52 68
<http://www.annales.org>

François Valérian

Rédacteur en chef

Gérard Comby

Secrétaire général

Alexia Kappelmann

Secrétaire générale adjointe

Magali Gimon

Assistante de rédaction

Myriam Michaux

Webmestre / Maquettiste

Membres du Comité de Rédaction

Pierre Couveinhes

Président du Comité de rédaction

Ingénieur général des Mines honoraire

Paul-Henri Bourrellet

Ingénieur général des Mines honoraire, Association
 française pour la prévention des catastrophes naturelles

Mireille Campana

Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

Dominique Dron

Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

Jean-Luc Laurent

Ingénieur général des Mines honoraire

Richard Lavergne

Conseil général de l'Économie

Ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance

Michel Pascal

Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

Didier Pillet

Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

Claire Tutenuit

Déléguée générale d'Entreprises pour l'Environnement (EPE)

François Valérian

Rédacteur en chef des Annales des Mines

Photo de couverture :

Atelier de production d'écrans tactiles de Jiangsu Huake
 Chuangzhi Technology Co., Chine, Parc Laser de Suqian.

Photo © Li Bo/XINHUA-REA

Iconographie

Christine de Coninck

Abonnements et ventes

CometCom

Bâtiment Copernic - 20, avenue Édouard Herriot

92350 LE PLESSIS-ROBINSON

Sébastien RODRIGUEZ

Tél : 01 40 94 22 33

Email : s.rodriguez@cometcom.fr

Mise en page : Nadine Namer

Impression : EspaceGrafic

Éditeur Délégué :

FFE - 15, rue des Sablons - 75116 PARIS - www.ffe.fr

Fabrication : Yael Sibony

Yael.Sibony@ffe.fr - 01 53 36 20 39

Régie publicitaire : Belvédère Com

Directeur de la publicité : Bruno Slama - 01 40 09 66 17

bruno.slama@belvederecom.fr

La mention au regard de certaines illustrations du sigle « D. R. » correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

Les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques : nouveaux savoirs, nouveaux enjeux

Introduction

03

Les ONIEA : un domaine sous-exploré et délicat à exploiter, mais prometteur
Dominique DRON et Ilarion PAVEL

Les ONIEA, un univers subtil et multifacettes

07

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

12

Un panorama des ondes non ionisantes acoustiques (ONIA) et de leurs principaux usages
Paul AVAN

Quels sont les processus biologiques à l'œuvre avec les ONIEA ?

16

Existe-t-il une biologie cellulaire des sons ?
De « l'écoute » des plantes à l'acoustique cellulaire
Olivier GALLET

23

Effets cumulés des ONIE : co-exposition aux ONIE et à une contrainte thermique
Amandine PELLETIER et Jean-Pierre LIBERT

29

Questions ouvertes sur les effets des ondes électromagnétiques et sonores sur la santé et l'environnement
Olivier MERCKEL

Usages émergents des ONIEA en médecine et dans l'industrie

En médecine

33

Des innovations aux transferts cliniques et commerciaux : 100 ans après leur découverte, les ultrasons médicaux vivent leur seconde révolution
David ATTALI, Alexandre DIZEUX et Jean-Francois AUBRY

40

Vie et perspectives, en France, d'une PME de pointe dans le domaine des ultrasons médicaux
David CAUMARTIN

44

Les ondes électromagnétiques en médecine : le cas des ondes millimétriques
Morgane LEBOSQ et Yves LE DRÉAN

Dans l'industrie

48

La sonochimie, un domaine d'innovation sous-exploité ?
Dr Grégory CHATEL

53

Freins et leviers de l'intégration des technologies micro-ondes dans les procédés de synthèse chimique à l'échelle industrielle
Dr. Marilena RADOIU

57

Les applications émergentes des ondes Téràhertz
Ilarion PAVEL

En agroalimentaire

63

Des ondes non ionisantes électromagnétiques (ONIE) à toutes les étapes du processus productif dans le secteur de l'agroalimentaire
Hervé FLOCH, Patrice GAMAND, Clément DAIGNAN, Nicolas PICARD et Laure SANDOVAL

69

La génodique : de l'émergence d'un nouveau champ scientifique à sa validation sur le terrain, puis sur celui académique
Pedro FERRANDIZ

Le cadre public et professionnel, un facteur déterminant

75

Réglementation sanitaire et environnementale des ONIEA
Natalie COMMEAU et Philippe BODÉNEZ

81

Aux États-Unis : existence d'une forte politique scientifique et industrielle « public-privé » en faveur de la recherche sur les ONIEA
Yves FRENOT, Xavier BRESSAUD et Kévin KOK HEANG

86

Recherche polycentrique, PME innovantes et exportations : les clés d'un succès allemand centré sur la photonique
Julien POTIER

Hors dossier

95

Des crédits carbone au service du développement africain
Michel VILLETTE

100 Traductions des résumés

105 Biographies des auteurs

Ce numéro a été coordonné par Dominique DRON et Ilarion PAVEL

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⁽¹⁾.

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 ; 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⁽²⁾.

(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⁽³⁾), 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⁽⁴⁾.

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⁽⁵⁾.

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⁽⁶⁾.

(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

(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", *Scientia 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⁽⁷⁾. Les effets déjà observés des ONIEA sont très contrastés⁽⁸⁾ : 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⁽⁹⁾ 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⁽¹⁰⁾. 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⁽¹¹⁾.

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

quences⁽¹²⁾, 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⁽¹³⁾. 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^e 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 ⁽¹⁴⁾.

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 ⁽¹⁵⁾. 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 ⁽¹⁶⁾. 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.

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.

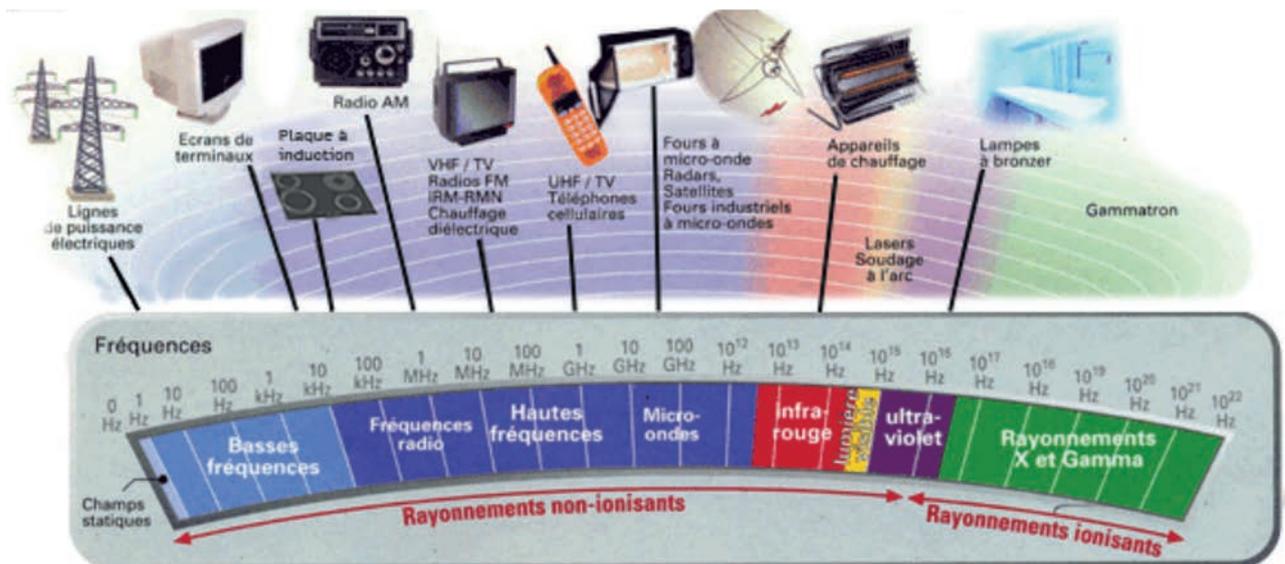


Figure 2 : Spectre des fréquences – Illustration de quelques applications dans chaque gamme de fréquences.

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 thermogenèse, 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>

Un panorama des ondes non ionisantes acoustiques (ONIA) et de leurs principaux usages

Par Paul AVAN

Université Clermont Auvergne, Institut de l'audition

Parmi les agents physiques, les ondes ont la capacité de se propager, véhiculant avec elles de l'information, mais aussi, parfois, un danger lié à leur énergie ou aux transformations qu'elles induisent. Les ondes acoustiques sous-tendent l'audition, un sens privilégié pour la communication intra et inter-espèces, magnifié par l'espèce humaine qui en fait le support de la parole et de la musique. Le pouvoir de nuisance voire de dangerosité des ondes sonores audibles, lorsqu'elles viennent interférer, de manière souvent insidieuse, avec le confort ou la santé des individus exposés, est un des grands problèmes de santé des décennies à venir, comme le met en exergue l'OMS. Mais l'acoustique engendre aussi des progrès pour la santé en permettant, dans des intervalles d'hyperfréquences non utilisés par l'audition, la mise en œuvre de techniques d'imagerie du corps dépourvues de danger et de très haute résolution, et qui sont en outre peu coûteuses et donc accessibles aux pays les plus démunis.

Introduction

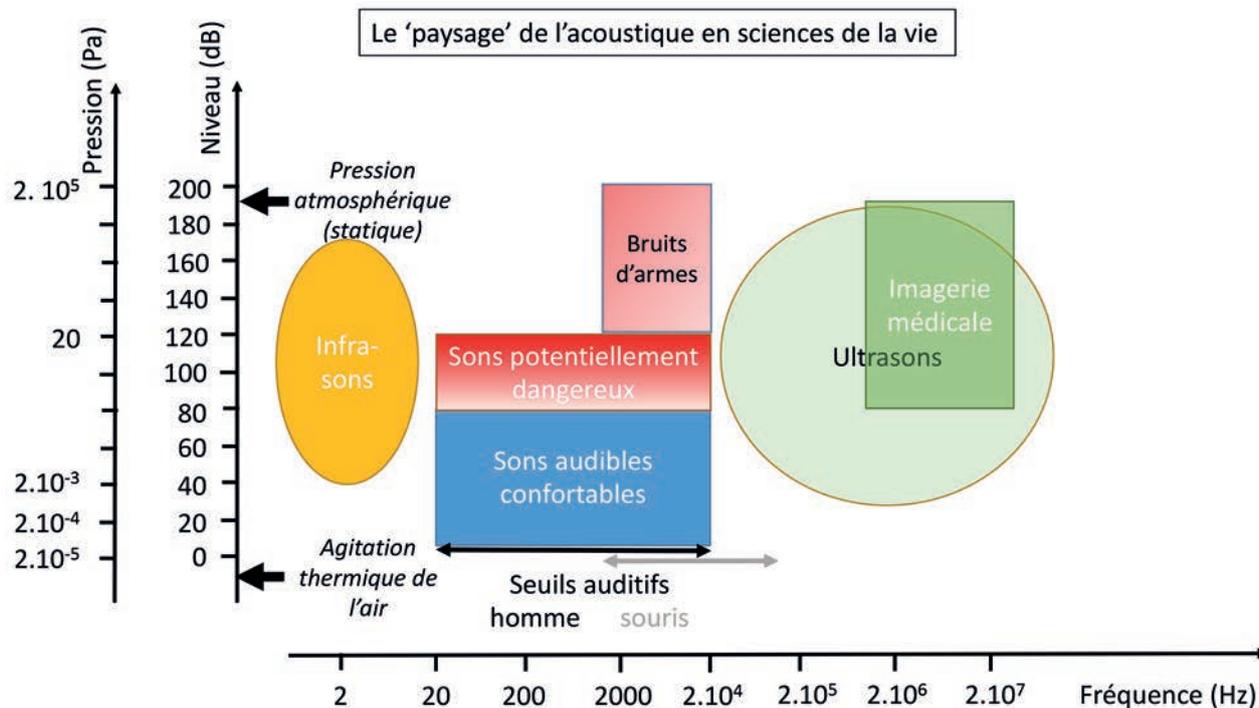
Les ondes acoustiques usuelles présentent deux singularités par rapport à de nombreux agents physiques : une se rapporte au monde physique et l'autre au monde biologique au carrefour desquels elles se situent. Leur domaine physique couvre une étendue énergétique de l'ordre de 200 décibels, soit 10^{20} ou cent milliards de milliards, un intervalle de fréquences ou spectre allant de quelques fractions de hertz à quelques dizaines de millions de hertz (vibrations par seconde) pour les applications les plus courantes (voir la figure de la page suivante). Ces ondes servent de supports physiques à la propagation d'énergie et d'informations. En biologie, les ondes acoustiques ont le statut privilégié de vecteur d'un sens primordial pour la survie des espèces, l'audition, prolongeant sa version primitive qu'est la mécanosensibilité déjà présente chez des formes primitives de vie porteuses de mécanorécepteurs, à savoir des plantes aux polypes coralliens. L'audibilité confère aux ondes acoustiques leur intérêt pour la vie sociale et l'interaction avec l'environnement, mais aussi leur pouvoir de nuisance ou de dangerosité lorsqu'elles viennent interférer avec le confort ou la santé des individus exposés. Un certain nombre de règles encadrant les ondes acoustiques d'un point de vue sanitaire sont fondées sur ce pouvoir d'interférence (voir l'Encadré de la page 14). Comme toute pollution, celle associée aux ondes acoustiques, essentiellement d'origine humaine, affecte un écosystème : l'homme mais aussi des éléments vivants de son environnement.

Audible ou pas, le son provient d'une variation de pression dans un milieu matériel, qui se propage sous forme d'ondes longitudinales à une vitesse fixe c , caractéristique du milieu (340 m/s dans l'air en conditions normales de température et pression). Les ondes sonores suivent les mêmes lois physiques et acoustiques quelle que soit leur fréquence f ou leur longueur d'onde λ ($= c/f$), cette dernière étant la distance entre deux zones de compression consécutives dans le milieu. Les ondes sonores peuvent se propager à distance et en cours de route, être déviées (réfléchies, diffusées ou diffractées) ou atténuées selon des principes ondulatoires généraux dans lesquels λ joue un rôle clé.

Son et imagerie

Dans toutes ces applications, la pénétration non invasive et la directivité sont les performances-clés offertes par les ultrasons.

L'utilisation des sons adéquats pour imager le corps humain de manière à la fois peu coûteuse, légère et non invasive a révolutionné la médecine de la fin du XX^e siècle. Les sons se réfléchissent pour produire des échos chaque fois que la densité (techniquement, l'impédance) du milieu propageur change. Cependant, ils ne se propagent pas en ligne droite en raison du phénomène de diffraction qui leur permet de contourner et, ainsi, d'effacer les obstacles plus petits que leur longueur d'onde (λ). C'est un ultrason de longueur d'onde sub-millimétrique (quelques



Le paysage bidimensionnel (les niveaux et les fréquences) de l'acoustique en sciences de la vie.

mégahertz) qui permet d'imager les tissus mous du corps humain (et parfois, les os et les cartilages) avec une résolution anatomique efficace. La pénétration des ultrasons diminue lorsque la longueur d'onde diminue, mais les systèmes d'imagerie médicale exploitent un compromis. L'imagerie doppler complète l'analyse par celle des changements subtils de fréquence, lorsque les cibles ultrasonores diffusantes se déplacent.

Des diagnostics fonctionnels ou anatomiques en obstétrique, cardiologie et autres disciplines médico-chirurgicales, sont devenus possibles y compris dans des pays pauvres, grâce aux équipements placés entre les mains d'opérateurs formés. Lorsque l'onde ultrasonore focalise une énergie intense, elle peut fragmenter un calcul de l'extérieur sans chirurgie (lithotripsie), vaporiser une lésion également sans effraction (bistouri ultrasonore) ou réchauffer un tissu. D'autres modes de vibrations non sonores déclenchés par une onde de choc sonore créant un cisaillement tissulaire permettent désormais un diagnostic élastométrique précieux en cancérologie. Les normes de sécurité n'entravent pas une utilisation obstétricale efficace chez un fœtus en développement.

Ondes acoustiques et audition

L'audition des mammifères terrestres en fonctionnement normal couvre un spectre allant de quelques hertz à quelques dizaines de milliers de hertz, soit 20 à 20 000 Hz pour l'espèce humaine. Le vocabulaire acoustique est anthropomorphe : c'est en référence à cet intervalle que l'on parle d'ultrasons, au-dessus, et d'infra-sons, au-dessous. La gamme d'intensités audibles est extrêmement large, allant de 20 micropascals, correspondant au seuil de détection moyen, jusqu'à 20 pascals, pour le seuil maximal tolérable sans danger immédiat. Des niveaux d'intensi-

té non immédiatement dangereux peuvent présenter un effet lésant à long terme, effet qui est dose-dépendant : plus concrètement, **l'énergie totale reçue pendant une journée ne devrait pas dépasser les 80 dB(A)** (voir l'Encadré de la page suivante) pendant 8 heures, sous peine, en cas de cumul tout au long de la vie, d'accélérer le vieillissement auditif. Le système auditif est utilisé pour détecter des signaux d'alerte, de faible niveau quand le danger est encore lointain, et pour communiquer avec des partenaires de la même espèce (la parole et la musique chez l'homme ; le brame du cerf, le chant des oiseaux, etc.) ou d'une autre espèce (sifflements et appels des bergers à destination de leurs troupeaux, cris de geais qui alertent les oiseaux alentour de la présence d'un rapace). Le système auditif est certes capable d'extraire par filtrage les messages pertinents dans un paysage sonore complexe (l'effet *cocktail party*), mais une pollution sonore peut rendre cette tâche épuisante et induire un stress, préjudiciable non pas forcément à l'audition, mais à la santé : le bruit a donc des effets nuisibles extra-auditifs.

Des normes protectrices ont été édictées dans des cadres d'exposition professionnelle, mais les dangers des sons forts concernent aussi, au XXI^e siècle, les activités de loisirs, ce qui, selon l'OMS, soulève des questions majeures de prévention et de traitement. Qui plus est, certaines lésions auditives peuvent être diagnostiquées très tard, voire passer inaperçues et n'être découvertes que *post mortem*. Les éléments vulnérables du système auditif sont beaucoup plus nombreux que ce que l'on avait pu identifier il y a quelques décennies, et les mécanismes de vulnérabilité sont non seulement mécaniques ou neurochimiques, mais aussi osmotiques, inflammatoires, métaboliques, etc. Leur identification est possible grâce à de nouvelles méthodes qui permettent de détecter des facteurs d'hypersensibilité (génétiques, notamment) et de dessiner des stratégies de

Les institutions et les procédures qui encadrent l'utilisation des ondes acoustiques d'un point de vue sanitaire

L'encadrement sanitaire des ondes acoustiques s'est d'abord concentré sur la sécurité pour l'audition de personnes exposées au bruit dans le cadre de leur travail, établissant un niveau limite de 80 dB (A) (A est une pondération qui prend en compte les sons en fonction de leur audibilité par l'homme), en cas d'exposition de façon continue sur une durée de 8 h de travail, 5 jours par semaine, 47 semaines par an et pour 40 années d'activité. La règle isoénergie est appliquée, en vertu de laquelle on considère que la dose de bruit admissible correspond à l'énergie totale reçue par jour, sa distribution exacte dans le temps important peu. L'exposition dans le cadre des loisirs présente les mêmes dangers potentiels, mais elle n'est pas véritablement encadrée. La prise en compte d'éléments aggravants possibles comme le contenu en basses fréquences, voire en infrasons inaudibles, en impulsions intenses, ou l'existence de co-expositions ototoxiques reste l'objet de débats.

Le cadre législatif actuel couvre également le champ très riche et complexe des bruits ou des vibrations qui, sans être dangereux pour l'audition, sont de nature à porter atteinte à la qualité de vie ou de sommeil des personnes exposées, nuisant ainsi à leur santé ou à leur droit à vivre dans un environnement confortable. Ce cadre s'applique à des domaines divers : urbanisme, acoustique des bâtiments avec renforcement des normes d'isolation phonique dans les zones affectées par les transports terrestres ou aériens bruyants ou lorsque les populations fréquentant ces bâtiments ont des besoins spécifiques (locaux d'enseignement). Les objets source de bruits, que ce soit des machines, des appareils reproducteurs de musique ou des jouets, ont vu leur commercialisation soumise au respect de niveaux acoustiques limites régis par des directives internationales. Enfin, la diffusion de musique dans les lieux publics voit la réglementation applicable évoluer au regard des niveaux acoustiques, même si les niveaux tolérés dépassent encore allègrement les 100 dB.

diagnostic précoce et de traitement. C'est le rôle dévolu aux instituts monothématiques pluri-équipes, qui regroupent les compétences nécessaires pour permettre des avancées rapides et décisives dans le domaine. En France, l'ouverture en 2020 de l'Institut de l'audition à Paris, un centre rattaché à l'Institut Pasteur et soutenu par la Fondation pour l'audition, participe à relever ce défi. L'OMS anticipe sur ce point que près d'un milliard de personnes seront concernées par un problème d'audition en 2050.

Pourquoi cette complexité du système auditif ? « Les nouvelles découvertes des Anatomistes ont augmenté l'embarras, et nous ont [plongé plus encore] dans le doute, en développant à nos yeux un organe si compliqué qu'il faut employer un temps considérable, les recherches les plus délicates et les plus assidues, pour connaître les détours de cet organe... L'on peut donc assurer que ce sujet servira d'occupation infructueuse aux siècles à venir... », écrivaient les Encyclopédistes à la rubrique « Ouïe ». La détection auditive résout des difficultés physico-biologiques majeures : passage des vibrations du milieu extérieur (aérien pour les animaux terrestres) vers le milieu intérieur tissulaire, décomposition des sons selon leur spectre fréquentiel et leurs caractéristiques temporelles fines, déclenchement de mécanorécepteurs de sensibilité sub-nanométrique au seuil auditif, puis analyse par les centres auditifs d'informations superposées ou juxtaposées issues de sources en compétition : extraction de *percepts* de base, force sonore, hauteur et timbre, mais aussi des données plus subtiles comme la direction d'une source ou sa distance. Le manchot royal repère son conjoint à son cri au milieu d'une colonie de dizaines de milliers d'oiseaux, et le chef conduit son orchestre grâce à son écoute de chacun des instruments. L'amplification sélective en termes de fréquence des sons faibles, ce qui les rend détectables, doit être conciliée avec la capacité à coder des sons dont l'énergie peut s'exprimer en douze ordres de grandeur plus élevés que le seuil de détection, grâce à une compression issue du mécanisme même des protéines mécanoréceptrices. Des processus intracellulaires raffinés assurent la maintenance des structures, leur accord précis pour que celles-ci conservent leurs propriétés de résonance ou l'élimination de sous-produits toxiques issus du fonctionnement du système auditif (en effet, celui-ci ne s'arrête jamais : des neurones de l'audition produisent des centaines de décharges par seconde sans discontinuer pendant toute la vie, un exploit unique).

Par ailleurs, certaines protéines-clés de la mécanotransduction auditive humaine existent chez l'anémone de mer, dont l'embranchement, celui des Cnidaires, remonte au précambrien, il y a 600 millions d'années. Le système auditif comporte ainsi des complexes moléculaires hautement spécialisés, aboutissements de la sélection naturelle recyclés au gré des besoins à mesure de l'évolution, que l'on peut retrouver dévolus à des fonctions très différentes, par exemple au niveau du système visuel ou du cortex. Cette évolution permet aussi une convergence, de sorte que des fonctions similaires puissent être accomplies par des systèmes différents : ainsi, les plantes peuvent être dotées de récepteurs sonores. La bioacoustique des plantes commence d'ailleurs à aborder des sujets nourris par la réflexion sur le rôle possible de la sélection naturelle. Si les plantes ne pu, en co-évoluant avec leurs pollinisateurs, développer des feuilles réfléchissant mieux les sons et devenir ainsi plus attractives pour des écholocalisateurs de plus en plus adaptés, seraient-elles capables de répondre à des sons ou à des vibrations significatifs pour leur croissance, comme le bruit de l'eau qui s'écoule ?

Une réflexion fondée sur l'évolution soulève aussi de graves alarmes. Les conditions de la vie moderne induisent des changements brutaux de l'environnement, avec des niveaux acoustiques et des types de sons qui étaient encore étrangers à l'écosystème humain en 1990 : densité exponentiellement croissante des populations et des industries, essor des expositions sonores polluantes à des fréquences hors de l'intervalle naturel (infrasons) ou aux caractéristiques très artificielles (musique amplifiée surcompressée et suramplifiée en basses fréquences). Pour permettre aux êtres vivants de trouver des parades en adaptant leurs modes de communication acoustique ou leurs mécanismes protecteurs, il faut plusieurs générations... L'augmentation de la pression de la chasse combinée aux effets du réchauffement climatique s'est faite sur un temps suffisamment long, une soixantaine d'années, pour permettre à des sous-populations de cigognes génétiquement non migratrices de commencer à assurer leur prévalence sur leurs cousines migratrices. Dans le cas des ambiances acoustiques, les changements d'environnement ont eu lieu en moins de vingt ans.

Est-ce à dire que l'être humain est condamné à vivre dans un environnement acoustique dégradé et dangereux ? Clairement oui, selon l'OMS, qui nous projette en 2050 avec un milliard d'individus menacés de surdité. Les pathologies de l'audition sont donc une conséquence fatale, dont la prévalence croît avec l'industrialisation. L'immense complexité du système auditif est synonyme de lésions très variées, de « remèdes » (pour le moment, palliatifs) différents selon la lésion, et donc de besoins accrus en matière de dépistage, de diagnostics précis, sachant que des pistes de traitement authentique émergent des approches issues de la physiologie moléculaire.

Est-ce une question secondaire que de vouloir améliorer le sort des sourds, dont le handicap n'affectant « que » la communication était naguère sous-estimé ? Cette vue lénifiante passiste n'est plus crédible : la surdité n'est autre que le premier facteur de risque (modifiable) de démence. La démence représente un coût social et économique terrifiant et en augmentation, la surdité aussi.

Est-ce rassurant de savoir qu'en France, 7 millions de personnes auront tôt ou tard besoin d'un appareillage auditif, alors que pas un appareil de ce type n'est fabriqué en France ? Non, mais il est trop tard pour s'en alarmer. Accepter qu'en France, les chercheurs rassemblés pour constituer l'Institut de l'audition ou des structures simi-

laires devraient compter sur des industriels extra-territoriaux pour produire les traitements et les diagnostics qu'ils ont découverts et brevetés ne serait pas défendable. C'est pourquoi la création de cet Institut a notamment pour objectif d'inverser la désindustrialisation qui mine le domaine biomédical en combinant approches scientifiques, validation clinique, enseignement actualisé et transfert à l'industrie, le tout adossé à l'Institut Pasteur.

Sons et nuisances

L'émission d'ondes acoustiques en tant que sous-produits d'une activité a comme contrepartie la propagation à distance, qui n'est pas forcément facile à contrôler et est source de nuisances, notamment lorsque les ondes empiètent sur le domaine audible de l'homme ou d'un acteur de son écosystème. Il peut en résulter plusieurs mécanismes, le plus évident étant une agression directe de l'organe auditif avec un risque de lésions à court, moyen ou long termes. Dans ces deux derniers cas, l'imputabilité au son pourra être contestée...

Parmi les effets indirects de sons indésirables, le son polluant non lésant induit une gêne. Celle-ci peut avoir des conséquences néfastes pour la santé à long terme, par des actions sur le stress, la fatigabilité, le sommeil, la tension artérielle, etc. L'imputabilité et la quantification de ces conséquences sont délicates, car le bruit et d'autres polluants (chimiques et visuels) souvent se combinent et n'ont qu'un effet global, et ce seulement sur le long terme. Un hypertendu l'est-il par la faute du bruit de son habitat, ou de ses conditions de vie (prises de médicaments, métier pénible et précaire) qui l'empêchent de changer d'habitat ? Serait-il aussi hypertendu en habitant avenue Foch ? Comment le démontrer ? Un autre effet putatif indirect (voire pourquoi pas direct) pourrait résulter des effets auditifs de sons pourtant non audibles par les humains (infrasons, ultrasons), mais capables de perturber le système auditif et celui de l'équilibre. L'évoquer est une chose, le démontrer est autrement plus complexe et fait l'objet d'études scientifiques en cours en France. Enfin, une pollution se définit par une dégradation de l'ensemble d'un environnement, et celle-ci peut n'affecter que certains animaux vivant dans cet environnement. L'être humain peut être épargné, mais pour autant si passereaux et chauve-souris désertent la ville et si les cétacés quittent les abords du littoral où il vit à cause du bruit, sa qualité de vie n'en sera pas moins impactée insidieusement.

Existe-t-il une biologie cellulaire des sons ?

De « l'écoute » des plantes à l'acoustique cellulaire

Par Olivier GALLET

Laboratoire ERRMECe (Équipe de recherche sur les relations matrice extracellulaire-cellules, CY Cergy Paris Université)

Et si les plantes pouvaient non seulement entendre, mais aussi et surtout écouter et différencier des sons pour les utiliser à bon escient dans leurs stratégies de développement et d'adaptation à leur environnement.

Il y a quelques années de cela, un concours de circonstances m'a conduit à développer une recherche collaborative sur ce sujet souffrant indéniablement d'un certain scepticisme ambiant. En décryptant une revue bibliographique récente et pointue et en proposant un protocole rigoureux en triple aveugle et utilisant des concepts simples et éprouvés de biologie, nous avons montré qu'effectivement, des plantes peuvent reconnaître et utiliser des sons de façon très subtile pour moduler leur croissance en réponse à un stress environnemental, en l'occurrence un stress hydrique lié à la sécheresse.

Perception du son et des ondes sonores par les végétaux

Que connaît-on du sujet ?

Dans notre monde moderne, chantre de la communication humaine, la communication entre composantes du vivant reste pourtant capitale pour le vivant lui-même, et notre questionnement aborde la perception des ondes sonores par des organismes, comme les végétaux, ou même par la brique élémentaire du vivant, qu'est la cellule. Nos propres cellules sont-elles douées de capacités de communication sonore ?

Les plantes savent-elles discriminer les ondes sonores ? Sont-elles douées de la capacité d'utiliser les sons pour s'adapter aux contraintes et aux dissymétries de leur environnement ? Ces capacités sont-elles mesurables au niveau cellulaire chez n'importe quel organisme ? Autant de questions très souvent considérées comme « ésotériques », mais qui commencent à trouver des réponses scientifiques de plus en plus probantes et qui, à tout le moins, suscitent l'engouement de plus en plus de chercheurs.

Ainsi, une simple requête « plant and sound » sur le moteur de recherche Pubmed de la United States National

Library of Medicine ⁽¹⁾ renvoie à pas moins de 2 837 publications scientifiques répertoriées entre 1923 et 2021, dont 72 % sur la dernière décennie. Étonnamment, en réponse à une requête aussi simple, les quatre cinquièmes des publications citées ne sont en aucun cas rattachables au sujet qui nous importe. On y trouve pêle-mêle des articles certes sur le son, mais aussi sur la planification, sur l'extraction de principes actifs chez les végétaux, sur le bruit industriel, ou s'intéressant à certaines pathologies... Mais, au final, extrêmement peu d'articles traitent réellement du son en tant que facteur environnemental pouvant moduler le développement des végétaux.

Une requête similaire « sound and cell » montre la même tendance, avec plus de 700 publications par an depuis dix ans. Mais, là aussi, on atteint rapidement les limites de l'intelligence artificielle en termes de recherche bibliographique, car la majorité des publications citées ne traitent pas vraiment du sujet ou de façon très éloignée. Si l'on formule la même requête « plant and sound » via le moteur de recherche scientifique Webofknowledge de Clarivate

(1) <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=plant%20and%20sound&timeline=expand>

analytics⁽²⁾, les données restituées sont moins nombreuses mais plus précises. Ainsi, pour la période 1984-2021, 94 publications sont citées, dont une grande majorité de celles-ci traitent bien du sujet, avec une augmentation significative du taux de citations entre 2010 (10 citations d'articles par an) et 2020 (165 citations d'articles par an).

De la perception des signaux à la naissance d'une intelligence végétale moteur d'une évolution solidaire

La relation académique et pratique aux plantes n'a pas jusqu'à récemment incité la communauté scientifique à se pencher sur ce que pourraient être les mécanismes de perception des ondes sonores chez les végétaux, voire dans une communication végétale. De nombreux pionniers en la matière ont soulevé ces dernières années la question d'une intelligence végétale, voire d'un *greenpower*. Ainsi, dès 2003, Antony Trewavas propose une redéfinition de l'intelligence en considérant que l'expression « intelligence des plantes » se réfère à la complexité de la réception et de la « transduction des signaux » chez les végétaux. Cette intelligence du « signal » permettrait aux végétaux de se positionner et de construire leurs propres images de leur environnement à chaque instant de leur vie. Aujourd'hui, il a été largement démontré, par exemple, que les plantes transforment constamment leur environnement, grâce à tout un ensemble de signaux et d'échanges chimiques opérés *via* la rhizosphère avec les micro-organismes du sol, mais aussi avec d'autres espèces végétales qu'elles sont capables de stimuler ou d'inhiber pour leur propre compte. Ces interactions biologiques relèvent de l'allélopathie qu'Elroy Leon Rice a définie, en 1984, comme tout effet positif ou négatif direct ou indirect d'une plante sur une autre plante ou sur des micro-organismes par la libération de molécules biochimiques (souvent décrites comme étant des phytoalexines) dans l'environnement naturel. De même, il a été montré (Abbadie, 2018) que des arbres y compris d'espèces différentes, situés l'un à l'ombre et l'autre à la lumière, échangent *via* cette même rhizosphère et en mobilisant le microbiote du sol (Selosse, 2018) les molécules qui manquent à chacun d'eux.

L'intelligence des végétaux résulte donc de leur fabuleuse adaptation aux contraintes de leur milieu. Ne pouvant se soustraire comme les animaux aux perturbations de leur environnement en se déplaçant, elles ont élaboré des stratégies complexes de reconnaissance des signaux traduisant les variations incessantes des paramètres biotiques et abiotiques. Par ce lien constant et étroit avec leur milieu, elles peuvent anticiper des réponses physiologiques adaptées. On pourrait résumer en ironisant : « avons-nous déjà vu un pommier prendre ses racines à son cou pour aller se mettre à l'ombre quand il fait trop chaud ou se cacher quand un prédateur approche ? » Non, bien au contraire : l'arbre va « coder » son environnement à sa façon, selon les paramètres qui lui importent, et intégrer d'éventuelles modifications pouvant potentiellement le mettre en danger. La sélection naturelle a pris le temps de privilégier les capacités génétiques nécessaires à cette adaptation.

Une des plus grandes preuves de l'intelligence végétale réside donc dans la capacité de la plante à se fondre dans son milieu et d'en tirer le maximum d'avantages au moindre coût, selon l'adage d'Isaac Newton : « La nature ne fait rien en vain ; et le plus est vain si le moins suffit ; car la nature aime la simplicité et ne s'embarrasse pas de causes superflues ».

C'est pourquoi, pour assurer ses flux hydriques et nutritifs, quoi de mieux pour la plante que d'utiliser cette énergie abondante et bon marché qu'est l'énergie solaire : par exemple, en adaptant son métabolisme hydrique à un changement d'état de l'eau (lien entre la quantité de liquide dans le sol et les tissus de la plante, jusqu'au stockage de la vapeur dans la chambre sous stomatique des feuilles).

Force est de constater, comme le fait le botaniste et ancien président de la Société européenne d'écologie, Jean-Marie Pelt, que les plantes ont une vie sociale mêlant compétition mais aussi complémentarité, jusque dans leurs stratégies d'évolution. Un point sur lequel Pelt (1984) se rapproche de la thèse de Piotr Kropotkine, géographe naturaliste et anarchiste russe de la fin du XIX^e siècle, dans laquelle il associe au transformisme lamarkien et à l'évolutionnisme darwinien les notions d'entraide et de solidarité qui caractérisent les stratégies d'adaptation et de colonisation de nouveaux territoires par les organismes vivants. C'est la stratégie ainsi développée par nos propres cellules, qui se sont constituées au fil de millions d'années par l'apport extérieur de gènes, de molécules, voire de micro-organismes tout entiers, comme nos mitochondries, les centrales énergétiques de toute vie cellulaire sur Terre ou les chloroplastes chez les végétaux véritables usines photovoltaïques de bio productions photosynthétiques.

De la reconnaissance, activement exploitée, de l'existence d'un signal à l'hypothèse d'une neurobiologie végétale

Dans le continuum statique sol-plante-atmosphère (CSPA), le végétal tire profit de la situation tout en constituant un des maillons indispensables à la régulation hydrique atmosphérique et à une certaine homéostasie terrestre de l'équilibre entre l'oxygène (O₂) et le dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique.

Les travaux du botaniste Stefano Mancuso illustrent cette capacité d'adaptation et de plasticité des végétaux en expliquant comment l'analyse des variations des paramètres environnementaux permet à ces derniers de communiquer, de s'organiser et de s'adapter pour à la fois mieux « coller » à leur milieu et prédire les évolutions potentielles de celui-ci (Baluska et Mancuso, 2020).

Pour Stéphane Mancuso et d'autres neurobiologistes, comme Marc Williams Debono, cette intelligence végétale, fondée sur la reconnaissance, la transmission, l'interprétation de signaux et l'apport d'une réponse adaptée, doit se traduire nécessairement par une sorte de « neurobiologie végétale » (Baluska et Mancuso, 2009), qui interroge sur la continuité ou la discontinuité entre les formes animales et humaines d'intelligence et celle instituée par le monde végétal.

(2) <https://apps.webofknowledge.com/>

Mais peut-on réellement parler d'une intelligence s'apparentant à celle de l'Homme ? Les modes de communication ou de résolution des problèmes chez les végétaux doivent-ils être calqués sur notre propre système de communication et d'analyse ? Selon Francis Hallé (2018), « dire que les plantes sont intelligentes, c'est peut-être les sous-estimer... » ; et la révolution végétale ne suit peut-être pas la logique humaine.

Ainsi, si nous, humains, concevons une corrélation étroite entre la communication et le développement des formes d'intelligence, cette communication se réfère à notre façon de l'aborder, donc en considérant, entre autres, la communication sonore. Finalement, quand on envisage l'intelligence végétale, on aborde anthropologiquement la communication sonore, et donc les sons et les ondes sonores avec cette perspective.

La perception des sons par les plantes

Une grande question demeure, celle de savoir si les plantes peuvent percevoir les sons, et surtout, quels types d'ondes sonores sont-elles capables d'assimiler et dans quels buts ? Pour y répondre, une revue récente réalisée par Khait *et al.* (2019) a synthétisé les travaux sur l'impact des signaux sonores sur les végétaux *via* la modulation de l'expression de leurs gènes, de la résistance acquise par les plantes à des pathogènes ou encore de modifications morphologiques et d'adaptations des plantes en réaction à ces signaux dans une approche de « phytoacoustique ». La démarche scientifique adoptant cette approche est assez récente et coïncide avec des travaux phares en ce domaine (Gagliano *et al.*, 2012 ; Mishra *et al.*, 2016 ; Fernandez-Jaramillo *et al.*, 2018 ; Frongia *et al.*, 2020) et, bien sûr, des controverses (Markel, 2020).

Deux aspects sont à considérer quand on analyse les travaux consacrés à l'impact des ondes sonores sur le développement des organismes vivants, dont les végétaux : il s'agit, d'une part, de leur sensibilité à des fréquences particulières (Ozkurt *et al.*, 2016) et, d'autre part, et de façon plus directe, de leur sensibilité à des séquences musicales (Creath et Gary, 2004 ; Chivukula et Shivaraman, 2014), voire, plus récemment, en combinant les deux en associant des bruits naturels et des séquences musicales d'origine humaine (Wassermann *et al.*, 2021). Quoi qu'il en soit, la perception des sons par les organismes vivants est le plus souvent abordée par le biais d'une approche dite de mécano-perception (Telewski, 2015), qui reprend classiquement la trilogie « capture de l'information », « transduction du signal » et « étude de la réponse physiologique adaptée ».

Perception des ondes sonores par les végétaux : l'approche expérimentale *via* les « protéodies »

L'origine de la collaboration scientifique

C'est dans ce contexte scientifique de « phytoacoustique », que nous avons mis en place depuis 2013 au laboratoire ERRMECe (Équipe de recherche sur les relations matrice extracellulaire-cellules, CY Cergy Paris Université), en collaboration avec la société Genodics, une étude originale

sur la perception des ondes sonores par des végétaux soumis à des diffusions sonores de séquences harmoniques dénommées « protéodies ». Ces protéodies sont générées en partenariat avec la société Genodics qui exploite un brevet (Sternheimer, 1992) sur la « génodique » pour des applications dans la protection des végétaux. Joël Sternheimer, inventeur du concept de « génodique », propose de générer des séquences harmoniques à partir du décodage des ondes émises par les acides aminés quand ils s'intègrent dans la chaîne polypeptidique naissante d'une protéine, à l'étape dite de traduction à partir de l'ARN messager. D'où le nom de « protéodies » donné à ces séquences.

Lors de nos premières rencontres avec l'équipe de Genodics, je dois reconnaître que j'ai été assez surpris lorsque j'ai pris connaissance de ce procédé et je restais un peu sceptique sur la possibilité de conceptualiser un protocole expérimental sur ce genre de thématique. Il est vrai qu'en 2013, amener un laboratoire académique à s'engager sur ce genre de sujet relevait de la gageure, d'autant plus que ce laboratoire, que j'ai dirigé de 2013 à 2020, est à dominante biochimie, biologie cellulaire et moléculaire. Il est spécialisé dans l'étude des inter-relations entre les cellules et leurs matrices extracellulaires (ou microenvironnement cellulaire) dans des domaines comme les biomatériaux, l'ingénierie tissulaire osseuse, les matrices biomimétiques, la cancérologie, le vieillissement ou la formation des biofilms bactériens. En revanche, une thématique de recherche du laboratoire portait sur l'identification de protéines mimétiques de protéines du sang humain présentes chez des petits pois soumis à des stress hydriques ; un axe de recherche qui pouvait facilement devenir le support d'une investigation scientifique préliminaire compatible avec les ambitions de la société Genodics en matière de protection des cultures.

Face aux doutes exprimés par nombre de mes collègues, j'ai malgré tout pris la décision d'investiguer cette piste. La curiosité scientifique et le libre arbitre devraient imposer aux chercheurs de faire fi des idées courantes et de s'engager pour rechercher toutes formes de réalités, aussi étranges qu'elles nous paraissent. La science progresse en posant des hypothèses qui sont ensuite testées. C'est dans cette optique que nous avons proposé à Genodics d'engager une série de travaux et de les publier – quel qu'en soit le résultat – en toute transparence, chose que nos partenaires de Génodics ont totalement accepté.

Le principe des protéodies et le contexte de l'étude

La théorie de la génodique s'appuie sur les résultats des expérimentations répétées depuis des années par la société Genodics sur des plantes cultivées (voir l'article de Pedro Ferrandiz publié dans cette revue). Elle propose comme hypothèse explicative une régulation épigénétique de la synthèse des protéines, en prenant en considération le fait que lors de la traduction de l'ARN messager en protéines, les vingt-deux acides aminés constitutifs des protéines sont ajoutés les uns après les autres, en fonction du code génétique, au polypeptide naissant, et émettent alors des ondes de fréquences caractéristiques de chaque

acide aminé. Selon l'équipe de Genodics, la succession de ces fréquences peut être converties, selon une méthode qui leur est propre, en ondes acoustiques audibles ; les séquences musicales ainsi obtenues pourraient moduler en temps réel la vitesse de synthèse protéique *via* une forme de résonance entre les fréquences successives. Ces séquences harmoniques peuvent être diffusées dans le sens de la synthèse des protéines (pour un effet de stimulation) ou en sens inverse (pour un effet d'inhibition), ou de façon aléatoire pour générer un contrôle expérimental.

Le principe des protéodies et l'hypothèse sous-jacente sont plus largement décrits sur le site de l'entreprise Genodics⁽³⁾.

Au sein de notre laboratoire, nous avons donc l'opportunité de travailler sur un modèle végétal développé dans le cadre d'un programme de recherche financé par l'ANR, ANR Blanc 1530-02 GreenFibronectin (2011-2015), visant à caractériser un homologue des protéines du plasma sanguin humain dans le pois (*Pisum sativum*) en réponse à la sécheresse ; une étude menée à la suite des travaux préliminaires que nous avons publiés (Pellenc *et al.*, 2004 ; Cossard *et al.*, 2005).

Puisque nos pois étaient placés dans des conditions de stress hydrique pour les besoins du projet GreenFibronectin, nous avons logiquement fait le choix de retenir le stress hydrique comme paramètre environnemental, et de diffuser des séquences harmoniques protéo-mimétiques, dénommées « protéodies », produites par notre partenaire Génodics, pour vérifier si une adaptation des pois était possible à la suite de cette diffusion « musicale » et pouvoir comparer nos résultats avec ceux obtenus sur l'induction par des fréquences sonores de la résistance à la sécheresse chez l'arabette (Lopez-Ribera et Vicient, 2017).

L'idée sous-jacente était de valider ou d'infirmer l'hypothèse de départ proposée par Genodics, c'est-à-dire la « régulation épigénétique de la biosynthèse des protéines par résonance d'échelle à partir de la séquence en acides aminés de la protéine traduite en protéodie ». En 2016, sans financement spécifique, nous nous sommes engagés dans un protocole simplifié pour travailler sur l'apport de la preuve du concept. Les résultats ont été publiés dans une revue à comité de lecture en septembre 2020 (Prévost *et al.*, 2020).

Le mode opératoire de la démarche scientifique

Nous avons ciblé une famille-clé de protéines végétales impliquées dans l'adaptation au stress hydrique : les déhydrines (DHN). Les DHN sont aujourd'hui clairement reconnues comme des protéines de stress hydrique et salin permettant aux végétaux de résister entre autres aux dérégulations climatiques engendrant des périodes de sécheresse. Bien entendu, investiguer cette cible protéique n'affectait pas notre programme principal (ANR GreenFibronectin), ce qui nous a permis de mener ces deux projets en parallèle.

La démarche a consisté à soumettre des plantules de pois (*Pisum sativum*) placées en situation de stress hydrique à des séquences acoustiques « protéo-mimétiques », dont les fréquences étaient associées à la séquence en acides aminés de la déhydrine (DHN), dans le sens, d'une part, d'une stimulation (en résonance harmonique) et, d'autre part, d'une inhibition (en dissonance harmonique) :

- Séquence des 25 premiers acides aminés de la DHN : MAEENQNKYEETTSATNSETTEIKDR
- Notes associées (généodique) : A3 C3 A3 A3 G3 A3 G3 A3 C4 A3 A3 F3 F3 E3 C3 F3 G3 E3 A3 F3 A3 G3 A3 G3 C4
- Séquence par hypothèse stimulatrice : A3 C3 A3 A3 G 3 A3 G3 A3 C4 A3 A3 F3 F3 E3 C3 F3 G3 E3 A3 F3 A3 G3 A3 G3 C4
- Séquence par hypothèse inhibitrice : F3 D4 F3 F3 G3 F3 G3 F3 D3 F3 F3 A3 A3 B3b D4 A3 G3 B3b F3 A3 F3 G3 F3 G3 D3

Pour mesurer l'impact des séquences acoustiques nous avons choisis de faire des mesures simples d'adaptation de nos germinations à la sécheresse *via* la mesure du poids frais.

Enfin, nous avons extrait les protéines et caractérisé, par la technique du *western blot* et *via* des mesures ELISA, la présence des DHN en utilisant un anticorps polyclonal anti-DHN.

Pour limiter les biais expérimentaux, nous avons mis en place un protocole de travail en triple aveugle : les personnes en charge de faire les mesures et les extractions

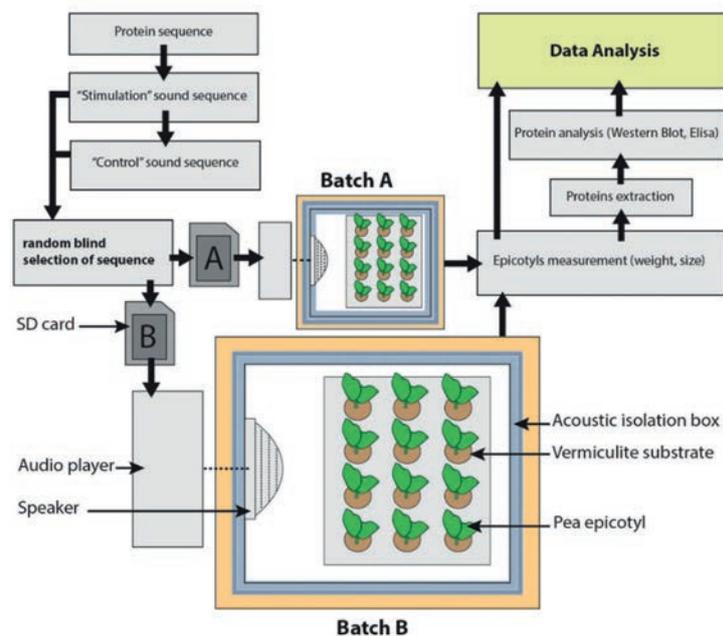


Figure 1 : Schéma du protocole expérimental mis en place (tiré de la publication Prévost *et al.*, 2020).

Les lots de pois sont mis à germer durant 8 à 10 jours dans des barquettes avec comme substrat de la vermiculite hydratée. Puis les cultures ne sont plus arrosées au cours des 8 à 10 jours suivant, ce qui entraîne un stress hydrique. Les barquettes de 30 graines sont placées chacune dans deux caissons acoustiques isolés, les germinations reçoivent une diffusion de 5 min de séquence harmonique la nuit, vers 4 h du matin.

(3) <https://www.genodics.com/genodique.php>

de protéines sont localisées au laboratoire ERRMECe et récupèrent les barquettes de pois dans les caissons, sans connaître la nature de la séquence diffusée. Dans les diffuseurs des caissons, le personnel de Genodics a placé des cartes son (SD card dans la Figure 1), avec des séquences stimulatrices ou inhibitrices, sans autre indication que A ou B. Pour chaque cas A ou B, les résultats des mesures sont envoyés à un troisième partenaire (à l'époque, un ingénieur en CDD recruté dans le cadre d'un autre programme ANR en collaboration avec un laboratoire alsacien, à Mulhouse), qui analyse statistiquement les résultats obtenus sans connaître l'origine de la série des données.

Pour avoir une traçabilité finale, il faut que les trois groupes d'opérateurs se réunissent et indiquent chacun l'élément qu'ils détiennent pour identifier l'origine des barquettes de semis : le caisson (A ou B) dans lequel elles étaient placées, et la carte son (A ou B) s'y trouvant.

Les principaux résultats obtenus : vers un « protéo-mimétisme » ?

Analyse statistique de la distribution du poids frais en fonction des protéodies diffusées

L'analyse statistique des mesures du poids frais de chaque germination de pois est mentionnée dans la publication citée en référence (Prévost *et al.*, 2020) et montre clairement une différence de poids en fonction de la modulation par les protéodies stimulatrices ou inhibitrices de la synthèse des déhydrines. Il en ressort que l'augmentation de poids frais observée pour les lots qui ont été soumis à une diffusion de protéodies stimulant la vitesse de synthèse des DHN traduit une meilleure adaptation au stress hydrique et à la sécheresse des semis de la barquette placée dans le

caisson acoustique où a été diffusée la séquence harmonique de stimulation.

Qui plus est, d'autres valeurs ont été ajoutées à celles publiées et confirment ce phénomène (voir la Figure 2 ci-après) : l'exposition aux deux séquences acoustiques « stimulation » *versus* « inhibition » induit une différence dans la fréquence de distribution du poids frais des plantules de *P. sativum*. Le poids moyen est significativement supérieur pour les lots « stimulés » (0,62 g \pm 0,01 g, n=656) par rapport aux lots « inhibés » (0,48 g \pm 0,01 g, n=674).

Caractérisation de la nature des protéines stimulées ou inhibées

Les mesures de poids frais ne sont qu'une preuve indirecte de l'adaptation des jeunes plantules au stress hydrique en fonction des protéodies diffusées dans les caissons acoustiques. Pour être sûrs que cette adaptation résulte bien d'une augmentation ou d'une inhibition du taux de synthèse des protéines ciblées *via* les séquences harmoniques, nous avons procédé à des analyses biochimiques conventionnelles par des tests immunologiques (avec un sérum polyclonal dirigé contre les DHN de pois). Le détail des résultats et une analyse plus fine sont décrits dans la publication d'origine. La synthèse des résultats montre que davantage de protéines de la famille des déhydrines impliquées dans l'adaptation à la sécheresse ont été synthétisées par la plante sous influence de la protéodie par hypothèse stimulatrice (voir la Figure 3 de la page suivante). On observe un taux basal de déhydrine de 15 kDa avec une intensité identique dans les deux lots et, en revanche, est mise en évidence une accentuation des taux des autres déhydrines (27-30 et 37k Da), en fonction des séquences acoustiques qui leur correspondent.

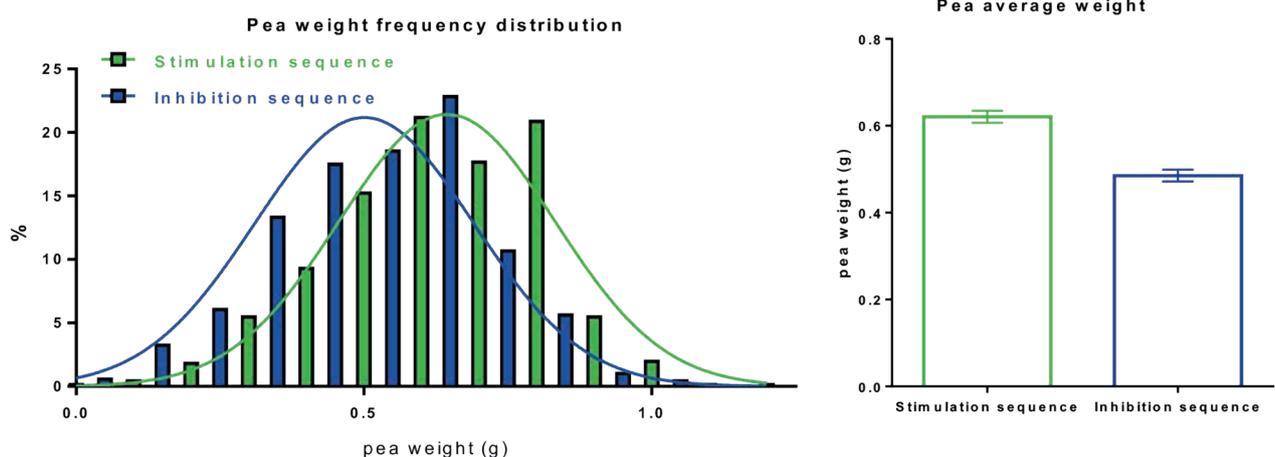


Figure 2 : Mesure du poids des jeunes germinations de pois et fréquence de distribution (résultats complémentaires à ceux de la publication Prévost *et al.*, 2020).

Les jeunes germinations de pois ont été pesées pour chaque condition expérimentale à raison de 656 germinations pour les lots ayant poussé en présence d'une diffusion acoustique de type stimulation, et de 674 germinations pour les lots ayant poussé en présence d'une diffusion acoustique de type inhibition.

Les courbes de fréquences de distribution pour les deux conditions sont présentées à gauche de la figure. Les histogrammes situés à droite sur la figure (affectés des barres d'erreur standard de la moyenne) présentent la moyenne des poids des jeunes germinations pour chaque condition.

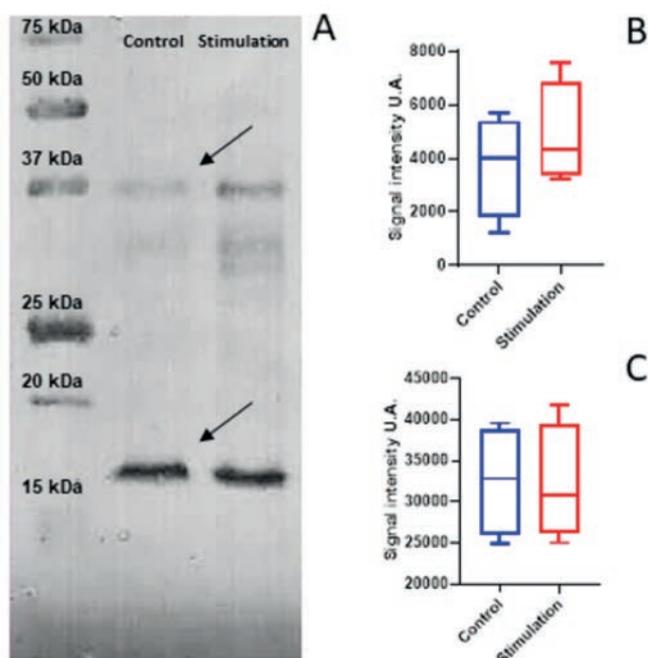


Figure 3 : Impact des « protéodies » stimulatrices sur la synthèse des déhydrines (tiré de la publication Prévost *et al.* ; Helyion 2020).

Des germinations de petits pois ont été mises en culture dans des conditions de stress hydrique avec (stimulation) ou sans (control) diffusion de séquences acoustiques. Les épicotyles ont été broyés pour en extraire les protéines. Un protocole de purification d'une fraction protéique enrichie en déhydrines (DHN) a été mis au point et les protéines ont été séparées par électrophorèse SDS-PAGE avant d'être sondées par une approche immunologique de type western blot basée sur la visualisation des protéines d'intérêt par un anticorps générique dirigé contre plusieurs familles de déhydrines. La révélation des bandes protéiques reconnues par l'anticorps est mise en évidence par les flèches sur la photographie restituant le résultat d'un test western blot. À droite, sont représentés les résultats d'analyse densitométrique de 4 western blots différents pour les bandes 37 kDa et 15 kDa ; une représentation dite de boîte en moustache qui met clairement en évidence le fait que, pour les 4 western blots différents considérés, la bande correspondant à 37 kDa est plus importante en intensité pour les lots stimulés.

Perspectives et nouvelles pistes – Retour vers la prise en compte de l'acoustique par les cellules

Sur la base de ces résultats, nous nous sommes rapprochés d'autres laboratoires et partenaires privés pour poursuivre nos travaux avec pour hypothèse une nouvelle stratégie possible de régulation de la synthèse protéique et mesurer en temps réel la réponse du vivant.

L'objectif affiché est de vérifier plus en profondeur et en détail l'hypothèse d'un changement de paradigme au regard des aspects ondulatoires et de la dimension acoustique de la régulation des processus du vivant ; une étude adossée à une méthodologie pionnière de mesure calibrée par des tests biologiques pertinents. Une partie de ces travaux sont déjà engagés avec nos partenaires au travers de deux programmes actuellement conduits sous la direction d'un jeune chercheur du laboratoire. Ainsi, malgré un fort scepticisme culturel et institutionnel, les chercheurs se mobilisent pour poursuivre ce type de recherches aux frontières du vivant en mobilisant d'autres sources de finance-

ment pour répondre à cette question : le vivant à l'échelle de la cellule capte-t-il les sons, comment peut-il les interpréter et émet-il en réponse des signaux vibratoires qui pourraient en temps réel renseigner sur son état physiologique et comportemental ?

Nos premiers résultats publiés sont encourageants et permettent d'envisager plus sereinement nos nouvelles pistes d'investigation à l'échelle de la cellule. Nul doute que de nouvelles voies inédites de recherches se profilent s'accompagnant de l'assurance de l'émergence d'innovations technologiques.

Bibliographie

- ABBADIE L. (2018), « Fertilité des sols : la qualité par la vie », *Responsabilité & Environnement* n°91, dossier « Sols en danger », juillet, pp. 10-12.
- BALUŠKA F. & MANCUSO S. (2009), "Plant neurobiology: from sensory biology, via plant communication, to social plant behaviour", *Cogn Process.*, Suppl. 1:S3-7, Feb 10, doi: 10.1007/s10339-008-0239-6.
- BALUŠKA F. & MANCUSO S. (2020), "Plants, climate and humans: Plant intelligence changes everything", *EMBO Rep.* Mar 4 21(3):e50109, doi: 10.15252/embr.202050109.
- CHIVUKULA V. & SHIVARAMAN R. (2014), "Effect of Different Types of Music on Rosa Chinensis Plants", *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 5, n°5, pp. 431-434.
- COSSARD E., GALLET O. & DI MARTINO P. (2005), "Comparative adherence to human A549 cells, plant fibronectin-like protein, and polystyrene surfaces of four Pseudomonas fluorescens strains from different ecological origin", *Can J Microbiol.*, Sep;51(9), pp. 811-815, doi: 10.1139/w05-065.
- DUSZA Y., BAROT S., KRAEPIEL Y., LATA J. C., ABBADIE L. & RAYNAUD X. (2017), "Multifunctionality is affected by interactions between green roof plant species, substrate depth, and substrate type", *Ecol Evol.* 7(7), pp. 2357-2369, doi: 10.1002/ece3.2691.
- FERNANDEZ-JARAMILLO A. A., DUARTE-GALVAN C., GARCIA-MIER L., JIMENEZ-GARCIA S. N. & CONTRERAS-MEDINA L. M. (2018), "Effects of acoustic waves on plants: An agricultural, ecological, molecular and biochemical perspective", *Scientia Horticulturae* 2018;235, pp. 340-348, doi: 10.1016/j.scienta.2018.02.060.
- FRONGIA F., FORTI L. & ARRU L. (2020), "Sound perception and its effects in plants and algae", *Plant Signal Behav.* Dec 1;15(12):1828674, doi: 10.1080/15592324.2020.1828674.
- GAGLIANO M., MANCUSO S., ROBERT D. & TOWARD S. (2012), "Understanding plant bioacoustics", *Trends in Plant Science* 17(6), pp. 323-325, doi: 10.1016/j.tplants.2012.03.002.
- HALE F. (2018), « La révolution végétale : de la neurobiologie des plantes à la sylvothérapie », *Pour la Science* n°101, Hors-série.
- KATHERINE C. & SCHWARTZ G. E. (2004), "Measuring Effects of Music, Noise, and Healing Energy Using a Seed Germination Bioassay", *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, vol. 10, n°1, pp. 113-122.
- KHAI T. I., OBOLSKY U., YOVEL Y. & HADANY L. (2019), "Sound perception in plants", *Semin Cell Dev Biol*, doi: 10.1016/j.semcdb.2019.03.006.
- LÓPEZ-RIBERA I. & VICIENT C. M. (2017), "Drought tolerance induced by sound in Arabidopsis plants", *Plant Signal Behav.* 12(10), doi: 10.1080/15592324.2017.1368938.

- MARKEL K. EI. (2020), "Lack of evidence for associative learning in pea plants", Jun 23;9:e57614, doi: 10.7554/eLife.57614.
- MISHRA R. C., GHOSH R. & BAE H. (2016), "Plant acoustics: in the search of a sound mechanism for sound signaling in plants", *Journal of Experimental Botany* 67(15), pp. 4483-4494, doi: 10.1093/jxb/erw235.
- OZKURT H. & OZLEM A. (2016), "The Effect of Sound Waves at Different Frequencies upon the Plant Element Nutritional Uptake of Snake Plant (*Sansevieria Trifasciata*) Plants", *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, n°48.
- PELLENC D., SCHMITT E. & GALLET O. (2004), "Purification of a plant cell wall fibronectin-like adhesion protein involved in plant response to salt stress", *Protein Expr Purif.* Apr;34(2), pp. 208-214, doi: 10.1016/j.pep.2003.11.011.
- PELT J.-M. (1984), « La vie sociale des plantes », Éditions Fayart.
- PRÉVOST V., DAVID K., FERRANDIZ P., GALLET O. & HINDIÉ M. (2020), "Diffusions of sound frequencies designed to target dehydrins induce hydric stress tolerance in *Pisum sativum* seedlings", *Heliyon.*, Sep 23;6(9):e04991, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04991.
- RICE E. R. (1984), "Allelopathy", Academic Press, 2^{ème} édition.
- SELOSSE M. A. (2018), « Jamais seul : ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations », *Médecine/Sciences* 34 (6-7), pp. 604-607, doi : ff10.1051/medsci/20183406023.
- STERNHEIMER J. (1992), "Process for epigenetic regulation of protein biosynthesis by scale resonance", patent n°FR 92 06765, publication number: 2691796.
- TELEWSKI W. F. (2015), "A Unified Hypothesis of Mechanoperception in Plant", *American Journal of Botany: Botanical Society of America Inc*, pp. 340-348.
- TREWAVAS A. (2003), "Aspect of plant intelligence", *Ann Bot.* 92(1), pp. 1-20, doi: 10.1093/aob/mcg101.
- WASSERMANN B., KORSTEN L. & BERG G. (2021), "Plant Health and Sound Vibration: Analyzing Implications of the Microbiome in Grape Wine Leaves", *Pathogens* Jan 12;10(1):63, doi: 10.3390/pathogens10010063.

Effets cumulés des ONIE : co-exposition aux ONIE et à une contrainte thermique

Par Amandine PELLETIER et Jean-Pierre LIBERT
Laboratoire PERITOX, Unité mixte INERIS, Amiens

Souvent, seuls sont étudiés les éventuels effets directs des ONIE sur les organismes vivants. Ce n'est qu'en disposant de matériels innovants que notre équipe a pu examiner les effets d'une exposition aux ONIE sur la capacité d'un organisme à répondre à la variation d'un autre paramètre environnemental. Ainsi, les effets d'une co-exposition associant ONIE et contrainte thermique ont été analysés sur des fonctions impliquées dans le maintien de l'homéostasie énergétique. Les résultats obtenus montrent qu'en présence d'ONIE, les animaux répondent en « luttant contre le froid » alors que ce type de réaction ne devrait être observé que pour des températures ambiantes plus basses. De plus, les animaux adoptent une stratégie d'évitement les conduisant à rechercher un environnement plus chaud. Cela signifie qu'un signal périphérique « froid » pourrait provoquer ces réponses paradoxales qui auraient pour origine les récepteurs TRPM8, les principaux thermorécepteurs au froid qui modifieraient leur conformation sous l'action des ONIE et émettraient un signal vers le système nerveux central qui contrôle ces fonctions.

De nombreux travaux scientifiques analysent les effets potentiels des ondes non ionisantes électromagnétiques (ONIE) à des niveaux d'intensité relativement élevés. Or, ces niveaux provoquent un impact thermique dont les effets sont difficilement dissociables de ceux dus à la seule exposition aux ondes. En raison notamment du manque de connaissances sur les mécanismes d'action des ONIE, l'existence de seuils minimaux déclenchant une réponse physiologique par effet non thermique reste une question ouverte. Des effets non détectés pourraient ainsi être observés si ces ondes sont associées à une nuisance environnementale à laquelle l'organisme aurait déjà été exposé et sensibilisé. Cette hypothèse émise par Genuis et Lipp (2012) est fondée sur le syndrome d'intolérance aux toxiques (Miller, 1997) – plus connu sous son acronyme anglais, TILT (Toxicant-induced Loss of Tolerance) –, caractérisé par l'apparition de symptômes touchant différents organes chez des personnes exposées à plusieurs toxiques (pesticides, polluants atmosphériques, médicaments, solvants...) à des concentrations inférieures à celles connues pour induire des effets. Suivant cette théorie, l'organisme pourrait devenir hypersensible aux ONIE lorsque le seuil de bioaccumulation chimique est atteint, induisant une perte de la capacité de l'organisme à s'adapter à d'autres contraintes. Ainsi, une sensibilisation, sans relation directe ni spécifique avec les ONIE, serait alors provoquée même à des intensités

de stimulation relativement faibles n'induisant pas d'effets détectables. Dans ce cas, les effets des ONIE ne pourraient se révéler que par la mise en œuvre de moyens et de protocoles expérimentaux complexes impliquant des co-expositions, où chaque contrainte environnementale doit être rigoureusement maîtrisée et contrôlée. C'est là la raison majeure pour laquelle peu de travaux de la littérature concernent l'impact sur la santé de différentes contraintes environnementales combinées avec les ONIE. Cette hypothèse pourrait expliquer la discordance constatée dans les conclusions d'études scientifiques qui se focalisent sur les effets générés par les ondes seules.

Les études décrites dans la suite de cet article concernent la co-exposition associant les ONIE à la contrainte thermique, qui est un facteur environnemental communément rencontré sur les lieux d'habitation et dans le milieu professionnel. L'hypothèse faite ici est que les ONIE sensibilisent l'organisme sans générer un phénomène de bioaccumulation ni de perturbations particulières qui seraient liés à la contrainte thermique, l'organisme étant grandement capable de s'adapter à de grands écarts de température. Ainsi, les ONIE pourraient modifier le seuil de sensibilité périphérique et, de ce fait, fragiliser l'organisme lorsqu'il est exposé à une nuisance à laquelle il n'a jamais été soumis.

Co-exposition aux ONIE et à la contrainte thermique

Exposé au chaud ou au froid, l'organisme met en œuvre des mécanismes de régulation de sa température interne qui interagissent avec d'autres fonctions physiologiques, telles que le sommeil, l'activité locomotrice ou l'apport alimentaire. Ces fonctions régulent les entrées et les sorties d'énergie de l'organisme (voir la Figure 1 ci-après) afin d'assurer le maintien de l'homéostasie énergétique. Ce maintien est vital, en particulier pour les organismes en développement comme ceux des enfants, car il permet d'assurer une croissance optimale, de réduire la morbidité et la mortalité chez certains nouveau-nés affichant un petit poids à la naissance. Peu d'études se sont intéressées à la population juvénile (nourrissons, enfants, adolescents) qui est pourtant plus sensible à certains facteurs environnementaux en raison de son immaturité cérébrale et de son métabolisme, lesquels la distinguent de la population adulte. Cette vulnérabilité physiologique est exacerbée par des proportions corporelles qui provoquent une pénétration plus profonde des ondes considérées que dans celui d'un adulte (Wiar *et al.*, 2008). Ainsi, on ne peut écarter l'hypothèse que cette pénétration plus importante des ONIE puisse provoquer des effets notables à long terme se répercutant (voire s'accroissant) à l'âge adulte.

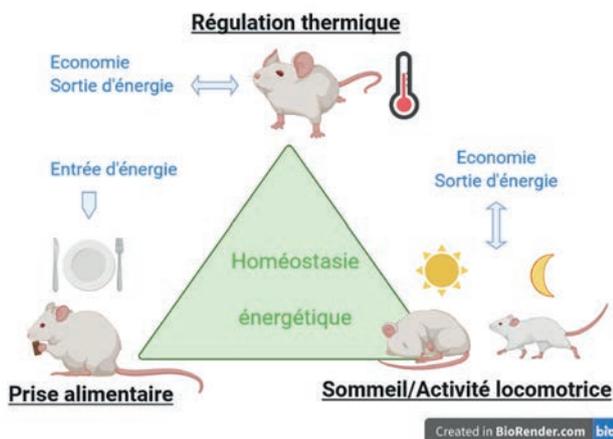


Figure 1 : Les trois grandes fonctions physiologiques contrôlant les entrées et sorties d'énergie de l'organisme et impliquées dans la régulation de l'homéostasie énergétique.

Des expérimentations ont été menées en laboratoire sur le développement de rats juvéniles exposés à des ONIE de faible intensité, du type de celles émises par des antennes relais (Pelletier *et al.*, 2013 ; 2014). L'objectif était d'évaluer les éventuelles perturbations des fonctions physiologiques évoquées *supra*. Des rats âgés de trois semaines ont été exposés pendant cinq semaines (23h/24, 7j/7) à des ondes (900 MHz, 1 V/m, 0,3 mW/kg) à deux températures ambiantes, 24 et 31°C. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'animaux non exposés ayant suivi le même protocole. Le sommeil, la thermorégulation, la prise alimentaire et l'activité locomotrice ont ensuite été explorés chez les mêmes animaux à l'âge de huit semaines (de jeunes adultes). Contrairement aux travaux de la littérature, les analyses ont été focalisées sur des expositions de

longue durée (plusieurs semaines) et réalisées dans deux conditions thermiques proches du confort, correspondant aux situations rencontrées dans les habitations des personnes exposées aux émissions des antennes relais. Le niveau d'intensité d'exposition aux ONIE a été choisi de façon à être le plus proche possible de celui d'une antenne relais, tout en évitant de provoquer un échauffement de l'organisme.

Les résultats ont montré que la durée et l'efficacité du sommeil, tout comme la vigilance ainsi que les durées du sommeil lent et du sommeil paradoxal n'étaient pas modifiées par l'exposition aux ONIE, et ce quel que soit l'environnement thermique. Seule la fréquence des épisodes de sommeil paradoxal augmentait chez les animaux exposés. Cette fragmentation pourrait correspondre à « une mise en alerte de l'animal », car ce stade du sommeil est particulièrement sensible aux situations de stress (Amici *et al.*, 1994). À 31°C, la température cutanée caudale des rats, mesurée par thermocouples et par caméra thermique, était inférieure chez les animaux exposés (respectivement - 1,21°C et - 1,60°C), traduisant une vasoconstriction (voir la Figure 2 ci-après). L'utilisation d'un agent pharmacologique alpha-adrénergique a confirmé la persistance de cette vasoconstriction uniquement chez les animaux exposés. Paradoxalement, à cette température ambiante, une vasodilatation devrait être observée afin d'augmenter les pertes de chaleur convective et radiative de l'organisme et ainsi assurer le maintien de l'homéothermie. Ce mécanisme vasomoteur inapproprié, associé à une augmentation de l'activité locomotrice et de la prise alimentaire, indique que les animaux exposés aux ONIE mettent en place des processus leur permettant de conserver et de produire de la chaleur, des processus qui ne s'observent normalement que chez des animaux exposés à des températures ambiantes plus basses (Gautier, 2000).

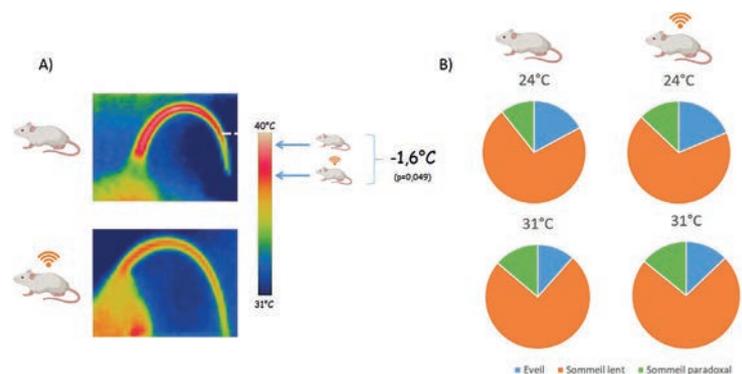


Figure 2 : A) Photographies obtenues par caméra thermique montrant que la température cutanée de la queue des rats exposés aux ONIE à une température de 31°C (🐭) est inférieure à celle des animaux non exposés (🐭). B) Restitution en pourcentages, par rapport au temps d'enregistrement, des durées totales des phases d'éveil, de sommeil lent et de sommeil paradoxal chez les animaux non exposés et chez ceux exposés aux ONIE, à des températures ambiantes de 24 et 31°C.

Ces résultats ont permis de conclure à un dysfonctionnement des systèmes de régulation assurant l'homéothermie. L'hypothèse d'une modification du confort thermique et de l'existence d'un signal nerveux périphérique

« froid », qui pourrait être à l'origine du déclenchement des mécanismes impliqués dans la conservation de l'énergie, pouvait donc être avancée.

Les modifications du confort thermique ont donc été évaluées sur une période de 24h chez des animaux exposés ou non aux ONIE et présentant les mêmes caractéristiques physiques que celles des animaux de l'étude précédente (voir la Figure 3 ci-après). Les rats étaient libres de se déplacer entre trois enceintes régulées chacune à une température d'air différente, 24, 28 et 31°C. L'animal avait donc la possibilité de choisir sa température ambiante optimale de confort (« thermopreferendum »). Les résultats ont montré que les rats du groupe Contrôle préféraient séjourner dans l'enceinte où la température d'air était maintenue à 28°C – ce qui était conforme aux données de la littérature concernant les rats de la sous-espèce Wistar (Kumar *et al.*, 2009) –, alors que pour les animaux exposés aux ondes, le « thermopreferendum » était de 31°C. Ces derniers ont donc adopté une stratégie d'évitement des températures les plus basses, ce qui confirme l'observation faite du déclenchement de réactions thermorégulatrices pour lutter contre le froid. En effet, la réponse comportementale fait partie intégrante de la régulation de l'homéothermie en anticipant le déséquilibre thermique, afin d'éviter l'activation de réactions végétatives beaucoup plus coûteuses en énergie pour l'organisme. Ainsi, le choix d'une température ambiante plus élevée, associée à une augmentation des phases d'immobilité lesquelles représentent un processus d'économie d'énergie, correspond bien à une stratégie de maintien de l'homéostasie énergétique par une réponse comportementale adaptée se révélant peu consommatrice d'énergie. Cet aspect est bien souvent négligé, au profit de la recherche d'effets plus marqués sur les réponses thermiques apportées par le système nerveux autonome, souvent observées pour des niveaux d'intensité des ONIE plus élevés.

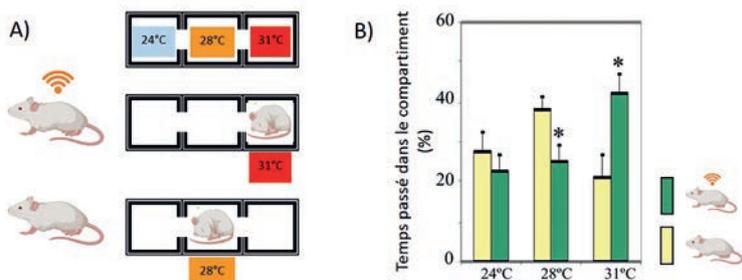


Figure 3 : A) Dispositif d'évaluation du « thermopreferendum » chez les rats exposés aux ONIE. Ces derniers choisissent de séjourner à une température ambiante de 31°C (🐭), alors que ceux non exposés aux ONIE choisissent une température de 28°C (🐭).

B) Graphique représentant le temps passé dans chaque compartiment selon les températures ambiantes par rapport au temps total passé dans le dispositif. La significativité des différences est également indiquée : * $p < 0,05$.

L'exposition aux ONIE athermiques de faible intensité peut donc déséquilibrer le bilan thermique et augmenter la température interne du corps par un processus d'économie et/ou de production d'énergie. Cela a été confirmé par une étude menée sur une autre espèce de rongeur (Mai

et al., 2020). Des souris ont été exposées à des ondes de 900 MHz (DAS de $0,16 \pm 0,1$ W/kg), deux fois par jour pendant une semaine (une heure le matin et une heure l'après-midi) à une température de thermoneutralité de 24°C, c'est-à-dire celle où le métabolisme est minimal et la température interne est maintenue constante par la mise en jeu de la vasomotricité et d'une adaptation comportementale. Ainsi, et à cette condition, toute modification de la température interne ne peut être attribuée qu'à l'impact des ONIE.

Durant les deux sessions d'exposition aux ONIE mais également dans l'heure qui a suivi l'exposition, une augmentation de la température interne péritonéale, en moyenne + 1 °C, a été observée chez les souris exposées par comparaison à celles du groupe Contrôle, à partir du deuxième jour et jusqu'au sixième jour d'exposition (voir la Figure 4 ci-après). Dans la littérature, des augmentations de la température interne induites par les ONIE sont généralement décrites pour des valeurs de DAS plus élevées (≥ 4 W/kg), lesquelles sont considérées comme ayant un effet thermique (ICNIRP, 2020). Dans notre étude, la valeur de DAS étant de 0,16 W/kg, l'élévation de température interne ne pouvait dès lors pas être attribuée à un effet thermique des ONIE par absorption diélectrique. Cette conclusion est renforcée par le fait qu'aucun changement de température interne chez les souris exposées n'a été observé le premier jour d'exposition, signifiant que les ondes n'ont pas entraîné un échauffement corporel chez les souris. De plus, il a été observé que la température interne s'élève dès le début de l'exposition et qu'elle ne baisse qu'à la fin de cette exposition sur une période allant du deuxième au sixième jour, ce qui montre une relation causale étroite entre l'exposition et la régulation thermique. En effet, la vasoconstriction périphérique joue un rôle-clé en réduisant les pertes caloriques de l'organisme, ce qui provoque une augmentation de la température interne. L'augmentation de la production de chaleur n'est cependant pas à exclure ; des études complémentaires sont en cours pour expertiser ce point.

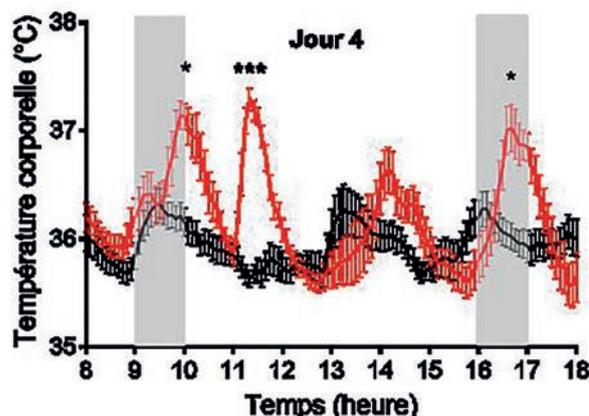
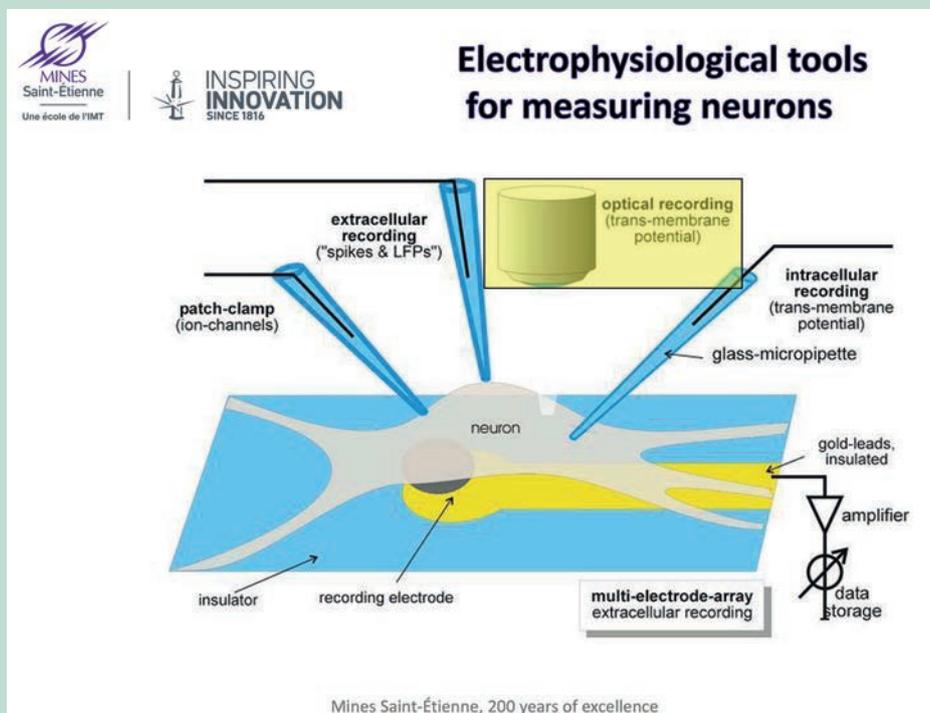


Figure 4 : Évolution, en fonction de l'heure, de la température interne moyenne \pm SEM des animaux non exposés (courbe noire) ou exposés aux ONIE (courbe rouge), à une température de 24°C, au 4^{ème} jour d'exposition. Les bandes grises indiquent les périodes d'exposition. La significativité des différences est également indiquée : * $p < 0,05$ et *** $p < 0,001$ (source : thèse soutenue par Thi Cuc MAI, le 11 décembre 2020).

Un aperçu de la recherche française en neurobioélectronique : focus sur le département Bioélectronique de Gardanne (École des Mines de Saint-Étienne)

Résumé par Dominique Dron, ingénieure générale des mines – Conseil général de l'Économie –
d'après un article de Rodney O'Connor de janvier 2019.



Le département Bioélectronique – BEL – a été créé en 2009 au Centre microélectronique de Provence de Gardanne, rattaché à l'École des Mines de Saint-Étienne. Ce département est dirigé par Rodney O'Connor. L'objectif était de créer un département de renommée internationale dans lequel des technologies bioélectroniques sont développées à partir d'une compréhension de haut niveau de l'interface électronique/tissu biologique.

La bioélectronique traite du couplage des mondes de l'électronique et de la biologie. La faculté naturelle de « reconnaissance » dans l'univers biologique, par exemple entre deux molécules, peut être combinée aux capacités de la microélectronique de traiter les signaux pour créer de nouveaux biocapteurs puissants. Ces appareils électroniques peuvent ainsi aider à « guider » les événements biologiques, par exemple la croissance cellulaire, en créant de nouveaux outils pour la recherche biomédicale. Cette fertilisation croisée entre deux disciplines améliore notre compréhension des processus de la vie et constitue la base d'un dépistage et d'un traitement avancés des maladies. Elle permet aussi de suivre finement l'activité des neurones, et donc de caractériser des effets positifs ou négatifs des ondes sur leur fonctionnement, deux facettes des mêmes phénomènes ensuite utilisables en prévention ou en thérapie.

L'électronique organique est une technologie particulièrement adaptée à la bioélectronique. Elle repose sur des semi-conducteurs organiques, dont la souplesse offre une meilleure compatibilité mécanique avec les tissus que ce qu'offrent les matériaux électroniques traditionnels, tandis que leur compatibilité naturelle avec les substrats flexibles convient aux formes spécifiques souvent requises pour les implants biomédicaux. De plus, la capacité de ces matériaux à conduire des ions en plus des électrons ouvre de nouvelles possibilités de communication avec les processus biologiques.

Les quatre axes du département BEL sont la neuro-ingénierie, les textiles bioélectroniques, les micro-électrodes flexibles pour la stimulation neurale infrarouge et le traitement bioélectronique des cancers, comme le glioblastome (dispositifs d'administration des thérapies *via* l'électropulsation et l'électroporation, des thérapies électriques pulsées ultracourtes).

Plusieurs autres laboratoires français de bioélectronique sont reconnus au plan international : laboratoire IMS de l'Université de Bordeaux 1, IPBS Toulouse, Institut Gustave Roussy, XLIM Limoges. On trouve également d'excellents centres aux États-Unis, en Chine, en Inde et en Slovaquie.

Les laboratoires français ont obtenu au cours des dernières années des résultats remarquables : en particulier, ils ont apporté de nouvelles preuves que les réseaux neuronaux des mammifères sont influencés par les champs électriques et électromagnétiques de manière non thermique. Peuvent être cités notamment :

- le département BEL :

- Alors que seuls les effets des basses fréquences (de l'ordre de 1 kHz) étaient connus pour agir en neurostimulation, certains canaux ioniques des membranes neuronales peuvent également réagir à des impulsions électriques ultra rapides (radiofréquences : 300 à 800 MHz) et convertir ces hautes fréquences en courant continu. Le mécanisme impliqué est encore inconnu ; il impacte aussi les organites cellulaires (mitochondries...). Cette capacité des neurones à rectifier une modulation électrique est saturée entre 1 et 10 GHz (1 à 0,1 ns).
- En oncologie, certaines expérimentations utilisent de puissants rayonnements non ionisants pulsés sur des cellules cancéreuses (électrochimiothérapie par électroporation : 1 kV/cm, pendant une microseconde).
- Lorsque deux sources de champs électromagnétiques se situant autour de 2 kHz provoquent une fréquence de battements dans la gamme des neurostimulations (10 Hz), c'est cette interférence qui peut être utilisée pour stimuler le cerveau en profondeur.

- l'IMS de Bordeaux :

Exposée à un signal de téléphonie mobile de type GSM, l'activité spontanée en bouffées des neurones est réduite de façon significative sans échauffement, avec un effet reproductible et dépendant de la dose de rayonnement. Ce résultat a été mis en évidence par une nouvelle méthode de suivi global de l'activité neuronale (transfert d'énergie non radiatif suivi par bioluminescence) ; il constitue une première mondiale (2018).

Ensemble, ces résultats fournissent des preuves solides des effets non thermiques des champs électriques radiofréquences sur les neurones et les cellules excitables (cardiaques, musculaires), ce qui ouvre de nouvelles pistes en matière à la fois thérapeutique et de prévention sanitaire et environnementale.

Quels mécanismes pourraient être impliqués ?

L'activation des mécanismes de conservation de la chaleur (vasoconstriction et choix d'une température de confort plus élevée) et de production de la chaleur (augmentation de la quantité de nourriture ingérée et de l'activité locomotrice) pourrait être induite par une exacerbation de la sensibilité périphérique au stimulus froid due à un effet direct des ONIE sur des thermorécepteurs qui possèdent une protéine appelée TRP8, laquelle est sensible au froid dans une ambiance correspondant à des températures inférieures à 28°C. Selon Glaser (2005), le groupe des récepteurs thermiques TRP pourrait constituer une cible sensible aux ONIE. Pour étudier l'implication de ces récepteurs dans les réponses induites par les ondes, nous avons utilisé un antagoniste spécifique (Mai *et al.*, 2020) afin d'inactiver leur sensibilité (voir la Figure 5 ci-contre). Les processus de thermogenèse liés au métabolisme sont alors inhibés, entraînant une diminution de la température interne péritonéale des animaux non exposés aux ONIE. En revanche, chez les animaux exposés, l'injection de l'antagoniste n'a pas induit de diminution de leur température interne. Nous avons donc émis l'hypothèse que la conformation des récepteurs TRPM8 pourrait changer à la suite d'une exposition aux ONIE, car certaines protéines « ca-

nal » modifieraient leur conformation et, par conséquent, leur sensibilité. L'implication des récepteurs TRPM8 dans les réponses induites par les ONIE reste donc à explorer.

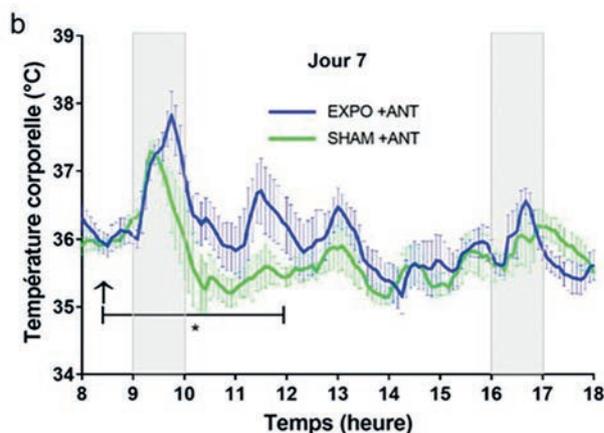


Figure 5 : Température corporelle péritonéale moyenne \pm SEM au 7^{ème} jour d'exposition, après l'injection d'un antagoniste des récepteurs TRPM8 ou du solvant seul chez les animaux exposés aux ONIE (courbe bleue) et chez ceux non exposés (courbe verte). La flèche indique le moment de l'injection. Les zones grisées indiquent les périodes d'exposition. La significativité des différences est également indiquée: * $p < 0,05$ (thèse soutenue par Thi Cuc MAI, le 11 décembre 2020).

En conclusion, la seule exposition aux ONIE athermiques de faible intensité ne produit pas ou que peu d'effets, mais des effets notables peuvent être observés lors d'une co-exposition sous forme de perturbations du sommeil, de l'activité locomotrice, de la prise alimentaire et de la thermorégulation, laquelle entraîne des perturbations de l'homéostasie énergétique. Face à cette co-exposition, l'animal déclenche des réactions de type « exposition au froid » avec des réponses de l'organisme traduisant une économie d'énergie, dont l'origine pourrait être une modification de la conformation des protéines « canal » des thermorécepteurs TRPM8. Ces résultats observés chez deux espèces de rongeurs – le rat et la souris – fréquemment utilisées comme modèles pour des études en lien avec l'homme, posent la question des effets possibles chez les riverains d'antennes relais, avec des conséquences immédiates, comme la fatigue, les troubles du sommeil ou les céphalées (symptômes les plus cités), et des conséquences à long terme, comme l'obésité et/ou les problèmes cardiovasculaires, deux pathologies liées à l'homéostasie énergétique.

Références

- AMICI R. *et al.* (1994), "Pattern of desynchronized sleep during deprivation and recovery induced in the rat by changes in ambient temperature", *J Sleep Res.* 1994/12/01 edn, 3(4), pp. 250-256.
- GAUTIER H. (2000), "Body temperature regulation in the rat", *J Therm. Biol.* 25(4), pp. 273-279.
- GENUIS S. J. & LIPP C. T. (2012), "Electromagnetic hypersensitivity: fact or fiction?", *Sci Total Environ.* 2011/12/14 edn, 414, pp. 103-112, doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.11.008.
- GLASER A. (2005), *Are thermoreceptors responsible for 'non-thermal' effects of RF fields*, pp. 2-13.
- ICNIRP (2020), "Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)", *Health Physics* 118(5), pp. 483-524, doi: 10.1097/HP.0000000000001210.
- KUMAR D., MALLICK H. N. & KUMAR V. M. (2009), "Ambient temperature that induces maximum sleep in rats", *Physiol Behav* 98(1-2), pp. 186-191.
- MAI T. C. (2020), « Effets d'une exposition répétée aux ondes radiofréquences sur la régulation thermique chez les rongeurs », thèse de doctorat mention « Biologie-Santé », sous-spécialité « Physiologie intégrée », Université de Picardie Jules Verne.
- MAI T. C. *et al.* (2020), "Effect of non-thermal radiofrequency on body temperature in mice", *Scientific Reports* 10(1), p. 5724, doi: 10.1038/s41598-020-62789-z.
- MILLER C. S. (1997), "Toxicant-induced loss of tolerance--an emerging theory of disease?", *Environ Health Perspect.* 1997/03/01 edn, 105, suppl. 2, pp. 445-453.
- PELLETIER A. *et al.* (2013), "Effects of chronic exposure to radiofrequency electromagnetic fields on energy balance in developing rats", *Environmental Science and Pollution Research International* 20(5), pp. 2735-2746, doi: 10.1007/s11356-012-1266-5.
- PELLETIER A. *et al.* (2014), "Does exposure to a radiofrequency electromagnetic field modify thermal preference in juvenile rats?", *PLoS One* 9(6), p. e99007, doi: 10.1371/journal.pone.0099007.
- WIART J. *et al.* (2008), "Analysis of RF exposure in the head tissues of children and adults", *Phys Med Biol.* 2008/06/20 edn, 53(13), pp. 3681-3695, doi: 10.1088/0031-9155/53/13/019.

Questions ouvertes sur les effets des ondes électromagnétiques et sonores sur la santé et l'environnement

Par Olivier MERCKEL

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

Les spectres électromagnétiques et sonores sont loin de constituer des entités homogènes, notamment en matière d'interactions entre les ondes et les êtres vivants. Si certaines gammes de fréquences font l'objet de recherches soutenues en matière d'effets éventuels sur la santé, par exemple dans les domaines des communications mobiles ou des fréquences audibles, d'autres restent largement inexplorées. Et, même pour les plus étudiées, l'accumulation des connaissances, qui ne met pas en évidence, à l'heure actuelle, d'impact majeur en matière de santé publique, laisse ouvertes un certain nombre de questions, par exemple concernant des hypothèses de mécanismes d'action liés aux modulations des signaux, à leur fréquence, à la possibilité d'effets sur l'activité cérébrale ou encore à des symptômes associés par certaines personnes à leur exposition aux ondes électromagnétiques ou acoustiques. L'effet de ces ondes sur l'environnement est par ailleurs, aujourd'hui encore, pratiquement inexploré.

Introduction

Alors qu'il n'a pas été démontré à ce jour d'impact majeur de l'exposition aux ondes électromagnétiques en matière de santé publique, la production d'articles consacrés à la recherche d'effets éventuels reste soutenue. Des questions restent en effet toujours ouvertes, concernant par exemple des hypothèses de mécanismes d'interactions au niveau cellulaire, en particulier les échanges thermiques de faible intensité et leurs répercussions possibles, à court, moyen ou long termes, sur les organes ou le métabolisme chez l'animal.

Les effets des ondes acoustiques d'intensité élevée sur l'audition sont bien connus, mais les mécanismes sous-jacents aux impacts du bruit sur la santé, par ailleurs de mieux en mieux caractérisés, sont encore mal compris.

Entre les interactions bien décrites des ondes de forte intensité avec le vivant et certaines affirmations non validées, il existe un espace pour des questions encore ouvertes concernant les effets éventuels des ondes électromagnétiques et sonores sur la santé et l'environnement.

Entre consensus et incertitudes

Selon que l'on adopte le point de vue de chercheurs, d'organismes d'expertise, d'associations militantes ou encore de particuliers, l'état des connaissances concernant les effets sur la santé de l'exposition aux champs et aux ondes

électromagnétiques non ionisants ⁽¹⁾, ainsi qu'aux ondes sonores, peut apparaître aussi bien sans relief que particulièrement contrasté. Dans un domaine pourtant largement investi par la recherche d'effets potentiels sur le vivant, la controverse est encore active, y compris sur la qualification et la quantification des risques, présents et à venir, parfois même au sein de la communauté scientifique. Si des interrogations concernant les effets éventuels sur la santé des ondes électromagnétiques ou sonores trouvent assez naturellement leur origine dans l'émergence de nouvelles modalités d'exposition (déploiement de nouvelles technologies de communication mobile – la 5G, par exemple –, évolutions technologiques – compteur Linky –, ou encore le développement de parcs éoliens) ; d'autres persistent, à bas bruit, depuis de nombreuses années au gré, par exemple, d'aménagements locaux du territoire, en lien notamment avec les lignes de transport d'électricité à haute tension.

Le consensus scientifique, partagé et accepté par les acteurs mobilisés sur la controverse « ondes et santé », se réduit à la reconnaissance, d'une part, de la stimulation du système nerveux par les champs magnétiques basses

(1) On parlera plus volontiers de « champs électromagnétiques » pour désigner les composantes non propagatives des rayonnements émis par des sources électromagnétiques, alors que le terme « onde » fait référence, en règle générale, à la propagation de l'énergie électromagnétique à partir d'une source.

fréquences, et de ce qui est désigné sous les termes d'effets thermiques des ondes électromagnétiques radiofréquences et, d'autre part, des effets auditifs des ondes acoustiques. Dans un cas comme dans l'autre, c'est l'exposition à des intensités très élevées de champs ou ondes électromagnétiques, ou acoustiques, qui est responsable des effets observés. Des intensités très élevées qui ne sont pas rencontrées, sauf cas accidentel, dans les activités de la population générale, mais peuvent être subies dans le cadre de l'exercice de certaines professions, qui adoptent donc des mesures de prévention pour s'en protéger.

En dehors de ces situations, différentes visions s'affrontent encore aujourd'hui, y compris dans une partie de la communauté scientifique, sur l'existence ou non d'effets délétères pour la santé de l'exposition aux ondes électromagnétiques ou acoustiques à des niveaux inférieurs aux valeurs limites réglementaires. Les effets biologiques observés à la suite d'une exposition à un agent externe (ici les ondes électromagnétiques ou acoustiques) peuvent être définis comme des changements d'ordre biochimique ou physiologique, ou du comportement, qui interviennent dans une cellule, un organe ou encore l'organisme complet. En permanence, les êtres vivants sont exposés à des stimulations internes et externes, et ces effets biologiques marquent les réponses adaptatives normales des cellules, des organes ou des organismes à ces stimulations. Un effet sur la santé d'un individu n'intervient que lorsque les effets biologiques (quelle que soit leur cause) dépassent les limites d'adaptation de l'organisme. Bien entendu, il est important de considérer les effets éventuels sur la santé qui peuvent s'observer à long terme, longtemps après des expositions qui n'auraient engendré, sur le moment, que des effets biologiques, ou à la suite d'expositions chroniques de faible intensité, par exemple.

Les champs et ondes électromagnétiques transportent de l'énergie électromagnétique. Cette énergie interagit avec la matière vivante selon différentes modalités, en particulier en fonction de la fréquence des rayonnements. Aux fréquences basses, l'énergie est plutôt convertie en courants électriques, qui peuvent interagir, par exemple, avec le système nerveux. Aux fréquences plus élevées, à partir de 100 kHz environ, l'énergie déposée est transformée en énergie mécanique, au niveau moléculaire, puis thermique, par un mécanisme bien décrit (Foster et Schwan, 1996), avant que des processus de dissipation n'interviennent, par conduction dans les tissus et *via* la circulation sanguine (Foster et Glaser, 2007). Tant que la quantité d'énergie convertie est faible par rapport aux capacités d'adaptation de l'organisme (thermorégulation), aucun effet macroscopique local ou systémique n'est observé.

Par ailleurs, il n'est pas exclu, bien qu'aucun mécanisme n'ait été encore démontré, que l'apport d'énergie électromagnétique puisse provoquer des effets biologiques autres qu'un effet thermique, soit directement, soit indirectement (Pelletier, 2013).

Les incertitudes, ou plus précisément les questions encore ouvertes en matière d'effets éventuels de l'exposition aux ondes sur la santé animale et humaine, se situent également dans ces liens, pour l'heure hypothétiques,

entre effets biologiques et effets sanitaires. Jusque dans les années 2010, une grande partie de la communauté scientifique s'intéressant aux effets des ondes électromagnétiques ou acoustiques sur le vivant tenait pour acquis qu'en dehors d'expositions à des niveaux très élevés, aucun effet, même biologique, n'était observé. La publication de travaux de recherche récents, à la fois dans le domaine des ondes électromagnétiques et celui des ondes acoustiques, ont quelque peu fait évoluer cette vision. En effet, si des incertitudes demeurent concernant, par exemple, des effets sur l'ADN ou le fonctionnement cellulaire, dont il est difficile souvent de savoir s'il s'agit de fluctuations biologiques endogènes ou d'un effet de l'exposition aux ondes, les données semblent plus robustes notamment pour celles concernant l'effet des ondes électromagnétiques sur le fonctionnement cérébral.

Des questions ouvertes

Un impact des ondes électromagnétiques sur le fonctionnement cérébral ?

En raison de l'utilisation des téléphones mobiles au contact de la tête, l'impact éventuel des radiofréquences sur le fonctionnement cérébral, son activité électrique, mais également les fonctions cognitives ou le sommeil a été exploré, de façon plus ou moins complète. Par fonction cognitive, on entend en particulier l'attention, la mémoire ainsi que les fonctions liées au langage, aux gestes ou encore à la coordination. En étudiant, par exemple, des paramètres d'enregistrements encéphalographiques chez l'homme, des modifications peuvent être observées sous une exposition aux radiofréquences (Croft *et al.*, 2010). Quelques études chez l'animal laissent par ailleurs penser que l'exposition aux ondes électromagnétiques émises par des téléphones mobiles pourrait modifier les performances cognitives et la mémoire, voire de façon *a priori* étonnante, les améliorer (Kumlin *et al.*, 2007 ; Arendash *et al.*, 2010). Chez l'homme, et en particulier chez les enfants, quelques expériences méritent de leur accorder notre attention : des études rapportent des modifications de paramètres d'encéphalogrammes, lors d'une exposition en aveugle aux radiofréquences, pour les ondes émises par le cerveau correspondant à l'attention, à la mémoire, ainsi qu'aux émotions et aux sensations (Krause *et al.*, 2006 ; Loughran *et al.*, 2013). On peut également rapprocher ces observations de celles obtenues dans le domaine des basses fréquences, pour lesquelles on retrouve une interférence possible avec l'activité électrique cérébrale (voir, par exemple, Carrubba *et al.*, 2010). À ce jour, cependant, aucune incidence pathologique de ces observations n'a été mise en évidence.

Des effets spécifiques des signaux ?

Une des questions encore ouvertes concernant les effets possibles des ondes électromagnétiques sur la santé est relative à la distinction entre, d'une part, ceux qui seraient liés à l'énergie véhiculée par les rayonnements, indépendamment de la répartition temporelle avec laquelle cette énergie est transmise aux structures biologiques et, d'autre part, ceux qui seraient liés précisément à la structure temporelle des émissions, autrement dit à la

modulation dans le temps des signaux. Les résultats des études menées sur des signaux dont les caractéristiques de modulation temporelle sont différentes, sont souvent disparates : des effets sur le fonctionnement biologique cellulaire peuvent être, par exemple, retrouvés pour des expositions à des signaux GSM⁽²⁾, mais pas en UMTS⁽³⁾, et réciproquement (voir, par exemple, Tillmann, Ernst *et al.*, 2010 ; Danker-Hopfe *et al.*, 2011 ; Zeni *et al.*, 2012 ; Smith-Roe *et al.*, 2019). Par ailleurs, l'hypothèse de démodulation des signaux qui pourrait être réalisée par des structures biologiques a fait l'objet d'études spécifiques (voir, par exemple, Sheppard *et al.*, 2008 ; Davis *et al.*, 2010 ; Kowalczyk *et al.*, 2010). Ces études n'ont pas mis en évidence une capacité des entités biologiques, à petite ou à grande échelle, à démoduler les signaux, et donc à potentiellement réagir à la forme temporelle du signal plutôt qu'à l'énergie véhiculée. À l'exception de l'étude de Carubba *et al.* (2010), dont les auteurs avancent la possibilité d'émission d'un potentiel évoqué cérébral lié à l'exposition à un signal basse fréquence de 217 Hz. Les études récentes sur les membranes cellulaires, naturelles ou artificielles, proposent d'intéressantes pistes de mécanismes d'action des champs électromagnétiques, notamment dans la gamme des ondes dites « millimétriques » (celles au-dessus de 10 GHz).

Des effets liés aux fréquences ?

Par définition, le spectre des fréquences, qu'elles soient sonores ou électromagnétiques, comporte une infinité de valeurs. Il est donc illusoire de penser pouvoir évaluer tous les risques éventuels liés à l'ensemble des fréquences. En dehors des phénomènes de résonance, qui sont importants à prendre en compte, et qui concernent donc des fréquences précises, les interactions entre les ondes et le vivant sont dirigées, notamment, par des mécanismes physiques liés, d'une part, aux rapports de grandeur entre les longueurs d'ondes et les objets illuminés et, d'autre part, à la nature de la matière en interaction. Les modes d'interaction entre les ondes et le vivant peuvent donc être définis dans des bandes de fréquences plus ou moins étendues, mais la question de savoir dans quelle largeur de bande de fréquences il est possible d'envisager que d'éventuels effets biologiques de même nature sont observables, reste ouverte. À l'heure actuelle, l'examen des résultats de plusieurs études publiées, qui ont exposé des cultures cellulaires ou des organismes entiers, par exemple, à des fréquences différentes, dans la bande 800 MHz à 2,5 GHz, ne permet pas de conclure si la fréquence joue un rôle ou non dans la nature ou l'intensité des effets observés (Anses, 2021). On remarquera toutefois une plage étroite de fréquences, autour de 6 à 10 GHz, dans laquelle la modification des interactions entre ondes électromagnétiques et tissus biologiques est très rapide, et qui voit l'interface air-peau devenir, au-dessus de 10 GHz, une « barrière » à la fois réfléchissante et absorbante. Les

effets éventuels de résonance de ces ondes sur les organismes de petite taille (insectes...) n'a quasiment fait l'objet d'aucune étude.

« Intolérances idiopathiques environnementales » ou effets cumulés ?

Hormis les effets liés à l'échauffement des tissus et certains effets sur l'activité électrique cérébrale, notamment, l'exposition aux radiofréquences est-elle susceptible d'induire des symptômes à court ou moyen termes, tels que ceux décrits par les personnes qui se déclarent électrohypersensibles ? Aucune preuve d'une causalité entre l'exposition aux champs électromagnétiques et la description de ces symptômes n'a pu être apportée jusqu'ici (Anses, 2018). Les effets cumulés de ces expositions physiques entre elles, ou avec des expositions chimiques, n'ont pas fait l'objet de publications à ce jour. Ces symptômes (fatigue, maux de tête, vertiges, douleurs...) sont également décrits par des personnes qui les associent à leur exposition aux bruits, notamment aux infrasons produits par des éoliennes (Anses, 2017), ou qui sont exposées à des polluants chimiques. Ces symptômes sont parfois regroupés dans la littérature scientifique sous l'expression d'« intolérance idiopathique environnementale », laquelle associe ces symptômes aux champs électromagnétiques ou aux éoliennes, par exemple.

Conclusion

Avec l'exposition aux ondes électromagnétiques qui ne cesse de croître dans un quotidien toujours plus connecté, la recherche de leurs effets éventuels reste nécessaire, en particulier pour tenter de répondre aux questions toujours ouvertes, concernant par exemple leurs effets sur le fonctionnement cérébral, ou l'impact éventuel de nouvelles fréquences appelées à être massivement utilisées. Mais la structuration de la recherche dans ce domaine est-elle adaptée pour trouver des réponses à toutes ces interrogations ? Dans ce qui peut apparaître comme un mouvement brownien, compter sur un effet vertueux du foisonnement des thèmes d'étude et sur la sérendipité pour espérer des découvertes fondamentales pourrait être un écueil pour la santé publique. En effet, l'évaluation des risques est fondée sur l'analyse des données produites, qui restent manifestement hétérogènes malgré les agendas de recherche publiés régulièrement par l'Organisation mondiale de la santé ou par l'Anses, en France, dans le cadre de son appel annuel à projets de recherche.

En nous affranchissant de tout *a priori*, une question ouverte semble également très peu explorée : celle des effets éventuels des ondes électromagnétiques et acoustiques sur l'environnement. Alors que la santé des populations humaines est, dans certains domaines, de mieux en mieux suivie, celle des mondes animal et végétal semble, en dehors des espèces utilisées en agroalimentaire, bien peu observée. Les interactions de ces ondes avec notre environnement, si elles existent, pourraient constituer un sujet d'étude à la profondeur insoupçonnée.

(2) GSM : Global System for Mobile Communications – La deuxième génération de téléphonie mobile.

(3) UMTS : Universal Mobile Telecommunications Systems – La troisième génération de téléphonie mobile.

Bibliographie

- ANSES (2017), « Évaluation des effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens ».
- ANSES (2018), « Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuées aux champs électromagnétiques ».
- ANSES (2021), « Expositions aux champs électromagnétiques liées au déploiement de la technologie de communication "5G" et effets sanitaires éventuels associés ».
- ARENDASH G. W., SANCHEZ-RAMOS J. *et al.* (2010), "Electromagnetic field treatment protects against and reverses cognitive impairment in Alzheimer's disease mice", *Journal of Alzheimer's Disease* 19(1), pp. 191-210.
- CARRUBBA S., FRILOT II C., CHESSON JR A. L. & MARINO A. A. (2010), "Mobile-phone pulse triggers evoked potentials", *Neuroscience Letters* 469(1), pp. 164-168.
- CROFT R. J., LEUNG S. *et al.* (2010), "Effects of 2G and 3G mobile phones on human alpha rhythms: Resting EEG in adolescents, young adults, and the elderly", *Bioelectromagnetics* 31(6), pp. 434-444.
- DANKER-HOPFE H., DORN H. *et al.* (2011), "Effects of electromagnetic fields emitted by mobile phones (GSM 900 and WCDMA/UMTS) on the macrostructure of sleep", *Journal of Sleep Research* 20 (1 PART I), pp. 73-81.
- DAVIS C. C. & BALZANO Q. (2010), "The brain is not a radio receiver for wireless phone signals: Human tissue does not demodulate a modulated radiofrequency carrier", *Comptes Rendus Physique* 11 (9-10), pp. 585-591.
- FOSTER K. R. & SCHWAN H. P. (1996), "Dielectric properties of tissues", *Handbook of biological effects of electromagnetic fields*, CRC Press, pp. 25-102.
- FOSTER, K. R. & GLASER R. (2007), "Thermal mechanisms of interaction of radiofrequency energy with biological systems with relevance to exposure guidelines", *Health Physics* 92 (6), pp. 609-620.
- KOWALCZUK C. *et al.* (2010), "Absence of nonlinear responses in cells and tissues", *Bioelectromagnetics* 31(7), pp. 556-565.
- KRAUSE C. M. *et al.* (2006), "Mobile phone effects on children's event-related oscillatory EEG during an auditory memory task", *International Journal of Radiation Biology* 82, pp. 443-450.
- KUMLIN T., IIVONEN H. *et al.* (2007), "Mobile phone radiation and the developing brain: Behavioral and morphological effects in juvenile rats", *Radiation Research* 168(4), pp. 471-479.
- LOUGHRAN S. P. *et al.* (2013), "No increased sensitivity in brain activity of adolescents exposed to mobile phone-like emissions", *Clinical Neurophysiology* 124, pp. 1303-1308.
- PELLETIER A. *et al.* (2013), "Effects of chronic exposure to radiofrequency electromagnetic fields on energy balance in developing rats", *Environmental Science & Pollution Research – International* 20(5), pp. 2735-2746.
- SHEPPARDA R. *et al.* (2008), "Quantitative evaluations of mechanisms of radiofrequency interactions with biological molecules and processes", *Health Physics* 95(4), pp. 365-396.
- SMITH-ROE S. L. *et al.* (2019), "Evaluation of the genotoxicity of cell phone radiofrequency radiation in male and female rats and mice following subchronic exposure", *Environmental and Molecular Mutagenesis*, octobre, doi: 10.1002/em.22343.
- TILLMANN T., ERNST H. *et al.* (2010), "Indication of cocarcinogenic potential of chronic UMTS-modulated radiofrequency exposure in an ethylnitrosourea mouse model", *International Journal of Radiation Biology* 86(7), pp. 529-541.
- ZENI O., SANNINO A. *et al.* (2012), "Induction of an adaptive response in human blood lymphocytes exposed to radiofrequency fields: influence of the universal mobile telecommunication system (UMTS) signal and the specific absorption rate", *Mutation Research* 747(1), pp. 29-35.

Des innovations aux transferts cliniques et commerciaux : 100 ans après leur découverte, les ultrasons médicaux vivent leur seconde révolution

Par David ATTALI, Alexandre DIZEUX et Jean-Francois AUBRY

Physique pour la médecine Paris, ESPCI Paris, INSERM, CNRS, PSL Université, Paris

Depuis la découverte de l'effet piézoélectrique par Pierre et Jacques Curie, en 1880, la France n'a pas cessé d'être un acteur majeur dans les ultrasons. Cela est particulièrement vérifié au niveau des applications biomédicales des ultrasons : industriels et laboratoires de recherche sont à la pointe des développements les plus innovants dans le domaine des ultrasons diagnostiques (avec l'imagerie ultrarapide) et thérapeutiques (avec les ultrasons focalisés de forte intensité). Conforter et renforcer la filière des ultrasons biomédicaux en France s'avère crucial, alors que la palette des effets des ultrasons sur les tissus biologiques s'est élargie considérablement ces dix dernières années, allant de la délivrance localisée de médicaments jusqu'à l'immunothérapie, et que le domaine pourrait se trouver au cœur d'une révolution dans le monde des neurosciences, avec la possibilité non seulement d'imager mais également de moduler l'activité cérébrale par ultrasons transcrâniens.

La France, pionnière dans les ultrasons

Piézoélectricité et transducteurs ultrasonores

Les ultrasons sont des ondes mécaniques dont la fréquence se situe au-delà du spectre audible par l'oreille humaine, soit une fréquence supérieure à 20 kHz. La piézoélectricité, à la base de la production des ultrasons, est découverte en France en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie (Curie et Curie, 1880), au sein de l'École de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (aujourd'hui, ESPCI Paris). Ils font en effet l'hypothèse qu'une pression mécanique exercée sur certains cristaux devrait engendrer une différence de potentiel électrique sur leurs faces opposées, hypothèse qu'ils démontrent expérimentalement sur des cristaux de quartz, de topaze ou encore de sucre. Le comportement réciproque de l'obtention d'une contraction mécanique en réponse à une différence de potentiel est théoriquement déduit des principes de la thermodynamique, en 1881, par le physicien Gabriel Lippman (Lippmann, 1881), toujours à Paris, puis vérifié expérimentalement par les frères Curie l'année suivante.

Si ces travaux démontrent la possibilité de générer et de recevoir des ultrasons avec de tels cristaux, il faut attendre les travaux de Paul Langevin qui, en 1916, co-invente et brevète le sonar avec l'ingénieur Constantin Chilowsky (Chilowsky et Langevin, 1920) dans le but de détecter les sous-marins allemands qui causent des dégâts considérables, dès la Première guerre mondiale. Le même cristal piézoélectrique est alors utilisé pour générer les ultrasons et enregistrer les échos en provenance des sous-marins.

Applications biomédicales

De la détection des sous-marins à celle des échos de structures anatomiques pour former des images du corps humain, il n'y avait qu'un pas. Un pas franchi de l'autre côté du Rhin dans les années 1940, à l'Université de Cologne, puis à l'Université de Vienne (Dussik, 1942). À Paris, André Denier développe « l'ultra-sonoscopie » du corps humain à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (Denier, 1951), mais la France ne retrouve un rôle moteur dans les ultrasons biomédicaux qu'à la fin des années 1980, avec Léandre Pourcelot, à Tours, qui introduit l'index de résistance (ou index de Pourcelot) qui s'impose dans l'analyse

ultrasonore des écoulements sanguins, et avec Dominique Cathignol et Jean-Yves Chapelon, à Lyon, qui apportent aux cliniciens un nouvel usage des ultrasons : la thérapie par ultrasons focalisés de forte intensité avec, d'une part, le premier lithotriporteur ultrasonore guidé par échographie (pour le traitement des calculs rénaux) (Cathignol *et al.*, 1989) et, d'autre part, le premier système clinique de traitement des cancers de la prostate par ultrasons (Gelet *et al.*, 1996). Comme nous le verrons dans la dernière partie de cet article, la France occupe actuellement une place de premier plan dans les ultrasons médicaux grâce à un écosystème unique de petites et moyennes entreprises innovantes, qui, appuyé par des laboratoires publics reconnus internationalement, repose sur des savoir-faire variés en conception de transducteurs ultrasonores, en électronique de contrôle et en conformation d'ondes, et qui trouve sa source dans les travaux pionniers de plusieurs générations de chercheurs depuis les frères Curie et leur étudiant, Paul Langevin.

Interaction des ultrasons avec les tissus biologiques

Les ultrasons biomédicaux offrent de nos jours un éventail d'applications extrêmement large, reposant sur divers effets biologiques sur les tissus. Ces applications se scindent en deux groupes : le diagnostic et la thérapeutique. Dans le cadre d'une utilisation diagnostique, les interactions physiques avec les tissus sont minimales et les ultrasons ont des effets thermiques ou mécaniques négligeables. Les ultrasons thérapeutiques cherchent, au contraire, à induire un effet sur les tissus. Ces effets biologiques vont de l'ablation thermique (Rouvière *et al.*, 2007) à la dissolution des caillots sanguins (Alexandrov *et al.*, 2004), en passant par la modulation de l'activité cérébrale (Fouragnan *et al.*, 2019) ou encore une meilleure pénétration des médicaments à travers les membranes cellulaires ou la barrière hémato-encéphalique (Constans *et al.*, 2020). Ces effets biologiques variés permettent des applications cliniques aussi diverses que le traitement des fibromes utérins, des cancers de la prostate ou du foie, ou encore de certaines pathologies neurologiques.

L'imagerie ultrasonore

La sécurité des examens échographiques repose sur les recommandations d'organismes de régulation (comme la Food and Drug Administration). Ces recommandations sont conçues pour contrôler les effets thermiques et mécaniques sur les tissus biologiques par le biais de paramètres de contrôle. Parmi ces paramètres, on peut citer l'indice mécanique (MI), qui indique le risque de cavitation acoustique, l'intensité moyenne du pic spatial (ISPPA), qui mesure l'intensité acoustique maximale dans le corps, et l'intensité moyenne temporelle du pic spatial (ISPTA), qui permet de déterminer le taux de dépôt d'énergie et, par extension, estime le risque thermique. Les organismes de régulation ont fixé des limites pour chacun de ces paramètres, limites que doivent respecter tous les dispositifs diagnostiques pour pouvoir être certifiés, les cliniciens devant de plus suivre les consignes d'utilisation émanant des sociétés savantes, comme la Société française de radio-

logie. Il est à noter que plusieurs milliards d'échographies ont été réalisées dans ces conditions, sans qu'aucun effet biologique indésirable n'ait été signalé. Les limites réglementaires sont extrêmement conservatrices et se situent largement en deçà des seuils de dangerosité : elles constituent des limites purement réglementaires et non pas des limites de sécurité.

La thérapie par ultrasons

Dans le cadre de la thérapie par ultrasons, il va sans dire que les effets sur les tissus ne sont pas négligeables, et ce d'autant plus qu'ils sont voulus. Mais s'ils peuvent aller jusqu'à la destruction tissulaire dans le cadre du traitement de cancers par exemple, ils peuvent également être légers et réversibles, comme dans le cas de la modulation de l'activité cérébrale.

Même dans le cas d'ultrasons focalisés de haute intensité utilisés pour l'ablation thermique, les effets biologiques sont très localisés puisque la région ciblée, correspondant à la taille de la focale du faisceau ultrasonore, est typiquement d'un ordre de grandeur correspondant à un grain de riz. En effet, la taille de la focale acoustique des systèmes actuellement utilisés chez l'humain varie de 4 à 60 mm de longueur et de 2 à 16 mm de diamètre, avec une forme ellipsoïdale. Afin de s'assurer de la localisation précise de la zone de traitement, la thérapie par ultrasons est guidée par imagerie par résonance magnétique (Cline *et al.*, 1992) ou par imagerie échographique (Ebbini et Haar, 2015).

En interagissant avec le tissu ciblé, les ultrasons induisent des effets thermiques ou mécaniques, déterminés par le type de tissu (par exemple, le muscle, l'os ou le cerveau) et par les paramètres acoustiques (la puissance, la durée de sonication et le mode de sonication – continu ou pulsé). Lorsqu'ils transmettent l'énergie ultrasonore en continu, les ultrasons focalisés de haute intensité peuvent augmenter la température des tissus au point focal. Le niveau et la durée de cette élévation de température détermine la « dose thermique » et le résultat biologique associé (voir la Figure 1 de la page suivante) .

Les effets thermiques peuvent être utilisés soit pour créer une élévation thermique de faible niveau pendant plusieurs heures (hyperthermie locale), soit pour entraîner une élévation de température élevée, brève et très localisée, qui « cuit » littéralement le tissu (ablation thermique) (Sapareto et Dewey, 1984). En effet, l'exposition des tissus à une température supérieure à 56°C, ne serait-ce qu'une dizaine de secondes, suffit à induire des dommages thermiques irréversibles pour les cellules par dénaturation des protéines. Ces effets sont notamment utilisés dans le traitement des varices, des fibromes utérins, des cancers du sein (Gombos *et al.*, 2006), du foie (Wu *et al.*, 2004) et de la prostate (Rouvière *et al.*, 2007), ou encore de certaines pathologies neurologiques (Martin *et al.*, 2009), comme le tremblement essentiel.

Par ailleurs, lorsque l'énergie acoustique est administrée en utilisant des ondes à une puissance élevée et pour des impulsions très courtes (de l'ordre de la microseconde), la faible quantité d'énergie déposée dans le tissu entraîne une élévation thermique négligeable, mais l'amplitude des

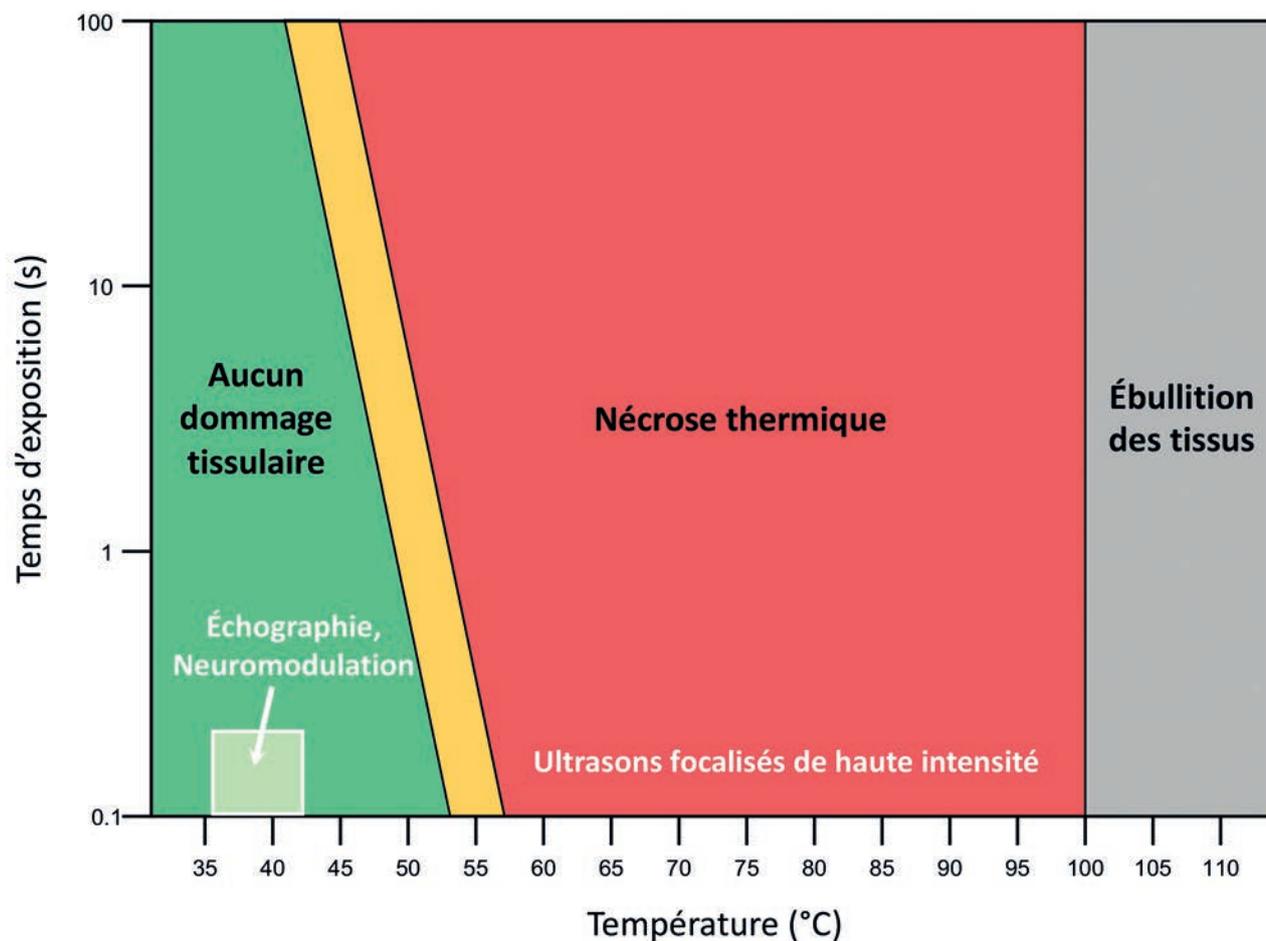


Figure 1 : Relation entre la dose thermique et l'effet biologique dans les tissus. En dessous du seuil de la dose thermique, les ultrasons ne produisent aucun dommage tissulaire ; au-delà du seuil précité, les ultrasons induisent une nécrose thermique des tissus ciblés (©David Attali, Physique pour la médecine Paris).

ondes mécaniques ultrasonores peut, quant à elle, être suffisante pour déchirer les tissus soit directement, soit *via* la création de bulles de cavitation (Rabkin, Zderic et Vaezy, 2005), une propriété mise à profit dans le traitement des calculs rénaux ou des calcifications des valves cardiaques (Messas Emmanuel *et al.*, 2021).

Les ultrasons médicaux à l'aube d'une nouvelle révolution : des défis à relever et des opportunités à saisir

Les systèmes portables et ultraportables

Les ultrasons biomédicaux ont naturellement bénéficié des progrès technologiques récents, en particulier de l'augmentation des puissances de calcul pour le traitement d'images et de la miniaturisation dans l'électronique. La société SuperSonic Imagine (Aix-en-Provence, France) a ainsi développé une approche très haut débit pour la conception de cartes graphiques permettant une cadence d'imagerie cent fois plus rapide que les échographes conventionnels, et offrant au praticien la possibilité d'imaginer l'élasticité des tissus (équivalent à une palpation à distance de tissus d'intérêt, comme des tumeurs). La société Sonoscanner (Paris, France) a, quant à elle, développé des échographes ultraportables, initialement de la taille d'un ordinateur portable, puis d'une tablette graphique et

enfin, plus récemment, de la taille d'un *smartphone*, sur lesquels le praticien branche une sonde échographique.

Les dispositifs de traitement par ultrasons focalisés ont également profité de ces progrès technologiques pour gagner en portabilité, en particulier pour les systèmes guidés par imagerie échographique. Ces nouvelles thérapies s'inscrivent parfaitement dans les nouveaux parcours de soins qui favorisent les traitements ambulatoires. On citera notamment les succès rencontrés par le traitement du glaucome (le dispositif EyeOP1 développé par Eye Tech Care, à Rillieux-la-Pape – France) (Aptel *et al.*, 2011) et le traitement des varices (le Sonovein® commercialisé par Theraclion (dont le siège est à Malakoff – France) (Obermayer, Aubry et Barnat, 2021).

Les ultrasons en neurosciences

Nous l'avons vu, la vitalité de la recherche et des développements technologiques autour des ultrasons médicaux en France a permis des évolutions spectaculaires dans un vaste champ d'applications diagnostiques et thérapeutiques. Un organe est malheureusement resté pendant près d'un siècle en dehors du spectre des ultrasons : le cerveau. Le crâne, après des millénaires d'évolution, est en effet composé de deux couches très denses (la table externe et la table interne) enveloppant une partie poreuse

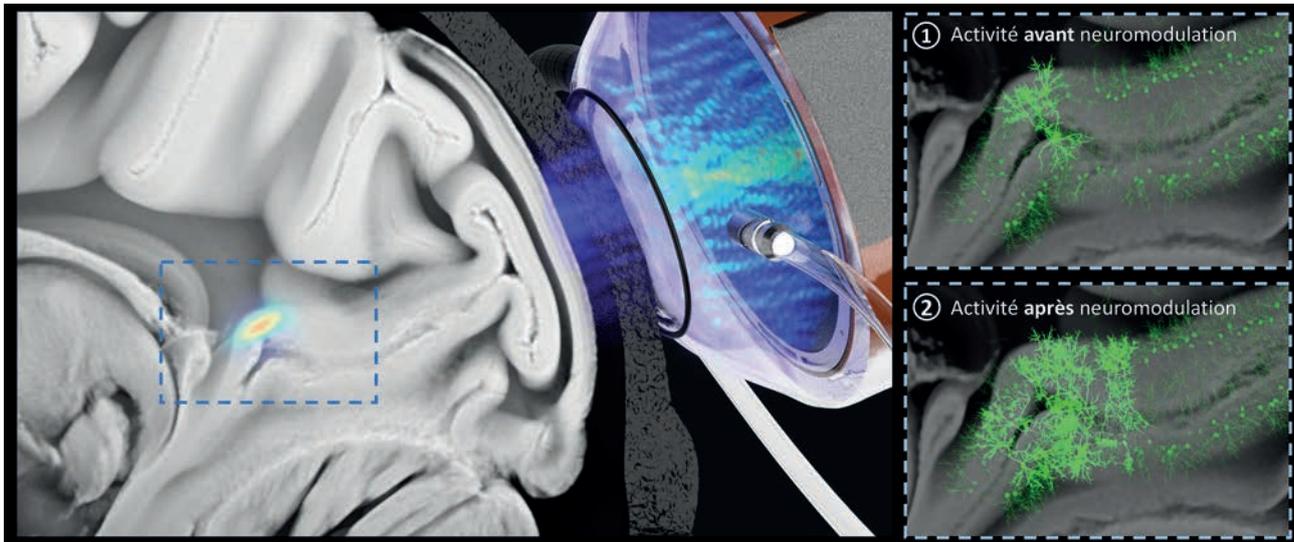


Figure 2 : Exemple d'un dispositif de stimulation ultrasonore transcrânienne permettant la neuromodulation ciblée et non invasive de régions cérébrales profondes situées ici à 5 cm derrière le crâne (©Alexandre Dizeux, Physique pour la médecine Paris).

(la diploé). Cette structure, protégeant remarquablement le cerveau des chocs mécaniques, limite de la même manière la pénétration des ondes mécaniques que sont les ultrasons. Mais durant les deux dernières décennies, une série de percées scientifiques et technologiques ont propulsé les ultrasons dans le domaine des neurosciences.

Thérapie du cerveau

Tout d'abord, le développement de la compensation non invasive de l'effet défocalisant de l'os du crâne a ouvert la voie aux ultrasons focalisés transcrâniens (Aubry *et al.*, 2003 ; Clement et Hynynen, 2002). Ces techniques reposent sur l'estimation des distorsions du champs ultrasonore induites par le crâne à l'aide de modèles numériques de la propagation du front d'onde à travers l'os, basés sur l'imagerie tomodensitométrique (TDM) (Kyriakou *et al.*, 2014) ou recourant à la résonance magnétique (IRM) (Miller *et al.*, 2015) du crâne. Ces techniques ont d'abord été mises en œuvre sur des réseaux multiéléments composés de plusieurs centaines de transducteurs, dont les capacités neurochirurgicales *via* la nécrose thermique ont été validées successivement sur des crânes secs (Pernot *et al.*, 2003), des cadavres (Chauvet *et al.*, 2013 ; Monteith *et al.*, 2013) et des modèles animaux (Hynynen *et al.*, 2006 ; Marquet *et al.*, 2013 ; Pernot *et al.*, 2007 ; Xu *et al.*, 2015). Enfin, ils ont été utilisés pour le traitement de patients souffrant de tremblement essentiel (Elias *et al.*, 2016), de la maladie de Parkinson (Martínez-Fernández *et al.*, 2018) ou de glioblastome (Carpentier *et al.*, 2016 ; Coluccia *et al.*, 2014). En parallèle, de nouvelles modalités thérapeutiques potentielles ont été développées, utilisant des ultrasons focalisés de faible intensité. Ces approches visent à induire des effets transitoires (par opposition à la nécrose thermique) et s'articulent autour de deux champs d'application : 1) l'ouverture sélective de la barrière hémato-encéphalique, permettant par exemple l'administration de médicaments thérapeutiques dans une région cérébrale précise (et diminuant ainsi les effets secondaires systémiques) (Hynynen *et al.*, 2001) ; et 2) la modulation directe de l'activité neuronale corticale (Deffieux *et al.*, 2013) et

même, pour la première fois de façon complètement non invasive, la neuromodulation des régions cérébrales profondes (Folloni *et al.*, 2019), qui sont largement impliquées dans les pathologies psychiatriques.

Imagerie du cerveau

Plus récemment, l'imagerie ultrasonore Doppler ultrarapide (jusqu'à 10 000 images par seconde) a constitué une percée dans la communauté des neurosciences en offrant une sensibilité sans précédent, permettant de visualiser la micro-vascularisation et la connectivité fonctionnelle avec une résolution spatiale de 100 μm (Tanter et Fink, 2014), d'abord sur des rongeurs anesthésiés (Macé *et al.*, 2011), puis libres de leurs mouvements et, enfin, sur des primates non humains éveillés (Dizeux *et al.*, 2019) et des nouveau-nés humains (Demene *et al.*, 2017).

Place de la France dans la compétition internationale : atouts et dangers

Selon l'association French Healthcare, le marché mondial de l'imagerie médicale représente en valeur 35 milliards d'euros (French Healthcare, 2019). Près de 80 % de ce marché est capté par quatre groupes : l'américain General Electric Healthcare, l'allemand Siemens, le néerlandais Philips Medical Systems et le japonais Toshiba (*Le Monde*, 2006). Ces positionnements dominants se retrouvent dans le marché de l'échographie, et les pépites françaises, qui commercialisent pourtant des échographes extrêmement innovants, affichent des chiffres d'affaires bien inférieurs aux *Big Four* : 26 millions d'euros (M€) en 2019 pour SuperSonic Imaging et 5 M€ en 2018 pour Sonoscanner.

Certaines sociétés françaises sont toutefois devenues des leaders mondiaux sur des applications de niche judicieuses, comme IMV Imaging dans l'échographie vétérinaire (6 M€ de chiffre d'affaires en 2019) et EDAP-TMS dans la thérapie par ultrasons focalisés (29 M€ de chiffre d'affaires en 2019). La niche de la thérapie par ultrasons mérite que l'on s'y attarde. Le tableau

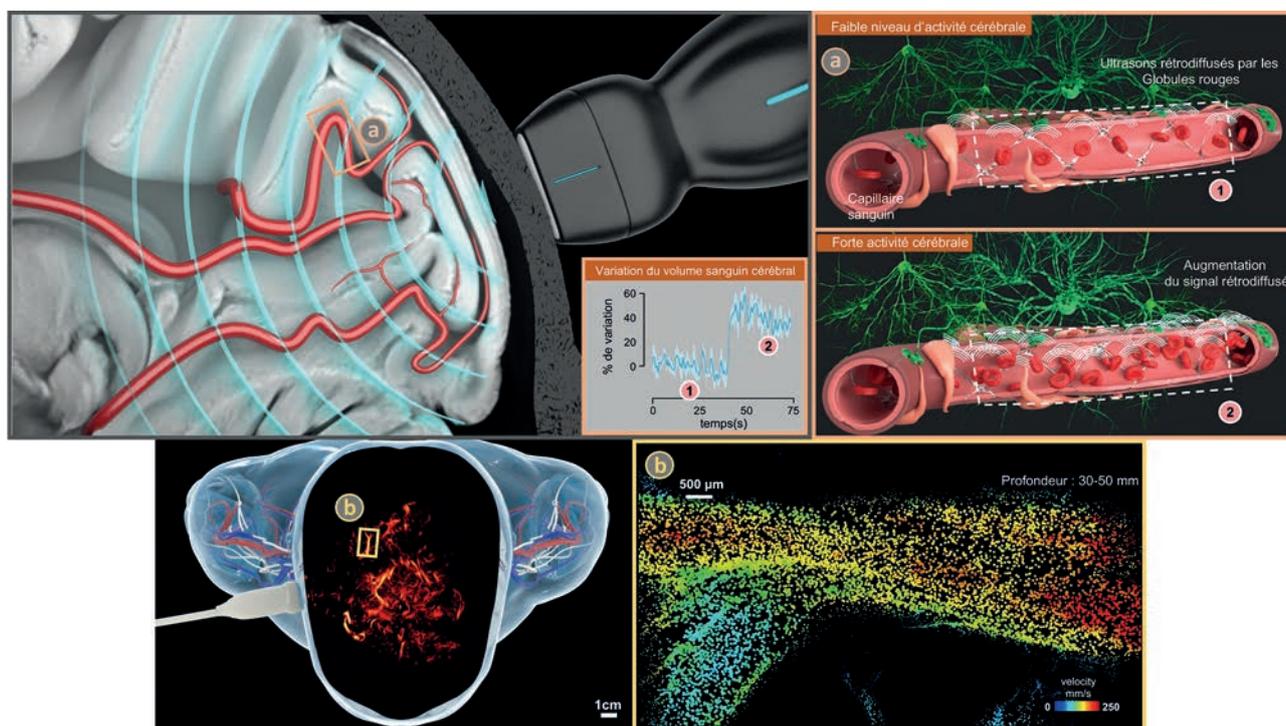


Figure 3 : Imagerie ultrasonore Doppler ultrarapide permettant la visualisation et l'étude de la micro-vascularisation à des échelles temporelles et spatiales inédites (©Alexandre Dizeux, Physique pour la médecine Paris).

	Nombre de centres de recherche préclinique et clinique	Nombre de centres de soins	Nombre d'entreprises
Europe	119	188	13
- France	24	54	7
- Allemagne	24	42	2
- Angleterre	17	16	0
- Espagne	10	4	0
- Italie	14	16	0
Amérique du Nord	112	130	20
- États-Unis	95	107	17
Asie	106	252	17
- Chine	49	153	9

Nombre et répartition mondiale des centres de recherche préclinique et clinique, des centres de soins et des entreprises dans le domaine des ultrasons thérapeutiques (Focused Ultrasound Foundation, 2020).

ci-dessus recense les acteurs académiques, cliniques et industriels de ce domaine dans le monde. La France y est représentée dans tous les secteurs dans des proportions supérieures au poids de son PIB. Elle occupe une place similaire à l'Allemagne en termes de centres de recherche et de soins, mais elle se distingue particulièrement au niveau du nombre des entreprises. Ces entreprises constituent un vivier de talents fertile qui donne régulièrement lieu à la création de nouvelles *start-ups*, en collaboration avec des laboratoires de recherche reconnus internationalement pour leurs idées pionnières et disruptives. Seule ombre au tableau : les investissements restent à un niveau inférieur à celui des investissements des concurrents internationaux. Selon les données de la Focused Ultrasound

Foundation (2020), les levées de fonds des entreprises françaises du secteur représentaient en nombre 33 % des levées, mais seulement 8 % de la somme totale collectée. Il faut maintenant que les jeunes pousses françaises à la pointe des innovations scientifiques et technologiques trouvent les moyens financiers dont elles ont besoin pour se muer en leaders mondiaux incontournables. Nombre d'entre elles en ont le potentiel.

Références bibliographiques

- ALEXANDROV A. V., DEMCHUK A. M., BURGIN W. S., ROBINSON D. J. & GROTTA J. C. (2004), "Ultrasound-Enhanced Thrombolysis for Acute Ischemic Stroke: Phase I. Findings of the CLOT-BUST Trial", *Journal of Neuroimaging* 14, 2, pp. 113-117.
- APTEL F., CHARREL T., LAFON C., ROMANO F., CHAPELON J.-Y., BLUMEN-OHANA E., NORDMANN J.-P. & DENIS P. (2011), "Miniaturized high-intensity focused ultrasound device in patients with glaucoma: a clinical pilot study", *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 52, 12, pp. 8747-8753.
- AUBRY J.-F., TANTER M., PERNOT M., THOMAS J.-L. & FINK M. (2003), "Experimental demonstration of noninvasive transskull adaptive focusing based on prior computed tomography scans", *The Journal of the Acoustical Society of America* 113, 1, pp. 84-93.
- CARPENTIER A., CANNEY M., VIGNOT A., REINA V., BECCARIA K., HORODYCKID C., KARACHI C., LECLERCQ D., LAFON C., CHAPELON J.-Y., CAPELLE L., CORNU P., SANSON M., HOANG-XUAN K., DELATTRE J.-Y. & IDBAIH A. (2016), "Clinical trial of blood-brain barrier disruption by pulsed ultrasound", *Science Translational Medicine* 8, 343, p. 343re2.
- CATHIGNOL D., CHAPELON J., MESTAS J., BIRER A. & LEWIN P. (1989), "Minimization of the negative pressure in piezoelectric shock wave", *Ultrasonics International 89 Proceedings*.

- CHAUVET D., MARSAC L., PERNOT M., BOCH A.-L., GUILLEVIN R., SALAMEH N., SOURIS L., DARRASSE L., FINK M., TANTER M. & AUBRY J.-F. (2013), "Targeting accuracy of transcranial magnetic resonance-guided high-intensity focused ultrasound brain therapy: a fresh cadaver model: Laboratory investigation", *Journal of Neurosurgery* 118, 5, pp. 1046-1052.
- CHILOWSKY C. & LANGEVIN P. (1920), « Procédés et appareils pour la production de signaux sous-marins dirigés et pour la localisation à distance d'obstacles sous-marins ».
- CLEMENT G. T. & HYNYNEN K. (2002), "A non-invasive method for focusing ultrasound through the human skull", *Physics in Medicine and Biology* 47, 8, pp. 1219-1236.
- CLINE H. E., SCHENCK J. F., HYNYNEN K., WATKINS R. D., SOUZA S. P. & JOLESZ F. A. (1992), "MR-guided focused ultrasound surgery", *Journal of Computer Assisted Tomography* 16, 6, pp. 956-965.
- COLUCCIA D., FANDINO J., SCHWYZER L., MARTIN E. & WERNER B. (2014), "First noninvasive thermal ablation of a brain tumor with MR-guided focused ultrasound", p. 7.
- CONSTANS C., AHNINE H., SANTIN M., LEHERICY S., TANTER M., POUGET P. & AUBRY J.-F. (2020), "Non-invasive ultrasonic modulation of visual evoked response by GABA delivery through the blood brain barrier", *Journal of Controlled Release: Official Journal of the Controlled Release Society* 318, pp. 223-231.
- CURIE J. & CURIE P. (1880), « Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémiedres à faces inclinées », *Bulletin de Minéralogie* 3, 4, pp. 90-93.
- DEFFIEUX T., YOUNAN Y., WATTIEZ N., TANTER M., POUGET P. & AUBRY J.-F. (2013), "Low-Intensity Focused Ultrasound Modulates Monkey Visuomotor Behavior", *Current Biology* 23, 23, pp. 2430-2433.
- DEMENE C., BARANGER J., BERNAL M., DELANOE C., AUVIN S., BIRAN V., ALISON M., MAIRESSE J., HARRIBAUD E., PERNOT M., TANTER M. & BAUD O. (2017), "Functional ultrasound imaging of brain activity in human newborns", *Science Translational Medicine* 9, 411, p. eaah6756.
- DENIER A. (1951), *Les ultra-sons appliqués à la médecine : l'expansion scientifique française*.
- DIZEUX A., GESNIK M., AHNINE H., BLAIZE K., ARCIZET F., PICAUD S., SAHEL J.-A., DEFFIEUX T., POUGET P. & TANTER M. (2019), "Functional ultrasound imaging of the brain reveals propagation of task-related brain activity in behaving primates", *Nature Communications* 10, 1, p. 1400.
- DUSSIK K. T. (1942), "Über die Möglichkeit, hochfrequente mechanische Schwingungen als diagnostisches Hilfsmittel zu verwerten", *Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie* 174, 1, pp. 153-168.
- EBBINI E. S. & HAAR G. T. (2015), "Ultrasound-guided therapeutic focused ultrasound: Current status and future directions", *International Journal of Hyperthermia* 31, 2, pp. 77-89.
- ELIAS W. J., LIPSMAN N., ONDO W. G., GHANOUNI P., KIM Y. G., LEE W., SCHWARTZ M., HYNYNEN K., LOZANO A. M., SHAH B. B., HUSS D., DALLAPIAZZA R. F., GWINN R., WITT J., RO S., EISENBERG H. M., FISHMAN P. S., GANDHI D., HALPERN C. H., CHUANG R., BUTTS PAULY K., TIERNEY T. S., HAYES M. T., COSGROVE G. R., YAMAGUCHI T., ABE K., TAIRA T. & CHANG J. W. (2016), "A Randomized Trial of Focused Ultrasound Thalamotomy for Essential Tremor", *New England Journal of Medicine* 375, 8, pp. 730-739.
- Focused Ultrasound Foundation (2020), "Focus Feature: 2020 State of the Field Report".
- FOLLONI D., VERHAGEN L., MARS R. B., FOURAGNAN E., CONSTANS C., AUBRY J.-F., RUSHWORTH M. F. S. & SALLET J. (2019), "Manipulation of Subcortical and Deep Cortical Activity in the Primate Brain Using Transcranial Focused Ultrasound Stimulation", *Neuron* 101, 6, pp. 1109-1116.e5.
- FOURAGNAN E. F., CHAU B. K. H., FOLLONI D., KOLLING N., VERHAGEN L., KLEIN-FLÜGGE M., TANKELEVITCH L., PAPAGEORGIOU G. K., AUBRY J.-F., SALLET J. & RUSHWORTH M. F. S. (2019), "The macaque anterior cingulate cortex translates counterfactual choice value into actual behavioral change", *Nature Neuroscience* 22, 5, pp. 797-808.
- French Healthcare (2019), *L'imagerie médicale en France*.
- GELET A., CHAPELON J. Y., BOUVIER R., SOUCHON R., PANGAUD C., ABDELRAHIM A. F., CATHIGNOL D. & DUBERNARD J. M. (1996), "Treatment of prostate cancer with transrectal focused ultrasound: early clinical experience", *European Urology* 29, 2, pp. 174-183.
- GOMBOS E. C., KACHER D. F., FURUSAWA H. & NAMBA K. (2006), "Breast focused ultrasound surgery with magnetic resonance guidance", *Topics in magnetic resonance imaging: TMRI* 17, 3, pp. 181-188.
- HYNYNEN K., MCDANNOLD N., CLEMENT G., JOLESZ F. A., ZADICARIO E., KILLIANY R., MOORE T. & ROSEN D. (2006), "Pre-clinical testing of a phased array ultrasound system for MRI-guided noninvasive surgery of the brain-A primate study", *European Journal of Radiology* 59, 2, pp. 149-156.
- HYNYNEN K., MCDANNOLD N., VYKHODTSEVA N. & JOLESZ F. A. (2001), "Noninvasive MR Imaging-guided Focal Opening of the Blood-Brain Barrier in Rabbits", *Radiology* 220, 3, pp. 640-646.
- KYRIAKOU A., NEUFELD E., WERNER B., PAULIDES M. M., SZEKELY G. & KUSTER N. (2014), "A review of numerical and experimental compensation techniques for skull-induced phase aberrations in transcranial focused ultrasound", *International Journal of Hyperthermia* 30, 1, pp. 36-46.
- Le Monde* (2006), « Quatre géants se disputent le marché de l'imagerie médicale », 1^{er} décembre.
- LIPPMANN G. (1881), « Principe de la conservation de l'électricité, ou second principe de la théorie des phénomènes électriques », *J. Phys. Theor. Appl.* 10, 1, pp. 381-394.
- MACÉ E., MONTALDO G., COHEN I., BAULAC M., FINK M. & TANTER M. (2011), "Functional ultrasound imaging of the brain", *Nature Methods* 8, 8, pp. 662-664.
- MARQUET F., BOCH A.-L., PERNOT M., MONTALDO G., SEILHEAN D., FINK M., TANTER M. & AUBRY J.-F. (2013), "Non-invasive ultrasonic surgery of the brain in non-human primates", *The Journal of the Acoustical Society of America* 134, 2, pp. 1632-1639.
- MARTIN E., JEANMONOD D., MOREL A., ZADICARIO E. & WERNER B. (2009), "High-intensity focused ultrasound for non-invasive functional neurosurgery", *Annals of Neurology* 66, 6, pp. 858-861.
- MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ R., RODRÍGUEZ-ROJAS R., ÁLAMO M. DEL, HERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ F., PINEDA-PARDO J. A., DILEONE M., ALONSO-FRECH F., FOFFANI G., OBESO I., GASCA-SALAS C., LUIS-PASTOR E. DE, VELA L. & OBESO J. A. (2018), "Focused ultrasound subthalamotomy in patients with asymmetric Parkinson's disease: a pilot study", *The Lancet Neurology* 17, 1, pp. 54-63.
- MESSAS E., IJSSELMUIDEN A., GOUDOT G., VLIÉGER S., ZARKA S., PUYMIRAT E., CHOLLEY B., SPAULDING C., HAGÈGE A. A., MARIJON E., TANTER M., BERTRAND B., RÉMOND M. C., PENOT R., REN B., DEN HEIJER P., PERNOT

- M. & SPAARGAREN R. (2021), "Feasibility and Performance of Noninvasive Ultrasound Therapy in Patients With Severe Symptomatic Aortic Valve Stenosis", *Circulation* 143, 9, pp. 968-970.
- MILLER G. W., EAMES M., SNELL J. & AUBRY J.-F. (2015), "Ultrashort echo-time MRI versus CT for skull aberration correction in MR-guided transcranial focused ultrasound: In vitro comparison on human calvaria: UTE-based skull aberration correction for MR-guided HIFU", *Medical Physics* 42, 5, pp. 2223-2233.
- MONTEITH S. J., MEDEL R., KASSELL N. F., WINTERMARK M., EAMES M., SNELL J., ZADICARIO E., GRINFELD J., SHEEHAN J. P. & ELIAS W. J. (2013), "Transcranial magnetic resonance-guided focused ultrasound surgery for trigeminal neuralgia: a cadaveric and laboratory feasibility study: Laboratory investigation", *Journal of Neurosurgery* 118, 2, pp. 319-328.
- OBERMAYER A., AUBRY J.-F. & BARNAT N. (2021), "Extracorporeal Treatment with High Intensity Focused Ultrasound of an Incompetent Perforating Vein in a Patient with Active Venous Ulcers", *EJVES vascular forum* 50, pp. 1-5.
- PERNOT M., AUBRY J.-F., TANTER M., THOMAS J.-L. & FINK M. (2003), "High power transcranial beam steering for ultrasonic brain therapy", *Physics in Medicine and Biology* 48, 16, pp. 2577-2589.
- PERNOT M., AUBRY J.-F., TANTER M., BOCH A.-L., MARQUET F., KUJAS M., SEILHEAN D. & FINK M. (2007), "In vivo transcranial brain surgery with an ultrasonic time reversal mirror", *Journal of Neurosurgery* 106, 6, pp. 1061-1066.
- RABKIN B. A., ZDERIC V. & VAEZY S. (2005), "Hyperecho in ultrasound images of HIFU therapy: involvement of cavitation", *Ultrasound in Medicine & Biology* 31, 7, pp. 947-956.
- ROUVIÈRE O., SOUCHON R., SALOMIR R., GELET A., CHAPELON J.-Y. & LYONNET D. (2007), "Transrectal high-intensity focused ultrasound ablation of prostate cancer: effective treatment requiring accurate imaging", *European Journal of Radiology* 63, 3, pp. 317-327.
- SAPARETO S. A. & DEWEY W. C. (1984), "Thermal dose determination in cancer therapy", *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* 10, 6, pp. 787-800.
- TANTER M. & FINK M. (2014), "Ultrafast imaging in biomedical ultrasound", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 61, 1, pp. 102-119.
- WU F., WANG Z.-B., CHEN W.-Z., WANG W., GUI Y., ZHANG M., ZHENG G., ZHOU Y., XU G., LI M., ZHANG C., YE H. & FENG R. (2004), "Extracorporeal high intensity focused ultrasound ablation in the treatment of 1038 patients with solid carcinomas in China: an overview", *Ultrasonics Sonochemistry* 11, 3-4, pp. 149-154.
- XU Z., CARLSON C., SNELL J., EAMES M., HANANELA., LOPES M. B., RAGHAVAN P., LEE C.-C., YEN C.-P., SCHLESINGER D., KASSELL N., AUBRY J.-F. & SHEEHAN J. (2015), "In vivo low frequency MR-guided thalamotomy with focused ultrasound: thermal vsmechanical lesioning in pig brain", *Journal of Therapeutic Ultrasound* 3, S1, p. P41, 2050-5736-3-S1-P41.

Vie et perspectives, en France, d'une PME de pointe dans le domaine des ultrasons médicaux

Par David CAUMARTIN
Theraclion

Créée en 2004, Theraclion est une PME française innovante dont l'ambition est de développer la plateforme robotique évolutive la plus performante dans le traitement non invasif par ultrasons médicaux, grâce à la technologie de l'échothérapie. Dans cet article, nous revenons sur l'histoire de Theraclion, en insistant sur les péripéties de son développement, notamment en France, et ses perspectives d'évolution.

Introduction

La société Theraclion est issue d'une longue tradition française dans l'étude des ondes ultrasonores et leur application dans le domaine médical. Aujourd'hui, cette société, qui est à la pointe de cette technologie au plan international, développe une plateforme robotique évolutive s'appuyant sur l'échothérapie pour le traitement non invasif de plusieurs pathologies.

Le champ des ultrasons médicaux s'inscrit d'emblée dans le cadre d'une compétition internationale de plus en plus active, notamment de la part des États-Unis, de la Corée et de la Chine. Les PME du secteur de la santé bénéficient en France de la qualité de la recherche publique – leur terreau de base – et d'un bon système de financement des *start-ups*. En revanche, au-delà de l'étape *start-up*, elles y sont confrontées non seulement aux limites du financement en capital que rencontrent la plupart des PME non numériques françaises par rapport à leurs homologues par exemple américaines, mais aussi aux contraintes liées aux procédures d'accès au marché français, aux essais cliniques ou à la valorisation de l'innovation. Entreprise française ayant fait le choix de fabriquer ses dispositifs en France, notre entreprise a néanmoins dû, pour privilégier son développement, s'implanter jusqu'ici dans d'autres pays, comme l'Allemagne ou l'Autriche, notamment pour ses évaluations cliniques et son activité Recherche et développement.

L'histoire des ultrasons médicaux

L'échothérapie est une technique d'intervention complètement non invasive qui a fait ses preuves en termes d'efficacité dans le traitement des nodules thyroïdiens et des fibroadénomes du sein. Depuis trois ans, Theraclion s'est focalisée sur le traitement des varices par ultrasons, une

technique qui permet d'éviter toute chirurgie et peut être pratiquée en cabinet de ville.

Les techniques de diagnostic avec ultrasons originellement françaises

Les applications des ultrasons dans le diagnostic médical sont bien connues, notamment au travers des techniques d'échographie.

Le diagnostic par échographie concerne non seulement l'ensemble des organes, mais aussi les vaisseaux (artères et veines), les ligaments et le cœur. L'échographie est par ailleurs utilisée pour guider les prélèvements en profondeur.

Dans les années 1970-1980, Léandre Pourcelot, secrétaire général, puis président de la Société française pour l'application des ultrasons en médecine et biologie dont il est un des fondateurs, s'affirme comme un pionnier des techniques d'imagerie employant des ultrasons. Il a notamment mené les travaux conduisant au développement et à l'utilisation de l'échographie Doppler dans l'évaluation du débit sanguin et de la résistance vasculaire. En parallèle de ses activités d'ingénieur et de médecin, Léandre Pourcelot crée et développe plusieurs entreprises : Delalande Électronique, Vermon SA, Ultrasons Technologies, toutes spécialisées dans la production d'appareils électroniques à ultrasons⁽¹⁾. Ces technologies ont été développées avec des acteurs de l'imagerie qui ont été intégrés par la suite à GE Healthcare ou Philips.

C'est ainsi que naît la tradition française du développement d'entreprises technologiques innovantes s'appuyant

(1) <https://histoire.inserm.fr/les-femmes-et-les-hommes/leandre-pourcelot>

sur les ultrasons médicaux. Parmi les champions français de cette innovation reposant sur les ultrasons, on peut citer Echosens (hépatologie), Supersonic Imaging (imagerie générale), EDAP (urologie), EyeTechCare (ophtalmologie), Carthera (Neurologie) ou encore Cardiawave (cardiologie) ; des sociétés qui développent des solutions très innovantes élargissant le spectre de l'application des ultrasons en matière de diagnostic ou de traitement.

Les ultrasons thérapeutiques, une optimisation des techniques qui a conduit à la création de Theraclion

Le concept d'une utilisation thérapeutique des ultrasons remonte à plus d'un siècle. Paul Langevin est le premier à constater que la main, placée dans un faisceau d'ultrasons de 1 kW, ressentait une vive douleur, semblable à une brûlure. Les ultrasons thérapeutiques utilisent en effet des ondes de haute intensité, qui sont délivrées en continu en un point précis du tissu. Les HIFU (High Intensity Focused Ultrasound) engendrent un échauffement thermique et des modifications locales des tissus visés. Elles peuvent ainsi permettre des destructions tissulaires ciblées par l'utilisation avec précision et sur un temps d'émission très court de la très haute énergie qu'elles dégagent. L'interaction entre la physique et la biologie participe à l'effet thérapeutique recherché. Selon les tissus, on assiste à une création de bulles de gaz, à une nécrose ou à une coagulation qui vont détruire des lésions bénignes ou malignes, comme des tumeurs, des calcifications, des calculs, des nodules, des adénomes, des varices...

Historiquement, ce principe physique a été utilisé par plusieurs équipes dans le cadre de travaux sur le cerveau, le muscle ou l'œil. En 1990 et 1991, Ter Haar ⁽²⁾ et Chapelon ⁽³⁾ montrent que des tissus peuvent être détruits par l'application focalisée d'ultrasons. L'action destructrice des ultrasons peut être utilisée comme un outil chirurgical ; des sondes fines spécifiques, mono ou multi-éléments, permettant de focaliser les ultrasons ⁽⁴⁾.

Sont ainsi posés les fondements d'une chirurgie non invasive par utilisation des ultrasons focalisés de haute intensité. Ils ouvrent la voie à des indications potentielles multidisciplinaires.

En urologie, la lithotritie extracorporelle permet de détruire des calculs rénaux ou biliaires par des chocs d'ondes produits à intervalles réguliers. Les calculs se désagrègent progressivement et les fragments sont éliminés par les voies naturelles. Par extension, les HIFU ont été utilisés en urologie pour traiter des lésions rénales, vésicales ou prostatiques, ou des organes génitaux externes.

C'est à partir de cette pratique que François Lacoste et Jérôme Lebon créent Theraclion. Forts du succès en urologie de la chirurgie non invasive utilisant des ultrasons, ils veulent développer une solution extracorporelle en collaboration avec Olivier Esnault, chirurgien Tête et cou à l'hôpital Saint-Louis. Ils souhaitent proposer en matière de traitement des cancers de la face et du cou une seconde chance par le biais d'une intervention non invasive. Dans ces pathologies, on n'a généralement le droit qu'à un seul geste chirurgical avant d'affecter irréversiblement une apparence ou une fonctionnalité du corps humain.

Des premiers pas de Theraclion à la reconnaissance de l'intérêt des ultrasons dans le traitement des varices

La mise au point d'une méthode extracorporelle permettant une chirurgie totalement non invasive sur des cibles peu profondes s'appuie sur cette forte tradition de recherche et de développement technologique. À sa création, Theraclion procède en interne au développement et à la vérification technique et médicale de sa plateforme grâce au soutien de fonds d'investissement et de plusieurs fonds d'amorçage.

Tous les procédés développés s'appuient sur un repérage de l'organe et de la zone focale, une application de l'énergie extracorporelle, un couplage des données physiques (temps de traitement, durée d'impulsion, longueur d'onde, intensité, etc.). Tous ces procédés ont pour finalité une destruction au moins partielle de la lésion de l'organe. Les qualités déterminantes sont la fiabilité technique, la rapidité de la procédure, la qualité du guidage et de l'image et, enfin, la précision de l'application des HIFU sur la cible définie.

L'échothérapie est née. Elle évite de réaliser des incisions et d'intervenir sur les patients en milieu stérile ou au bloc opératoire, car les ultrasons traversent la peau sans l'endommager. Il n'est en outre pas nécessaire de subir une anesthésie générale, ce qui permet une récupération rapide du malade et lui permet le plus souvent un retour immédiat à ses activités habituelles.

La commercialisation des produits d'échothérapie débute en 2013 pour le traitement du fibroadénome du sein – une maladie bénigne qui a permis d'appliquer cette technologie en toute sécurité et en profondeur. En 2015, les efforts se concentrent sur les tumeurs thyroïdiennes en combinant les ultrasons thérapeutiques et un faisceau d'ultrasons standard en imagerie pour contrôler la précision de la procédure ⁽⁵⁾. Le traitement ne laisse aucune cicatrice, maintient la fonction thyroïdienne ⁽⁶⁾ et préserve l'intégrité du tissu mammaire ⁽⁷⁾. L'ECHOPULSE® permet de traiter des lésions jusqu'à une profondeur allant de 0,5 à 3 cm, ce qui fait de Theraclion le seul expert du traitement extracorporel des lésions superficielles dans un environnement anatomique complexe.

(2) TER HAAR G., SINNETT D. & RIVENS I. (1989), "High intensity focused ultrasound – A surgical technique for the treatment of discrete liver tumours", *Phys. Med. Biol.* 34, pp. 1743-1750.

(3) CHAPELON J., MARGONARI J., BOUVIER R., CATHIGNOL D., GORRY F. & GELET A. (1991), « Ablation tissulaire par ultrasons focalisés (ATUF). Tissue ablation by focused ultrasound », *Progrès en Urologie* 1, pp. 231-243.

(4) <https://www.urofrance.org/base-bibliographique/les-ultrasons-focalises-de-haute-intensite-ufhi-en-urologie>

(5) ECHOPULSE®.

(6) LANG B., "2 year efficacy of single-session HIFU ablation of benign thyroid nodules", *European Society of Radiology*, 2018.

(7) KOVATCHEVA R. (2017), "Long-term efficacy of ultrasound guided HIFU treatment of fibroadenoma", *J Ther Ultrasound* 5.1.



Photo©Theraclion

SONOVEIN®, la solution de traitement des varices.

Puis, en deux ans à peine, à l'initiative de Michel Nuta, directeur médical (expert dans le traitement endo-veineux des varices), Theraclion délivre en 2019 la première solution non invasive au monde de traitement des varices – une maladie chronique qui génère 5 millions d'interventions chirurgicales par an exigeant un champ stérile ou une salle d'opération.

En 2020, Theraclion franchit une étape cruciale pour sa technologie permettant une nouvelle expansion

Le traitement des varices représente un marché de 10 milliards de dollars par an dans le monde. L'échothérapie a pour ambition de poursuivre la transformation de ce marché initialement exclusivement chirurgical en un marché reposant sur des procédures moins invasives (endo-vasculaires thermiques radiofréquence, micro-ondes, laser).

En 2020, la nouvelle version de son dispositif SONOVEIN® a passé le cap de l'essai clinique et a obtenu le marquage CE. Ce traitement non chirurgical est désormais d'une mise en œuvre deux à trois fois plus rapide. Il a permis de traiter avec succès des patients complexes. Aujourd'hui proposé dans la pratique clinique de centres d'excellence au niveau international, il devrait progressivement devenir le traitement de référence pour les patients souffrant d'insuffisance veineuse chronique.

Theraclion a ainsi créé une plateforme HIFU qui pourrait permettre aux médecins de traiter un très grand nombre

de cibles superficielles. Ainsi, des femmes atteintes d'un cancer du sein à un stade avancé ont été les premières à être traitées par une combinaison d'échothérapie et d'immunothérapie lors d'un essai clinique réalisé aux États-Unis dans l'hôpital universitaire de Virginie (UVA).

En 2021, Theraclion prévoit de poursuivre l'extension de son procédé par le biais de médecins spécialistes à de nouveaux territoires, principalement dans les grands pays européens ainsi qu'en Asie. Nous allons engager des démarches réglementaires auprès de la Food and Drug Administration (FDA) en vue de nous ouvrir l'accès au marché américain.

La complexité de la France pour le développement d'une PME des ultrasons

La France ne réunit pas toutes les conditions pour la réussite d'une entreprise innovante en santé. Les PME du secteur de la santé bénéficient certes de la qualité de la recherche publique, fondement *sine qua non* des innovations, et d'un bon système de financement des *start-ups*. En revanche, au-delà de cette première étape, elles se heurtent non seulement aux limites du financement en capital que rencontrent la plupart des PME non numériques par rapport, par exemple, à leurs homologues américaines, mais aussi aux contraintes, plus spécifiques à la France, liées aux procédures d'accès au marché français,

aux essais cliniques ou à la valorisation de l'innovation. Ainsi, plus de 80 % des PME et des *start-ups* françaises du secteur des dispositifs médicaux ne disposent pas d'une trésorerie suffisante pour tenir au-delà de douze mois. Il n'y a pas ou peu de fonds permettant leur montée en puissance et la commercialisation de leurs produits de l'obtention du marquage CE jusqu'à l'atteinte de la rentabilité. Les innovations en santé ne bénéficient pas aujourd'hui encore de remboursements avant l'expiration d'une très longue et complexe période probatoire : les produits sont donc d'abord testés et diffusés à l'étranger⁽⁸⁾, et les PME comme Theraclion ne disposent pas d'une puissance financière suffisante pour pouvoir accélérer leur *go-to-market*, à savoir la constitution d'un réseau de distribution et l'obtention de remboursements.

En 2018, Theraclion a obtenu un Forfait innovation qui a contribué au financement partiel d'une étude technico-économique visant à démontrer que le traitement des fibroadénomes du sein par échothérapie est moins coûteux et aussi efficace que la chirurgie. Cette étude s'est révélée trop complexe à réaliser pour une petite société comme la nôtre ; Theraclion a donc dû renoncer et ne conduit plus à ce jour d'essai clinique en France.

Cet exemple n'est pas un cas isolé : une étude de France Biotech montre que 80 % des études menées par ses adhérents le sont à l'étranger. Le fait de ne pas voir des essais cliniques réalisés en France ne génère pas seulement un manque à gagner, c'est aussi une diminution de la capacité d'innovation de notre pays et une fuite de nos cerveaux et de nos entreprises.

Ainsi, Theraclion a choisi l'Autriche pour réaliser ses études cliniques relatives au traitement des varices. Elle y a trouvé une plus grande efficacité au plan procédural et des experts de niveau international. L'expertise médicale et le support administratif sont les piliers du succès d'une telle innovation en facilitant la mise au point de la technologie considérée en environnement de vie réelle. Ainsi, cet

(8) Par exemple, en Allemagne, dont le dispositif régionalisé réunit médecin, caisse et assureur pour décider du remboursement d'essais cliniques, ce qui permet de commencer à se faire connaître et de produire des résultats permettant d'obtenir l'autorisation de remboursement généralisé.

essai réussi de notre traitement sur les varices a permis à Theraclion de poursuivre son développement.

Par ailleurs, la compétence clinique acquise au travers d'essais combinant des ultrasons focalisés et différentes molécules utilisées en immuno-oncologie ne se trouve plus en France. Elle se développe en revanche aux États-Unis avec des essais cliniques en cours pour le traitement de cancers du sein métastatiques en combinaison avec l'immunothérapie. La FDA a répondu en moins d'un mois favorablement à notre dernier IDE⁽⁹⁾ combinant HIFU et immuno-oncologie. Le cahier des charges imposé est précis et a exigé de mobiliser rapidement les compétences nécessaires : un consultant spécialiste de la chirurgie du sein, trois chirurgiens en provenance de trois universités, des statisticiens et des spécialistes mondiaux des ultrasons focalisés. L'essai clinique portant sur 150 patientes est en passe de s'achever. Le traitement des tumeurs par ultrasons se poursuit sous la houlette de l'Université de Virginie, avec un savoir-faire transféré aux États-Unis.

En France, l'exigence d'un essai randomisé⁽¹⁰⁾ pour valider une technologie de rupture a fait fuir les praticiens et rendu difficile le recrutement de patients. Pour l'évaluation, comme il est difficile de trouver des experts pointus sans conflits ni liens d'intérêt dans des domaines aussi précis, il n'avait pas été possible de rassembler des personnes compétentes en matière d'ultrasons. Plusieurs administrations centrales sont impliquées et le processus administratif induit est très difficile à gérer par une entreprise de petite taille. Le récent décret du 23 février⁽¹¹⁾, visant à permettre un accès précoce aux dispositifs médicaux innovants, pourrait améliorer les choses en la matière. Mais il faudrait de surcroît simplifier plus encore les processus pour permettre aux patients de bénéficier des technologies innovantes et aux PME de se développer en France.

(9) Investissements directs à l'étranger.

(10) Un essai randomisé est un essai où les patients sont tirés au sort pour distinguer les résultats entre une solution innovante et une solution existante, ce qui dans le cas d'une innovation de rupture est compliqué ou impossible. Il est souvent impossible d'avoir des *end-points* communs pertinents ; les patients vont refuser une technique plus invasive, ou bien encore, le comparateur peut ne pas être recommandé pour tous les types de patients.

(11) Article L. 165-1-5 du Code de la sécurité sociale.

Les ondes électromagnétiques en médecine : le cas des ondes millimétriques

Par Morgane LEBOSQ et Yves LE DRÉAN

Université de Rennes, Inserm, EHESP, Irset (Institut de recherche en santé, environnement et travail) – UMR S 1085

L'idée d'utiliser les ondes électromagnétiques pour soigner est aussi ancienne que leur découverte. Mis à part la radiothérapie utilisant les rayonnements ionisants pour soigner les cancers, ces pistes de travail sont souvent restées marginales ; et la médecine occidentale s'est plutôt spécialisée dans l'emploi de drogues et de produits pharmacologiques. Depuis quelques décennies, le besoin de développer des méthodes alternatives a remis ces voies de recherche sur le devant de la scène et un certain nombre de pratiques sont maintenant utilisées dans le monde entier. Dans un premier temps, nous donnerons un aperçu des nombreuses applications qui jouent déjà un rôle clinique. Dans un second temps, nous présenterons le cas des ondes millimétriques, dont les applications médicales ont été développées de façon empirique dans les années 1970 en Europe de l'Est. Enfin, nous présenterons spécifiquement l'impact de ces ondes sur la sensation de douleur, un domaine qui a été étudié plus en détail par les scientifiques.

L'emploi des champs électromagnétiques en médecine

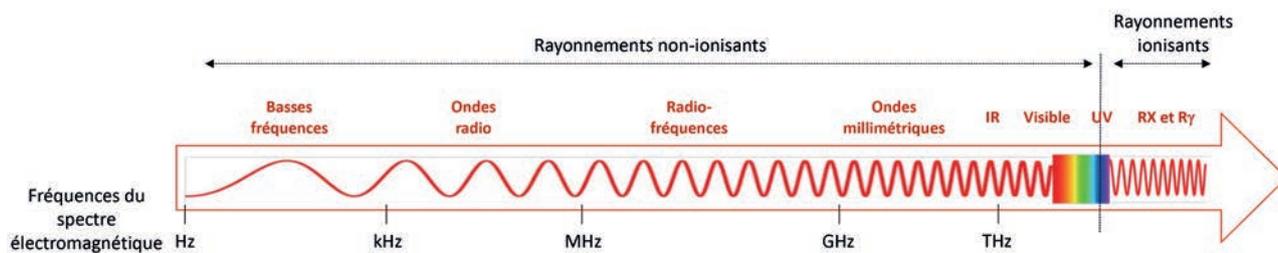
Le spectre électromagnétique est large et va du champ statique à la lumière, et même au-delà avec les UV et les rayonnements ionisants (voir la figure de la page suivante).

Bien qu'il existe des applications médicales dans le domaine du visible et des rayonnements ionisants (la plus connue étant la radiothérapie pour soigner les cancers), nous nous concentrerons dans cet article sur les applications médicales utilisant des fréquences inférieures à celles du spectre visible. Nous nous focaliserons ainsi sur des applications sans doute moins connues du grand public, mais qui peuvent être appelées à se développer (pour une revue de celles-ci, voir Mattsson et Simkó, 2019). Dans la gamme de fréquences allant de 0 Hz à 380 THz (début du visible), il existe deux grands champs d'applications possibles : l'utilisation des ondes à des fins de diagnostic, que nous ne verrons pas ici ; et l'utilisation des ondes à des fins thérapeutiques, que nous présenterons succinctement.

La stimulation magnétique transcrânienne permet d'exciter certaines régions du cortex cérébral. Cette technique est non invasive, car elle utilise des bobines externes placées contre le crâne. Le champ magnétique produit par ces bobines (champs statique, variable ou pulsé suivant

les protocoles) induit un champ électrique interne, pouvant aller jusqu'à une dépolarisation neuronale. Le but étant d'activer ou d'inhiber certaines régions cérébrales, en fonction du mode de stimulation choisi. Cette neuromodulation répétée aura un impact thérapeutique dans un grand nombre de maladies où le système nerveux central joue un rôle majeur. Aussi, cette technique a suscité une attention particulière de la part des neurologues, des psychiatres et des neuroscientifiques. Les applications majeures de cette thérapie se sont étendues au traitement de la dépression, de l'épilepsie et de certains troubles psychiatriques, ainsi qu'à la lutte contre la douleur et les addictions, et s'ajoute aux soins délivrés après des accidents vasculaires cérébraux. Ce traitement présente l'avantage d'être bien toléré par les patients, et présente très peu d'effets secondaires, l'effet indésirable le plus sérieux étant la survenue de crises d'épilepsie.

Les champs magnétiques d'extrême basse fréquence (de quelques dizaines à quelques centaines de Hz) sont, quant à eux, utilisés dans la guérison de plaies, en particulier pour la réparation des fractures osseuses. En général, ces champs sont appliqués sous forme de pulses. Les mécanismes d'action ne sont pas clairs, et plusieurs hypothèses tournant autour d'une éventuelle polarisation électrique ou d'une modification des flux calciques cellulaires ont été avancées. Cependant, des résultats intéressants ont été obtenus par de nombreuses équipes in-



Le spectre électromagnétique se caractérise par les oscillations des champs magnétique et électrique. Les fréquences sont définies en fonction du nombre d'oscillations par seconde (dont l'unité est le Hertz). En-deçà du visible, les fréquences vont de quelques unités à quelques milliers (kHz), millions (MHz), milliards (GHz) et milliers de milliards (THz) de Hertz.

dépendantes et, aux États-Unis, la FDA (Food and Drug Administration) a approuvé ce traitement pour soigner les fractures non consolidées, en particulier celles qui présentent des retards de régénération après recours à des méthodes conventionnelles.

Parmi les propriétés des ondes électromagnétiques non ionisantes, les effets thermiques peuvent présenter un fort intérêt pour des protocoles thérapeutiques. Dans le domaine des radiofréquences, l'oscillation du champ électrique peut induire la rotation des molécules d'eau libres, ce qui occasionne des frictions moléculaires et donc un dégagement de chaleur. Cette élévation de la température peut dépasser les niveaux physiologiques (on parle alors d'hyperthermie) et, suivant les conditions, elle peut même être suffisamment élevée pour induire une mort cellulaire. Si la région cancéreuse n'est pas trop grande, on peut ainsi provoquer la coagulation et la nécrose des tissus tumoraux, ce qui correspond à une ablation de la tumeur (Rao *et al.*, 2010). Plusieurs protocoles existent, mais, en général, l'ablation par radiofréquences nécessite d'introduire une électrode en forme d'aiguille dans la tumeur. Des alternatives moins invasives existent ; des techniques ont ainsi été mises au point, où les sondes insérées dans la tumeur peuvent être supprimées grâce à l'emploi de nanoparticules métalliques. Ces nanoparticules sont administrées localement et leur présence au niveau de la tumeur permet un chauffage par effet joule, via l'application d'un champ électromagnétique externe de type radiofréquences (Rejinold *et al.*, 2015). L'ablation par radiofréquences est généralement considérée comme un traitement de choix pour les patients ayant des tumeurs difficilement opérables, ou ne répondant pas à une radiothérapie classique.

L'ablation par hyperthermie n'est pas la seule approche utilisant des fréquences du spectre électromagnétique pour lutter contre le cancer. Parmi celles-ci, on peut aussi citer l'électroporation. Le but de cette technique est d'utiliser des pulses de forte intensité de champ électrique afin de perforer les membranes cellulaires (Breton et Mir, 2012). Deux principales stratégies sont possibles :

- la formation de pores dans les membranes, lesquels peuvent servir pour administrer des médicaments anticancéreux qui pris isolément pénètrent difficilement dans les cellules (en France, Mir et son équipe ont été les premiers à combiner ces impulsions électriques perméabilisantes avec la bléomycine, une toxine utilisée en

chimiothérapie qui a la capacité de tuer sélectivement les cellules en division, sans nuire aux tissus environnants normaux) ;

- en modifiant les paramètres de pulses, on peut réaliser une électroporation irréversible qui provoque une perméabilisation permanente des cellules, entraînant leur mort.

D'autres applications thérapeutiques sont en développement. Des essais sont effectués dans certains laboratoires pour explorer l'impact des champs électromagnétiques pulsés sur le système immunitaire. Dans un domaine non médical, les effets thermiques des radiofréquences peuvent être aussi recherchés dans un but purement esthétique, puisque des appareils utilisant ces ondes sont maintenant disponibles pour réaliser des épilations ou des lipolyses.

Le cas des ondes millimétriques

L'utilisation des ondes millimétriques dans le domaine médical n'est pas nouvelle, puisqu'elle était utilisée dans les années 1970 en ex-URSS. Ces applications étaient utilisées de manière empirique pour plus de cinquante pathologies, telles que le traitement de maladies de peau, de maladies gastro-intestinales, cardiovasculaires ou psychiques, de cicatrices ou encore de cancers (Pakhomov *et al.*, 1998 ; Rojavi et Ziskin, 1998). Plus de 3 millions de patients ont été traités en recourant à cette thérapie avec une efficacité de traitement se situant entre 60 et 95 % selon la maladie (Betski, 2000). Malgré ce succès apparent, ces thérapies n'ont pas été utilisées en Occident. Il faut dire que les études réalisées à l'époque sont rédigées pour une grande majorité d'entre elles en russe, sans traductions existantes, et qu'elles ne sont pas en outre facilement accessibles. Les changements géopolitiques induits par la chute du mur de Berlin ont permis de meilleures communications entre scientifiques de l'Est et ceux de l'Ouest, et ces échanges ont remis en avant les effets des ondes millimétriques sur le vivant. Ce n'est qu'en 1988 que Pakhomov et son équipe réalisèrent une revue détaillée des publications russes consacrées à ce sujet (Pakhomov *et al.*, 1998). À cela s'ajoutent le manque d'explications au niveau du mécanisme biologique et le peu d'essais cliniques contrôlés en double aveugle, qui n'ont d'ailleurs pas convaincu les chercheurs et les médecins occidentaux. La diversité des pathologies pouvant être soignées par des expositions aux ondes millimétriques laisse songeur, et n'a

pas favorisé la crédibilité de ce traitement. Néanmoins parmi cette pléiade d'effets, l'effet analgésique peut être sorti du lot, car il est relié à une littérature scientifique de qualité, qui met en avant des effets qui, s'ils semblent réels, sont encore mal caractérisés.

La thérapie utilisant les ondes millimétriques est une technique non invasive qui consiste en une exposition locale de la région douloureuse pendant 15 à 30 minutes, en utilisant trois principales fréquences se situant autour de 42,2, 53,6 et 61,2 GHz. Les puissances utilisées sont assez faibles, à la limite des effets thermiques, c'est-à-dire aux alentours de 10 mW/cm². Ce traitement a été décrit comme efficace dès les premières séances. Il peut raccourcir d'un facteur 1,5 à 2 le processus de guérison. L'exposition à ces puissances n'entraîne que de très faibles effets secondaires, et lors des essais cliniques n'ont été rapportés que de légers maux de tête, des variations transitoires de la pression artérielle, des éruptions prurigineuses locales au niveau du site d'exposition ou une légère augmentation de la température corporelle (Rojavin et Ziskin, 1998). À la fin des années 1990 et au début des années 2000, l'équipe de Ziskin, aux États-Unis, s'est intéressée aux mécanismes sous-jacents aux effets analgésiques. Ils ont vérifié la véracité et la reproductibilité de ces effets, à la fois chez des modèles animaux (Rojavin *et al.*, 2000 ; Radvieski *et al.*, 2001) et chez l'humain (Radzievsky *et al.*, 1999). D'autres équipes ont mené des études cliniques en double aveugle, confirmant les effets antidouleur (Usichenko *et al.*, 2003), même si un effet placebo ne peut pas être encore totalement écarté (Partyla *et al.*, 2017). En utilisant des paramètres d'exposition se calquant sur les conditions empiriques utilisées en ex-URSS, l'équipe de Ziskin a démontré que les effets hypoalgésiques optimaux sont obtenus avec des fréquences se situant aux alentours de 60 GHz et pour des densités de puissance d'incidence comprises entre 5 et 15 mW/cm², ce qui induit une légère augmentation de la température à la surface de la peau (de 1,5 à 3°C), sans endommager les tissus (Ziskin, 2006 ; Radzievsky *et al.*, 2008). L'effet analgésique dépend de la puissance : ainsi, il n'est pas observé pour des densités de puissance inférieures à 0,5 mW/cm², lesquelles ne génèrent pas de chaleur (Rojavin *et al.*, 2000). Une augmentation de la température semble donc nécessaire pour induire l'effet analgésique, mais elle ne constitue pas la seule composante : il a ainsi été constaté que cette augmentation obtenue par un chauffage *via* un rayon laser est sans effet (Radzievsky *et al.*, 2004a). Cette observation laisse penser que le pouvoir pénétrant des ondes millimétriques, bien que limité, est sans doute primordial. L'utilisation d'une fréquence précise se situant autour de 60 GHz permet sans doute de faire pénétrer l'énergie thermique à la bonne profondeur dans la peau, permettant ainsi l'activation de cibles cellulaires, et cela sans générer d'excès de chaleur et donc sans douleur.

Le mécanisme précis impliqué dans la suppression de la douleur sous l'effet des ondes millimétriques est encore mal défini, mais plusieurs hypothèses sont émises. Vu que les ondes millimétriques à 60 GHz ne pénètrent que très peu dans l'organisme (à moins d'un millimètre), elles sont

principalement absorbées par la peau. La peau n'est pas isolée du reste de l'organisme et une activation à ce niveau peut générer un signal, soit *via* la libération de molécules dans la circulation sanguine, soit *via* l'activation du système nerveux périphérique. Des études menées chez l'animal ont montré que ce système nerveux périphérique comme le système nerveux central pourraient être impliqués (Radzievsky *et al.*, 2001 et 2008). Ces travaux montrent que le traitement hypoalgésique est plus efficace s'il est appliqué sur des régions du corps possédant une concentration plus élevée en terminaisons nerveuses. Par ailleurs, la dénervation de ces zones diminue l'efficacité du traitement (Lysenyuk *et al.*, 2000). De plus, l'utilisation de naloxone, un antagoniste non sélectif des récepteurs opioïdes, supprime l'action antidouleur (Radzievsky *et al.*, 2004b). Ainsi, un des mécanismes possibles est la transduction neuronale du signal *via* la stimulation des terminaisons nerveuses libres. Le signal serait ensuite transmis jusqu'au système nerveux central, ce qui aurait comme conséquence de moduler la sécrétion d'opioïdes endogènes qui serait à l'origine des effets analgésiques (Radzievsky *et al.*, 2008). Ce mécanisme est plausible. Cependant, de nombreuses interrogations restent encore en suspens : quels sont exactement la ou les cellules cibles au niveau de la peau ? Quel est le senseur ? Quels opioïdes sont impliqués ? Quelle(s) zone(s) du cerveau est(sont) stimulée(s) et quelle est l'ampleur de la réponse dans cet organe ? Des investigations supplémentaires restent clairement nécessaires pour élucider les mécanismes impliqués. Néanmoins, l'utilisation de cette thérapie est relancée en France, au travers des nouveaux tests cliniques en cours.

Conclusion

Les traitements médicaux employant des champs électromagnétiques non ionisants sont nombreux et variés. Cependant, ils ne sont pas encore très largement utilisés et, en général, ils ne remplacent pas les méthodes conventionnelles qui sont souvent appliquées en priorité. À l'heure actuelle, l'usage des ondes est plutôt vu comme une méthode alternative ou complémentaire, quand justement les traitements conventionnels posent problème ou s'avèrent inefficaces. Néanmoins, de grand progrès ont été réalisés ces dernières années et le recours à ces alternatives commence à entrer dans les mœurs. Le principal frein à l'acceptation de ces méthodes a souvent été le manque d'explications scientifiques permettant de comprendre les effets de ces champs électromagnétiques. Certains mécanismes commencent à émerger, même si tout n'a pas encore été éclairci. On peut gager que les mises au point empiriques permettront de gagner en efficacité et que la découverte des mécanismes cellulaires et physiologiques sous-jacents rendra possible de nouvelles améliorations.

Cela demandera toutefois du temps, car les sources de financement de ce type de recherches sont rares, tout comme sont peu nombreuses les équipes s'intéressant à ces problématiques. Ce fait est certainement inhérent au système actuel du financement de la recherche, où la forte compétition dans la recherche de fonds ne favorise pas

les projets encore exploratoires dont les résultats ne sont pas garantis. Il faudra donc attendre que les évidences s'accumulent, avant que ces techniques marginales convainquent financeurs et futurs utilisateurs.

Références

- BETSKII O. V., DEVYATKOV N. D. & KISLOV V. V. (2000), "Low-intensity Millimeter Waves in Biology and Medicine", *Crit Rev Biomed Eng.*, n°28, pp. 247-268.
- BRETON M. & MIR L. M. (2012), "Microsecond and nanosecond electric pulses in cancer treatments", *Bioelectromagnetics*, n°33, pp. 106-123.
- MATTSSON M.-O. & SIMKO M. (2019), "Emerging medical applications based on non-ionizing electromagnetic fields from 0 Hz to 10 THz", *Medical Devices: Evidence and Research*, n°12, pp. 347-368.
- PAKHOMOV A. G., AKYEL Y., PAKHOMOVA O. N., STUCK B. E. & MURPHY M. R. (1998), "Current State and Implications of Research on Biological Effects of Millimeter Waves: A Review of the Literature", *Bioelectromagnetics*, n°19, pp. 393-413.
- PARTYLA T., HACKER H., EDINGER H., LEUTZOW B., LANGE J. & USHOCHENKO T. (2017), "Remote Effects of Electromagnetic Millimeter Waves on Experimentally Induced Cold Pain: A Double Blinded Crossover Investigation in Healthy Volunteers", *Anesth. Analg.*, vol. 124, n°3, pp. 980-985.
- RADZIEVSKI A., ROJAVIN M. A. & ZISKIN M. C. (1999), "Suppression of pain sensation caused by millimeter waves: a double blind, crossover, prospective human volunteer study", *Anesthesia and Analgesia*, n°88, p. 836.
- RADZIEVSKY A. A., ROJAVIN M. A., COWAN J., ALEKSEEV S. I., RADZIEVSKY A. A. Jr. & ZISKIN M. C. (2001), "Peripheral neural system involvement in hypoalgesic effect of electromagnetic millimeter waves", *Life Sciences*, n°68, pp. 1143-1151.
- RADZIEVSKY A. A., GORDIJENKO O. V., COWAN A., ALEKSEEV S. I. & ZISKIN M. C. (2004a), "Millimeter wave induced hypoalgesia in mice: Dependence on type of experimental pain", *IEEE Trans Plasma Sci*, n°32, pp. 1634-1643.
- RADZIEVSKY A. A., GORDIJENKO O. V., SZABO I., ALEKSEEV S. I. & ZISKIN M. C. (2004b), "Millimeter Wave-Induced Suppression of B16F10 Melanoma Growth in Mice: Involvement of Endogenous Opioids", *Bioelectromagnetics*, n°25, pp. 466-473.
- RADZIEVSKY A. A., GORDIJENKO O. V., ALEKSEEV S. I., SZABO I., COWAN A. & ZISKIN M. C. (2008), "Electromagnetic millimeter wave induced hypoalgesia: frequency dependence and involvement of endogenous opioids", *Bioelectromagnetics*, n°29, pp. 284-295.
- RAO W., DENG Z.-S. & LIU J. (2010), "A review of hyperthermia combined with radiotherapy/chemotherapy on malignant tumors", *Crit Rev Biomed Eng.*, n°38(1), pp. 101-116.
- REJINOLD N. S., JAYAKUMAR R. & KIM Y.-C. (2015), "Radiofrequency responsive nano-biomaterials for cancer therapy", *J Control Release*, n°204, pp. 85-97.
- ROJAVIN M. A. & ZISKIN M. C. (1998), "Medical application of millimeter waves", *Q. J. Med.*, n°91, pp. 57-66.
- ROJAVIN M. A., RADZIEVSKY A. A., COWAN A. & ZISKIN M. C. (2000), "Pain relief caused by millimeter waves in mice: results of cold water tail flick tests", *Int. J. Radiat. Biol.*, n°76, pp. 575-579.
- USICHENKO T. I., IVASHKIVSKY O. & GIZHKO G. (2003), "Treatment of rheumatoid arthritis with electromagnetic millimeter waves applied to acupuncture points-a randomized double blind clinical study", *Acupunct. Electrother. Res.*, vol. 28, n°1-2, pp. 11-18.
- ZISKIN M. C. (2006), "Physiological mechanisms underlying millimeter wave therapy", *Bioelectromagnetics Current Concepts*, pp. 241-251.
- ZISKIN M. C. (2013), "Millimeter waves: Acoustic and electromagnetic", *Bioelectromagnetics*, n°34, pp. 3-14.

La sonochimie, un domaine d'innovation sous-exploité ?

Par Dr Grégory CHATEL

Chimiste, Laboratoire EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc/CNRS

La sonochimie, ou l'utilisation des ultrasons de puissance pour des applications en chimie, est fondée sur les effets physico-chimiques engendrés par la cavitation acoustique. Cette technologie de rupture fait l'objet de recherches académiques qui ont démontré récemment de nouvelles efficacités et réactivités, ainsi que des apports en termes de chimie verte, dans différentes applications en matière de chimie organique, de catalyse, de matériaux, de polymères, d'extraction ou encore de remédiation environnementale. La démonstration de procédés sonochimiques innovants à grande échelle permettrait de montrer le potentiel, peut-être sous-exploité, de la sonochimie pour l'industrie.

Afin de répondre aux nouveaux défis auxquels est confrontée l'industrie, d'augmenter la productivité ou encore d'innover pour faire émerger de nouveaux procédés, la chimie fait de plus en plus appel à des méthodes *d'activation non-conventionnelle* ou des *technologies dites de rupture*, en opposition à des méthodes plus classiques qui font intervenir le chauffage et l'agitation mécanique. Ces méthodes physiques, qui utilisent les ultrasons, les micro-ondes, le plasma froid, le broyage réactif, les fluides supercritiques ou d'autres technologies avancées, sont de plus en plus étudiées et utilisées pour leurs effets physiques et chimiques, permettant l'activation de synthèses chimiques ou de préparations de matériaux, ou encore de nouvelles applications dans des procédés de remédiation environnementale, d'extraction ou de valorisation de la biomasse végétale.

Les *ultrasons de puissance* utilisés en sonochimie, en opposition aux *ultrasons de diagnostic* utilisés en imagerie médicale, génèrent une énergie acoustique plus grande, dans une gamme de fréquences pouvant être comprises entre 20 kHz et 2 MHz, permettant ainsi la cavitation d'un milieu liquide.

Un phénomène de cavitation à explorer et à exploiter

En effet, la sonochimie repose sur le phénomène de cavitation, qui correspond à la formation de microbulles de gaz en solution qui vont augmenter progressivement de volume sous l'effet de la propagation de l'onde ultrasonore et de l'alternance de la formation de zones de compression et de raréfaction (voir la Figure 1 de la page suivante). Cette croissance amène les bulles jusqu'à une taille critique où elles implosent en produisant localement des conditions extrêmes, à la fois physiques (ondes de choc, micro-jets,

phénomène de micro-convection, microémulsion, etc.), thermiques (températures supérieures à quelques milliers de degrés au cœur de la bulle de cavitation) et chimiques (production d'espèces radicalaires très réactives en solution). Ces effets locaux extrêmes sont à l'origine de toutes les applications de la sonochimie et sont généralement directement liés aux paramètres ultrasonores choisis, ainsi qu'aux conditions expérimentales utilisées [1].

La fréquence ultrasonore peut avoir un impact essentiel sur les effets sonochimiques produits. Dans l'eau, par exemple, les basses fréquences (20-80 kHz) conduisent préférentiellement à des effets physiques, alors qu'à hautes fréquences (150-2000 kHz), la cavitation favorise la production d'espèces radicalaires au travers des effets chimiques. La nature du solvant peut également fortement influencer sur les effets de la cavitation, tout comme la puissance acoustique, la pression, la température ainsi que les gaz dissous dans le solvant. Enfin, le type de sonoréacteur utilisé (dimensions, géométrie, positionnement des sources irradiantes, etc.) détermine la propagation et la réflexion des ondes ultrasonores et, par voie de conséquence, influence aussi les effets obtenus. Pour cette dernière raison, le génie des procédés et la modélisation des systèmes sont essentiels pour l'optimisation de sonoréacteurs adaptés à des applications données.

D'un point de vue théorique, même si les effets de la cavitation ont beaucoup été exploités en sonochimie, de nombreux phénomènes et mécanismes restent peu connus. En effet, au niveau fondamental, plusieurs théories pouvant expliquer les effets sonochimiques sont encore débattues au sein de la communauté scientifique : la théorie du « point chaud » (ou du « *hot-spot* »), la théorie « électrique », la théorie « supercritique » ou encore la théorie « de décharge de plasma » [2 et 3].

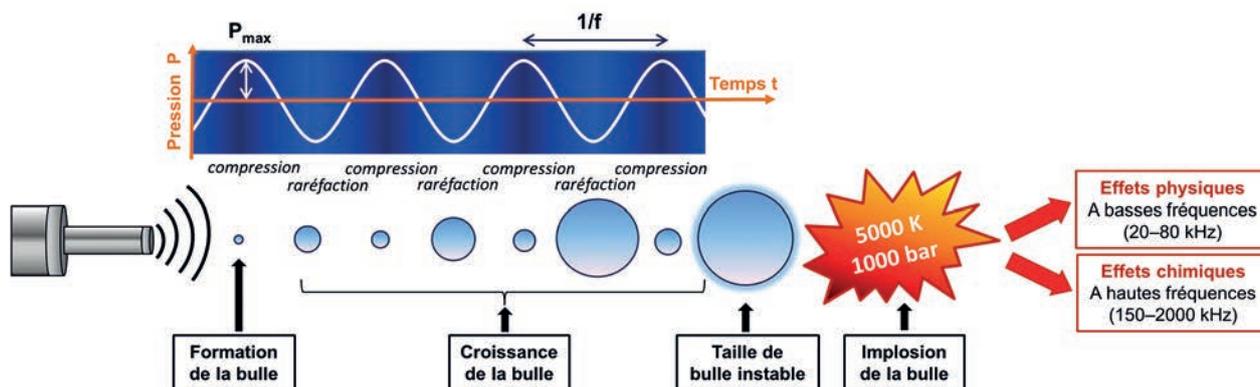


Figure 1 : Le phénomène de cavitation responsable des effets sonochimiques (reproduit de la référence bibliographique [1] avec l'autorisation de ©L'Actualité chimique).

De nouvelles opportunités et de nouveaux défis à relever

Les applications de la sonochimie touchent de nombreux domaines et présentent souvent un ou plusieurs avantages, par rapport à des conditions dites *silencieuses* : la réalisation de réactions dans des conditions plus douces, avec de meilleurs rendements, présentant des sélectivités différentes, des temps de réaction plus courts, des températures plus basses, et, parfois, permettant l'obtention de molécules difficiles à produire en conditions classiques ou de matériaux avec des propriétés spécifiques. Ces avantages sont souvent en accord avec les douze principes de la chimie verte qui visent à réduire l'impact environnemental, énergétique et économique des procédés développés sous ultrasons [4]. Par exemple, des conditions optimisées sous ultrasons peuvent conduire à des réductions énergétiques du procédé, à l'activation d'un catalyseur permettant d'améliorer l'efficacité d'une réaction, de travailler en utilisant des solvants plus éco-compatibles ou même de réduire la production des coproduits ou des déchets. C'est dans ce contexte que les sonochimistes contribuent à développer de nouvelles recherches dans les domaines suivants [5] :

- **Sonocatalyse et sonochimie organique** : les réactions organiques et/ou catalytiques réalisées sous ultrasons dans l'eau ou dans des systèmes aqueux biphasiques sont prometteuses pour travailler dans des conditions plus douces, pour réduire les temps de réaction et pour améliorer les rendements. De plus, la cavitation est responsable d'effets mécaniques et chimiques conduisant à un meilleur accès des substrats aux catalyseurs, à la dépassivation de surface des catalyseurs ou encore à la formation d'espèces radicalaires réactives.
- **Préparation sonochimique des matériaux** : les effets mécaniques des ultrasons ont été largement étudiés pour la préparation de catalyseurs ou de matériaux spécifiques permettant notamment la modification des solides (délamination et exfoliation des solides stratifiés, agrégation de poudres métalliques ou céramiques, nettoyage et dépassivation de surface, etc.) et la synthèse de solides nanostructurés (réduction des temps de nucléation et meilleur contrôle de la taille des cristaux, meilleures pro-

priétés colloïdales, etc.). L'utilisation des ultrasons n'est pas seulement intéressante pour réduire le temps de préparation et la quantité de solvants utilisés ou pour changer la taille, la distribution et la structure des particules, elle l'est aussi pour produire des matériaux aux nouvelles propriétés et réactivités.

- **Sonochimie des polymères** : la sonochimie peut être impliquée dans la synthèse de polymères et de composites polymères ainsi que dans la dépolymérisation ou la coupure sélective des polymères. De récents travaux ont décrit les différents facteurs affectant la dégradation des polymères, ouvrant de nouvelles pistes notamment pour le recyclage des plastiques présents dans les déchets.
- **Conversion de la biomasse lignocellulosique sous ultrasons** : les ultrasons peuvent fournir un environnement physico-chimique efficace pour traiter une biomasse récalcitrante, multi-composante et hétérogène. L'introduction de l'énergie ultrasonore a été testée à l'échelle laboratoire essentiellement pour la production de biocarburants ou le prétraitement de la biomasse. La production de molécules d'intérêt à haute valeur ajoutée à partir de cette biomasse non comestible est également un sujet de recherche dont l'exploration s'est développée ces dernières années.
- **Extraction sous ultrasons** : l'extraction ultrasonore (UAE, pour Ultrasound-Assisted Extraction) est devenue une technologie verte attrayante pour le domaine considéré. En effet, l'utilisation des ultrasons permet dans de nombreux cas d'améliorer le rendement d'extraction, de réaliser l'extraction en phase aqueuse ou en recourant à des solvants éco-compatibles au lieu d'utiliser des solvants organiques, d'améliorer l'extraction de composés thermosensibles en travaillant à des températures plus basses sous ultrasons et de transformer *in situ* des molécules en composés d'intérêt.
- **Remédiation environnementale** : les ultrasons ont également été utilisés dans des procédés de dégradation de polluants organiques présents dans des effluents liquides, car les fortes conditions oxydantes produites par la technologie, parfois en combinaison avec d'autres procédés d'oxydation avancés, permettent la minéralisation totale des espèces à traiter.

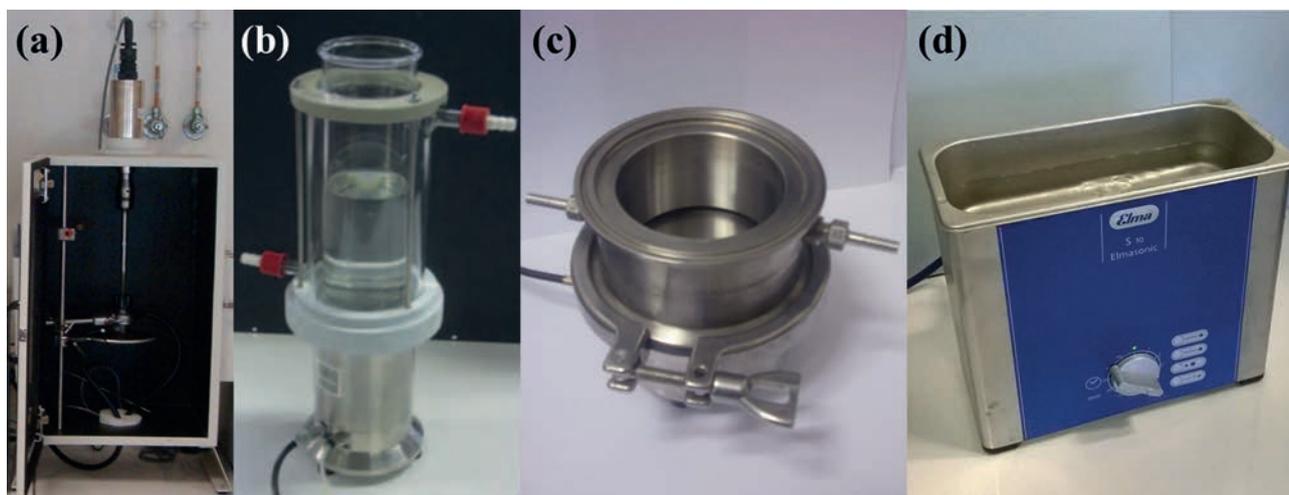


Figure 2 : Exemples de réacteurs utilisés à l'échelle laboratoire : (a) sonde irradiante plongeante ; (b) réacteur *cup-horn* en verre ; (c) réacteur *cup-horn* en acier inoxydable ; (d) bain à ultrasons (Photo©Grégory Chatel).

Du laboratoire à l'échelle industrielle

Depuis les années 2000, les recherches en laboratoire portant sur l'utilisation des ultrasons dans le domaine de la chimie ont augmenté de façon exponentielle. La sonochimie organique a souffert d'un « effet de mode », puisqu'une grande partie de la chimie organique a été revue sous ultrasons, parfois avec des effets très intéressants. Mais le manque de rigueur des études rapportées (aucune information sur les paramètres ultrasonores) ou l'utilisation d'un équipement non adapté (parfois l'utilisation d'un vieux bac à ultrasons, sans en connaître les caractéristiques) ont conduit à une absence de reproductibilité des expérimentations menées, et surtout à l'impossibilité de comparer de façon globale les résultats expérimentaux entre eux, puisqu'aucune condition n'était similaire, ni même précisée. Aujourd'hui, les recherches académiques réalisées dans le domaine considéré permettent d'acquérir de nouvelles données, fiables, à partir de réacteurs normés ou totalement décrits, par exemple des sondes plongeantes ou des réacteurs de type *cup-horn* (réacteurs cylindriques dimensionnés spécifiquement avec une irradiation par le bas du réacteur), avec des géométries adaptées et des conditions caractérisées (voir la Figure 2 ci-dessus).

Cependant, la conception de sonoréacteurs, permettant le passage à l'échelle industrielle des résultats démontrés en laboratoire, reste aujourd'hui l'un des principaux défis de la sonochimie [6]. La technologie « ultrasons » est très bien connue des différents secteurs industriels, qu'ils mobilisent essentiellement pour du soudage industriel, du nettoyage de composés industriels ou encore de la découpe agroalimentaire. Cette technologie ne constitue donc pas un frein au développement de procédés à une plus grande échelle. Mais très peu d'applications en sonochimie ont été développées pour le moment. En effet, à l'instar de la plupart des technologies innovantes de transformation, les ultrasons ne constituent pas une technologie standard nécessitant un développement et une mise à l'échelle spécifiques pour chaque application développée.

On peut néanmoins citer de nombreux exemples de l'utilisation des ultrasons dans les domaines de l'extraction ultrasonore et sonochimique [7 et 8], de la production et du dépôt simultané et en continu de nanoparticules d'oxydes de zinc sur des textiles [9], de la cristallisation ultrasonore afin de produire des corticostéroïdes à grande échelle (procédé UMAX®) [6] ou encore dans celui de la production en flux continu de nanoémulsions pharmaceutiques (production de l'adjuvant immunologique MF59 de haute qualité) [10].

Actuellement, nombre de chercheurs académiques, de concepteurs d'équipements et de fabricants sont activement engagés dans le développement à grande échelle de ces procédés, car ils sont un paramètre crucial de l'exploitation de la sonochimie au niveau industriel.

Une thématique structurée dans le paysage de la recherche

Les recherches en sonochimie ont débuté dans les années 1980, au travers notamment de la grande contribution apportée par le chimiste français, Jean-Louis Luche. Celui-ci a rassemblé autour de lui une communauté de scientifiques, dont le nombre n'a cessé de grandir, pour travailler sur l'utilisation des ultrasons pour des applications chimiques. Ils ont également participé à la création de la Société européenne de sonochimie (ESS, pour European Society of Sonochemistry) et à l'organisation du premier congrès international placée sous l'égide de cette société en 1990, à Grenoble (département de l'Isère). Depuis, des congrès de l'ESS sont organisés tous les deux ans, dans toute l'Europe (Avignon en 2014, Istanbul en 2016, Besançon en 2018), et enregistrent une forte participation des laboratoires français [11]. Des écoles d'été organisées par l'ESS en lien avec des industriels permettent de former régulièrement des doctorants et des jeunes chercheurs dans le domaine.

Les résultats de la recherche sur la sonochimie sont publiés non seulement dans le *Ultrasonics Sonochemistry*, un journal (Elsevier Science, Royaume-Uni) dédié depuis

1994 à des travaux se situant à l'interface de la chimie et des ultrasons, mais aussi dans différents journaux internationaux à comité de lecture moins spécialisés.

Au niveau national, les scientifiques et les ingénieurs travaillant sur l'étude et l'application des ultrasons de puissance, de la cavitation et de la sonochimie ont organisé en 2011, à Grenoble, les premières Journées scientifiques Ultrasons et Procédés (JSUP). Ces échanges scientifiques ont été renouvelés depuis, tous les deux ans (en 2013 à Chambéry, en 2015 à Besançon, en 2017 à Toulouse, en 2019 à Orange et en 2021 à Lille).

En 2019, un groupement de recherche (GDR Cavitation), porté par le CNRS, a été créé afin de favoriser l'avancée des connaissances portant sur les mécanismes réactionnels générés sous l'effet de la cavitation, d'élargir les applications potentielles de la sonochimie, de renforcer l'interaction entre les équipes du GDR au travers de projets collaboratifs, d'aider à l'organisation de réunions annuelles et à la mise en place d'écoles thématiques, ou encore d'apporter un soutien aux jeunes chercheurs [12]. De plus, la création du GDR, composé d'une quarantaine d'entités membres dont plusieurs constructeurs et industriels, a aussi pour objectif d'augmenter la visibilité de la communauté sonochimique française à l'échelle internationale, au travers de six axes thématiques clairement identifiés (voir la Figure 3 ci-dessous).

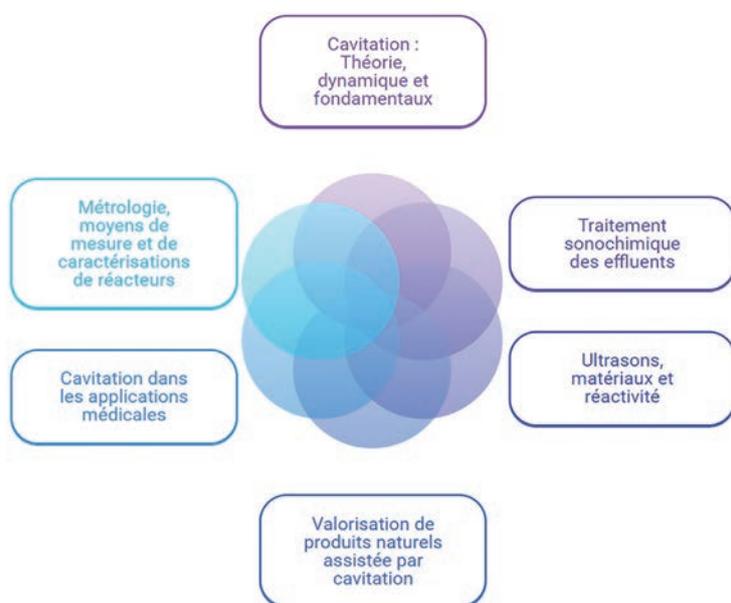


Figure 3 : Les six axes thématiques du GDR – Source : CavitationGDR, <https://gdr-cavitation.cnrs.fr/axes-recherche/>

Conclusions

La sonochimie fait intervenir les ultrasons de puissance, une technologie connue du monde de l'industrie, notamment pour ses applications en matière de soudage, de nettoyage industriel et de découpe alimentaire. Une technologie dont le potentiel en matière d'application dans le domaine de la chimie est encore sous-exploité. Les résultats obtenus en laboratoire confirment pourtant son important potentiel au regard de certains procédés en matière

de chimie organique, de catalyse, de préparation de matériaux, de synthèse et de dégradation de polymères, d'extraction ou encore de remédiation environnementale. Il faut bien avoir à l'esprit que les ultrasons ne constituent pas qu'un simple outil d'agitation, ils représentent également une source d'innovation dans ces différents domaines. Afin de lever les principaux verrous au développement de cette technologie à une plus large échelle, les approches suivantes sont particulièrement recommandées [13] :

- **Concevoir des réacteurs optimisés** présentant une cavitation uniforme et efficace, offrant une meilleure distribution énergétique et permettant d'assurer une reproductibilité des expérimentations ;
- **Développer des paramètres d'intensification des procédés**, à travers l'utilisation de réacteurs adaptés, tubulaires, ou *via* des systèmes microfluidiques ;
- **Développer des transducteurs de puissance élevée et des sonoréacteurs plus résistants à l'érosion** ;
- **Développer des réacteurs hybrides** capables de fonctionner avec d'autres technologies en fonction de l'application visée, à partir des synergies observées récemment en laboratoire (en combinaison avec les micro-ondes, l'électrochimie, la photocatalyse, les liquides ioniques, les enzymes, etc.) ;
- **Mettre à disposition *via* des plateformes technologiques plus de sonoréacteurs à l'échelle semi-pilote ou pilote** afin de tester de nouvelles applications et d'évaluer les coûts d'une montée en échelle et les coûts en termes d'investissement ;
- **Suivre en conditions réelles les paramètres sonochimiques** afin d'évaluer et de modéliser la montée en échelle ;
- **Mettre en place des simulations numériques et des modélisations** pour prédire les effets physiques et chimiques attendus en fonction des paramètres de fonctionnement retenus ;
- **Poursuivre les études fondamentales** sur la sonochimie, la cavitation et les effets des ultrasons pour mieux comprendre et connaître les systèmes.

En conclusion, ces verrous ne pourront être levés sans une interdisciplinarité importante et une forte association entre les laboratoires de recherche académique, les plateformes technologiques et les partenaires industriels. Les appels à projets adossés à des financements régionaux, nationaux ou européens commencent à intégrer ces méthodes d'activation non conventionnelles, telles que les ultrasons. Cependant, seule une stratégie nationale associant l'État, les entreprises, les territoires, les chercheurs, les pôles de compétitivité et les plateformes technologiques existantes pourra favoriser davantage le développement de ces technologies de rupture par un accroissement du volume des financements de la R&D académique et industrielle.

Références bibliographiques

- [1] BEHLING R., ARAJI N. & CHATEL G. (2016), « Qu'est-ce que la sonochimie ? », *L'Actualité chimique* 410, pp. 11-20.
- [2] SUSLICK K. S., HAMMERTON D. A. & JR CLINE R. E. (1986), "The sonochemical hot-spot J", *Am. Chem. Soc.* 108, pp. 5641-5642.

- [3] NIKITENKO S. I. (2014), "Plasma formation during acoustic cavitation: toward a new paradigm for sonochemistry", *Adv. Phys. Chem.* 12, ID 173878.
- [4] CHATEL G. (2018), "How sonochemistry contributes to green chemistry?", *Ultrason. Sonochem.* 40, pp. 117-122.
- [5] CHATEL G. (2017), *Sonochemistry – New opportunities for Green Chemistry*, World Scientific, 188 p., ISBN: 978-1-78634-127-3.
- [6] LEONELLI C. & MASON T. J. (2010), "Microwave and ultrasonic processing: now a realistic option for industry", *Chem. Eng. Process.* 49, pp. 885-900.
- [7] VINATORU M. (2015), "Ultrasonically assisted extraction (UAE) of natural products some guidelines for good practice and reporting", *Ultrason. Sonochem.* 25, pp. 94-95.
- [8] CHATEL G., DUWALD R., DRAYE M., FANGET P. & PIOT C., « Dispositif d'extraction solide/liquide par irradiation ultrasonore radiale, et procédé d'extraction associé », brevet FR20 06171, 12 juin 2020.
- [9] ABRAMOV V. O., GEDANKEN A., KOLTYPIN Y., PERKAS N., PERLSHTEIN I., JOYYCEN E. & MASON T. J. (2009), "Pilot scale sonochemical coating of nanoparticles onto textiles to produce biocidal fabrics", *Surf. Coat. Tech.* 204, pp. 718-722.
- [10] PESHKOVSKY A. S. & BYSTRYAK S. (2014), "Continuous-flow production of a pharmaceutical nanoemulsion by high-amplitude ultrasound: Process scale-up", *Chem. Eng. Process.* 82, pp. 132-136.
- [11] European Society of Sonochemistry, site Internet : <http://www.europeansocietyofsonochemistry.eu/>
- [12] Groupement de Recherche CNRS Cavitation, site Internet : <https://gdr-cavitation.cnrs.fr/>
- [13] DRON D. & PAVEL I., auteurs du rapport du Conseil général de l'Économie intitulé « Innover avec les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (ONIEA/NIEAW) », septembre 2020.

Freins et leviers de l'intégration des technologies micro-ondes dans les procédés de synthèse chimique à l'échelle industrielle

Par Dr. Marilena RADOIU
Microwave Technologies Consulting

La transition vers des technologies chimiques plus durables nécessite de proposer des solutions aux problématiques environnementales dans la filière chimie industrielle. Dans cet article, nous présentons la technologie micro-ondes, une technologie de chauffage qui, si elle est correctement appliquée dès l'échelle laboratoire et jusqu'à l'échelle industrielle, peut viser à améliorer la consommation d'énergie, le temps de traitement et l'empreinte environnementale des procédés chimiques. Notre objectif est de présenter aux scientifiques et aux industriels (les utilisateurs finaux) les freins et les leviers que recouvre l'intégration de la technologie micro-ondes, ainsi que certains des aspects pratiques associés au traitement industriel utilisant cette technologie afin d'en avoir une meilleure compréhension et de permettre son extrapolation à l'échelle industrielle.

Introduction

Le siècle dernier a clairement démontré l'impact de la technologie sur la société. Actuellement, l'industrie poursuit ses recherches pour accroître ses performances et avoir des coûts encore plus compétitifs. Pour réaliser ces objectifs, développer de nouvelles technologies et méthodes de production devient une nécessité.

Les technologies chimiques sont également confrontées à de nombreux enjeux tenant à leur transition vers plus de durabilité. En plus des performances et des exigences de qualité actuelles et futures dans le domaine des matériaux et des méthodes de traitement, l'industrie prend en compte les risques liés à la santé, à la sécurité et à l'environnement qui sont inhérents à ces procédés. En termes d'environnement, le secteur chimique contribue notamment à la pollution, au changement climatique, à la perte de biodiversité et à la raréfaction des ressources. Ainsi, la conception de molécules et de bioproduits chimiques doit désormais s'inscrire impérativement dans une démarche d'écoconception visant à considérer les problématiques environnementales et à apporter des solutions pertinentes dès la conception du produit afin de mettre en œuvre de meilleures pratiques au cours des différentes étapes de sa fabrication. La forme et la direction du développement technologique doivent tenir compte du fait que ces étapes dépendent de manière critique du transfert d'énergie dans

la réaction chimique pour pouvoir offrir un produit final offrant les plus hauts niveaux de performance et de fiabilité.

Les procédés de transformation par chauffage sont au cœur de cet article, à la fois pour les impacts environnementaux négatifs qu'ils génèrent (les consommations d'énergie et d'eau, la génération de déchets, les pertes, etc.) et pour leur fonction intrinsèque de transformation de matières premières brutes en produits ou intermédiaires réactionnels qui se traduisent par la valeur ajoutée apportée à la matière première (impact positif).

L'énergie fournie par les micro-ondes (MO) – les ondes électromagnétiques qui se situent dans la gamme des hyperfréquences – est une énergie alternative qui peut remplacer le transfert d'énergie conventionnel – le transfert d'énergie par chaleur *via* conduction ou convection – dans les synthèses chimiques à l'échelle industrielle. Le chauffage MO est basé sur la capacité de certains matériaux (liquides ou solides) à transformer l'énergie électromagnétique en chaleur. Dans le contexte souligné ci-dessus, ce mode de conversion d'énergie *in situ*, soit directement au sein des matériaux sensibles à ces ondes, se révèle très intéressant pour une application dans la chimie de synthèse en phase liquide, solide ou gazeuse, ou pour les traitements apportés aux matériaux (Mingos et Baghurst).

Lors du chauffage par MO, les paramètres à prendre en considération sont liés :

- à l'**échantillon**, par exemple le volume par rapport à la masse à traiter, les produits de départ, les produits intermédiaires et les produits finaux, l'examen des paramètres diélectriques du milieu réactionnel et leur dépendance en température, le point d'ébullition, la viscosité, la profondeur de pénétration ou encore la distribution de la température à l'intérieur de l'échantillon,
- et à l'**équipement**, par exemple la fréquence MO, le système de transfert de l'énergie MO, la puissance nominale de tout composant MO constituant l'équipement, la sélection du réacteur (volume, forme et nature) adapté à la fois au traitement recourant aux MO et à la synthèse chimique souhaitée ainsi que la valeur du champ électrique à l'intérieur du réacteur, le type de générateur MO (pulsé/CW⁽¹⁾), la puissance MO générée et celle absorbée, l'applicateur MO monomode ou multimode, le contrôle de la température et la durée de l'opération.

Les essais sur l'influence des MO dans une réaction chimique ne peuvent avoir un sens que si l'étude R&D prend en compte, ou s'efforce de prendre en compte, tous les paramètres ou tout au moins le maximum de paramètres cités *supra*.

Freins aux procédés d'extrapolation à l'échelle industrielle

L'énergie MO est extrêmement efficace pour le chauffage sélectif des matériaux car, si elle est correctement appliquée, aucune énergie n'est gaspillée lors du « chauffage en masse » de l'échantillon. Les procédés de chauffage par MO font actuellement l'objet d'études dans un certain nombre de domaines où les avantages de cette énergie ont conduit à des économies significatives en termes de consommation d'énergie, de temps de traitement et de réduction forte de l'empreinte environnementale. Cependant, en dehors d'applications hautement spécialisées telles que l'extraction de la biomasse dans l'industrie cosmétique ou pharmaceutique (Radoiu, 2017), les applications en matière de chauffage par MO ont connu une faible commercialisation dans le domaine de la chimie de synthèse. Il y a à cela plusieurs raisons, nous allons voir les plus importantes.

Faible développement des procédés de chauffage par MO et manque de connaissances en ce qui concerne la conception des équipements de chauffage par MO

En raison des prix élevés des réacteurs micro-ondes dédiés, les chimistes préfèrent toujours recourir au four MO domestique pour effectuer des réactions. Trop souvent, le chimiste ne s'intéresse pas à ce qu'il y a à l'intérieur de la « boîte noire » et le paramètre le plus surveillé est la température, voire la pression, sans l'associer à la puissance MO, à l'énergie MO absorbée et à la densité de puissance MO générée par l'équipement et transmise au mélange réactionnel.

Tout cela conduit à des résultats non reproductibles, à des effets magiques, à des cinétiques différentes..., qui sont très difficiles à extrapoler à l'échelle industrielle, ce qui n'incite donc pas les industriels à investir.

Mauvaise utilisation des MO en laboratoire de R&D en raison d'une connaissance insuffisante de la technologie et des équipements associés

L'extrapolation à l'échelle industrielle d'un procédé chimique englobe plusieurs aspects de la chimie, du génie chimique et de la mécanique des fluides. Les problèmes de cinétique, de thermodynamique et d'hydrodynamique affectent non seulement le choix visant à obtenir le meilleur type de réacteur, mais également la conception et le régime de fonctionnement de ce dernier. En rajoutant la technologie MO, nous devons également prendre en compte les MO (c'est-à-dire les ondes électromagnétiques), les propriétés diélectriques du mélange réactionnel qui dépendent de la température ainsi que de la cinétique de réaction (en général, les produits formés lors de la réaction chimique ont des propriétés totalement différentes de celles du mélange réactionnel initial), la densité de puissance, les arcs à l'intérieur du réacteur, etc.

Comprendre de quelle manière les MO peuvent améliorer la réaction chimique nécessite une bonne connaissance non seulement des principes fondamentaux des MO et de leur interaction avec la matière, mais aussi des avantages pratiques et des limites des équipements disponibles. Comprendre les avantages et les inconvénients de l'énergie MO est très important pour décider quand et où les MO peuvent remplacer d'autres sources d'énergie. Les principes sous-jacents et les facteurs déterminant le succès de l'extrapolation à l'échelle industrielle de la technologie MO ne sont pas bien connus des chercheurs et de l'industrie : la fréquence, la puissance et la profondeur de pénétration des MO ne sont que quelques-uns de ces facteurs.

Le développement de processus sûrs, robustes et évolutifs demande une collaboration étroite entre les chercheurs, les équipementiers et les industriels. Cependant, la réalité du terrain ainsi que les publications révèlent, qu'à quelques exceptions près, les chercheurs comme les équipementiers MO ne parviennent pas à mettre ce principe en pratique.

Les équipements vendus par certains fabricants MO s'avèrent non adaptés aux applications chimiques

La plupart des réacteurs MO dédiés aux chimistes sont fabriqués par des équipementiers utilisant des techniques de « cuisson micro-ondes ». Ces réacteurs sont plus chers, équipés d'écrans tactiles et d'interfaces conviviales offrant différents degrés de sophistication en ce qui concerne le contrôle des procédés, les bases de données, les caractéristiques de sécurité, et même en termes de *design*. Cependant, les conditions opératoires sont la plupart du temps mal définies : on parle en général de la puissance MO fournie par le générateur, de la durée d'expérimentation, mais pratiquement jamais de la puissance absorbée par l'échantillon (la différence entre la puissance MO

(1) Continuous wave = onde continue.

fournie par le générateur et celle non absorbée, et donc réfléchi, par l'échantillon), des échanges thermiques, du champ électrique mesuré ou calculé à l'intérieur de l'échantillon – les MO ne sont qu'une méthode de chauffage pour obtenir des réactions rapides par rapport à une énergie d'activation élevée.

La plupart des équipements de laboratoire dédiés aux MO sont construits à l'aide de magnétrons de très haute puissance, alors que les chercheurs utilisent ces équipements pour traiter de très petits échantillons. En général, cette combinaison conduit à de fortes densités de puissance MO, qui ne sont pas extrapolables dans les réacteurs industriels. Comme il n'y a pas de possibilités de suivre et de contrôler les paramètres de réaction *versus* temps, il est très souvent proposé de travailler dans un réacteur sous pression, car les solvants et/ou les réactifs peuvent être chauffés à des températures supérieures à leur point d'ébullition.

D'une manière générale, les fabricants d'équipements MO de laboratoire ne sont pas les mêmes que les fabricants d'équipements MO industriels. Cela entrave également la faisabilité de leur mise à l'échelle. De plus, en raison de la taille et du prix de l'équipement, la fréquence 2,45 GHz est celle utilisée pour l'équipement de laboratoires dédiés, tandis que l'équipement industriel est plus susceptible d'utiliser la fréquence 915 MHz.

Quant aux industriels, les deux inconvénients importants du chauffage par MO qu'ils mettent le plus souvent en avant pour justifier leur décision de ne pas y recourir, sont :

- sa faible profondeur de pénétration, en particulier en raison de la fréquence MO utilisée, soit 2 450 MHz (fréquence du four MO domestique). Cependant, il existe de nombreuses bandes de fréquences distinctes qui ont été attribuées pour une utilisation industrielle, scientifique et médicale (ISM). Comme le montre le tableau ci-contre, les principales fréquences MO d'intérêt pour l'industrie correspondent à une fréquence centrale de 915 MHz aux États-Unis, de 896 MHz au Royaume-Uni, de 922 MHz en Australie et en Nouvelle Zélande et de 2 450 MHz pour l'ensemble des autres pays. Ces fréquences sont celles d'équipements qui peuvent être facilement achetés (Radoiu, 2020).
- le coût élevé de l'équipement (CAPEX⁽²⁾) et la durée de vie relativement brève (~ 1 an) des magnétrons contribuent à un OPEX⁽³⁾ élevé (Radoiu, 2017). Pour envisager une extrapolation de la technologie MO dans l'industrie, une analyse plus complexe de ses avantages est nécessaire : les avantages techniques et économiques ainsi que ceux spécifiques aux procédés chimiques doivent être analysés dans leur globalité. Les fabricants d'équipements MO ont un rôle important à jouer dans la mise en œuvre de cette technologie, car ils sont le principal point de liaison entre la recherche et les utilisateurs finaux. Ils doivent mettre à la disposition de l'utilisateur des

informations suffisamment détaillées sur l'équipement et dispenser la formation technique nécessaire pour permettre un fonctionnement correct et sûr de celui-ci. D'autre part, l'utilisateur, que ce soit un laboratoire ou un industriel, doit manifester un intérêt suffisant pour pouvoir comprendre les spécificités de l'équipement (pour que ce ne soit pas pour lui « une boîte noire » !) et les limites de la technologie pour s'assurer de résultats reproductibles et scientifiquement solides, dès l'échelle laboratoire et jusqu'à l'échelle industrielle.

Pour obtenir les meilleures performances possibles lors du chauffage MO et permettre au moins une étude de faisabilité, les aspects essentiels sont les suivants :

- avoir une bonne connaissance de l'équipement MO pour faire un choix optimal ;
- bien appréhender le produit et les résultats à atteindre par rapport aux bonnes pratiques d'ingénierie ;
- bien connaître les paramètres économiques.

Bande de fréquences	Fréquence centrale	Longueur d'onde dans l'air	Régions du monde couvertes ^a
433,05 – 434,79 MHz	433,92 MHz	0,69 m	R1
902 – 928 MHz	915 MHz ^{b,c}	0,33 m	R2 + quelques exceptions
2 400 – 2 500 MHz	2 450 MHz ^d	0,12 m	R1, R2, R3
5 725 – 5 875 MHz	5 800 MHz	0,05 m	R1, R2, R3

Bandes des fréquences MO allouées par l'ITU (International Telecommunications Union) pour des applications ISM (Industrial, Scientific and Medical), avec des générateurs à magnétron.

a - R1 – Europe, Afrique, Russie (Sibérie) et Mongolie, Moyen-Orient (à l'exception de l'Iran) ; R2 – Amériques du Sud et du Nord ; R3 – Pays restants.

b - Royaume-Uni : 896 MHz ; Australie et Nouvelle Zélande : 922 MHz.

c - Appelée bande L.

d - Appelée bande S.

Leviers pour une extrapolation des procédés à l'échelle industrielle

Il a été très souvent souligné que l'efficacité énergétique est un paramètre à prendre en compte dans la transition vers des procédés industriels plus durables. D'un point de vue scientifique, l'efficacité énergétique est définie comme le rapport entre l'énergie utile et la consommation totale d'énergie. Cependant, les procédés assistés par MO ne reposent pas uniquement sur les avantages d'une consommation d'énergie réduite (Van Reusel). L'efficacité énergétique est un autre point de contrôle lorsque d'autres paramètres ont déjà orienté en faveur du choix de l'électricité. L'intérêt réel de cette transition vers les technologies MO est la productivité, c'est-à-dire le rapport entre la production réalisée et les facteurs de production mis en œuvre. Les principaux avantages du traitement par MO comprennent le gain de temps, l'augmentation du rendement et l'amélioration de l'empreinte environnementale du procédé chimique. Les procédés dans lesquels un certain nombre de ces avantages sont évidents peuvent être

(2) CAPEX = capital expenditure (dépenses d'investissement dédiées à l'achat d'équipements professionnels).

(3) OPEX = operating expenses (dépenses d'exploitation, charges supportées par une entreprise pour les besoins de son activité).

considérés comme des méthodes alternatives pour la transition vers un développement durable.

Par rapport aux techniques de chauffage conventionnelles, les autres avantages du chauffage par MO sont :

- des vitesses de chauffage plus élevées et des temps de production plus courts donnant la possibilité de passer du traitement statique au traitement en flux continu ;
- l'augmentation de la température du milieu réactionnel peut être lente ou rapide, selon la réaction chimique envisagée ;
- absence de contact direct entre la source MO et le matériau chauffé ;
- un chauffage sélectif peut être obtenu ;
- un meilleur contrôle des paramètres de la réaction chimique ;
- une réduction de la taille de l'équipement et de son empreinte au sol ;
- une conception modulaire et, de fait, flexible de la ligne de production ;
- le chauffage MO peut être utilisé de manière autonome ou en synergie avec d'autres techniques de chauffage (voir la figure ci-contre) ;
- des installations MO plus respectueuses de l'environnement du fait d'une diminution des déchets et des pertes de production : ces installations ne produisent pas de poussières, d'odeur, de bruit, de gaz résiduels, de vibrations ou d'augmentation de la température ambiante.

Conclusions

Alors que la fabrication industrielle atteint de nouveaux sommets, l'industrie chimique doit adopter des mesures rigoureuses et robustes pour minimiser les risques liés à son activité et éviter les défaillances dans sa production.

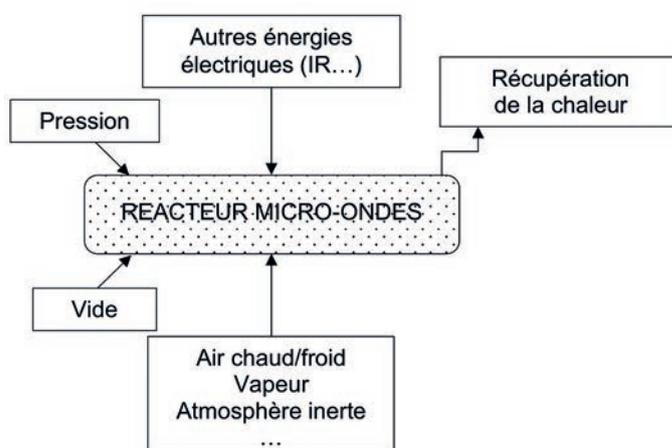
Il est nécessaire d'explorer de nouvelles générations de réacteurs en mettant l'accent sur des conceptions dédiées qui assurent la contrôlabilité et la surveillance des conditions de réaction. Par ailleurs, les questions de changement d'échelle dans l'utilisation de la technologie MO sont actuellement peu traitées dans le domaine de l'industrie chimique, alors qu'elles en sont un point crucial. Souvent, les solutions sont développées et testées à petite échelle, avant d'être comparées à des solutions optimisées à grande échelle. Cela induit nécessairement un décalage dans les résultats obtenus, et les comparaisons deviennent laborieuses dans ces conditions.

En général, les installations MO industrielles ne sont pas proposées en tant que systèmes standard. Un certain nombre de variables affectent le réacteur MO et son échelle : l'intensité du champ électrique, la densité de puissance MO et la température du mélange chauffé sont les plus importants. En conséquence, le développement des équipements par rapport aux installations MO doit être étudié individuellement pour chaque système afin de bénéficier des avantages souhaités : la performance de l'équipement est décidée sur la base d'une spécification technique établie entre l'utilisateur final, qui indique la capacité de production souhaitée, le nombre des postes et des heures de travail, la température requise et l'évolution

de celle-ci au sein du produit, etc., et l'équipementier, qui propose la fréquence MO, la puissance MO, la conception du réacteur, etc.

La possibilité de remplacer les réacteurs en *batch* (en statique) par des réacteurs en flux continu augmente considérablement l'efficacité et le contrôle du procédé chimique, menant à des économies de matières premières ainsi que d'énergie, réduisant la production de déchets, et augmentant le rendement, la qualité et la sécurité de la production.

De plus, la synthèse chimique par MO effectuée en flux continu est un bon exemple d'intensification de procédés, le flux continu permettant un contrôle très précis de tous les paramètres et un meilleur transfert d'énergie et de masse. En outre, les réacteurs fonctionnant en flux continu peuvent être facilement développés à l'échelle industrielle par l'installation de plusieurs réacteurs en série ou en parallèle, ce qui permet de raccourcir le temps de développement de leur production à l'échelle industrielle.



Compatibilité et synergie des micro-ondes avec d'autres méthodes de traitement (Radoiu, 2020).

Bibliographie

- MINGOS D. M. P. & BAGHURST D. R. (1997), "Applications of Microwave dielectric heating effects to synthetic problems in chemistry", in KINGSTON H. M. (Skip) & HASWELL S. J. (Eds.), *Microwave-Enhanced Chemistry. Fundamentals, Sample Preparation and Applications*, American Chemical Society, Washington, DC, pp. 3-54.
- RADIOIU M. (2017), "Industrial microwave reactors: components and set up", in CRAVOTTO G. & CARNAROGLIO D. (Eds.), *Microwave chemistry*, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, pp. 65-90.
- RADIOIU M. (2020), "Microwave drying process scale-up", *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification* 155, 108088, doi: 10.1016/j.cep.2020.108088
- VAN REUSEL K. (2010), "Context and technology bound motives for the use of electricity in industrial thermal processes. From 'electroheat' to 'electromagnetic processing of materials'", Dissertation for the degree of Doctor of Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, ISBN 978-94-6018-260-0, pp. 149-165.

Les applications émergentes des ondes Téraherertz

Par Ilarion PAVEL
CGE

Dans cet article, sont passées en revue les propriétés remarquables des ondes térahertz (THz), qui les rendent appropriées pour une grande diversité d'applications, ainsi que les diverses technologies nécessaires pour la mise au point de sources et de détecteurs dans la perspective d'une industrialisation de ces applications. En conclusion de cet article, sont donnés quelques éléments relatifs au marché du THz et un bref aperçu de la situation de la R&D en France.

Introduction

Les ondes térahertz (THz) sont des ondes électromagnétiques dont la fréquence se situe entre 100 GHz et 30 THz, donc entre les micro-ondes et l'infrarouge (voir la Figure 1 ci-après), ce qui leur confère des propriétés remarquables.

L'énergie d'un photon THz est suffisamment grande pour garantir une bonne résolution optique, tout en étant suffisamment petite pour ne pas ioniser les tissus, ce qui rend les ondes THz particulièrement appropriées pour l'imagerie⁽¹⁾. Sur cette bande de fréquences se trouve le spectre d'absorption de nombreuses molécules, ce qui rend ces ondes appropriées pour la détection des traces de substances toxiques ou d'explosifs.

Les ondes THz pénètrent dans des matériaux diélectriques non conducteurs et sont réfléchies par les métaux, ce qui

leur ouvre des perspectives pour le contrôle non destructif ou pour des applications dans le domaine de la sécurité. Elles présentent également une forte absorption dans l'eau, d'où la possibilité de les utiliser dans les mesures d'hygrométrie.

Cependant, produire et détecter des ondes THz restent un grand défi technologique. Les fréquences THz situées dans la plage inférieure peuvent être émises par des circuits électroniques à base de transistors de commutation rapide, mais il est difficile d'obtenir de bons rendements au-dessus de 300 GHz. Celles situées dans la plage supérieure sont atteignables grâce à des lasers à semi-conducteurs. En revanche, il y a très peu de dispositifs à semi-conducteurs capables de fonctionner entre ces limites, avec des puissances et des rendements qui puissent les rendre commercialisables. C'est ce que l'on appelle le *gap térahertz*.

Il existe cependant des dispositifs à tubes électroniques à vide, traditionnellement utilisés pour générer des micro-ondes, que l'on peut modifier pour les faire fonctionner

(1) Une fréquence de 1 THz correspond à une énergie de photon de 4,1 meV (inférieure à l'énergie thermique à température ambiante qui est de 26 meV) et à une longueur d'onde de 0,3 mm.

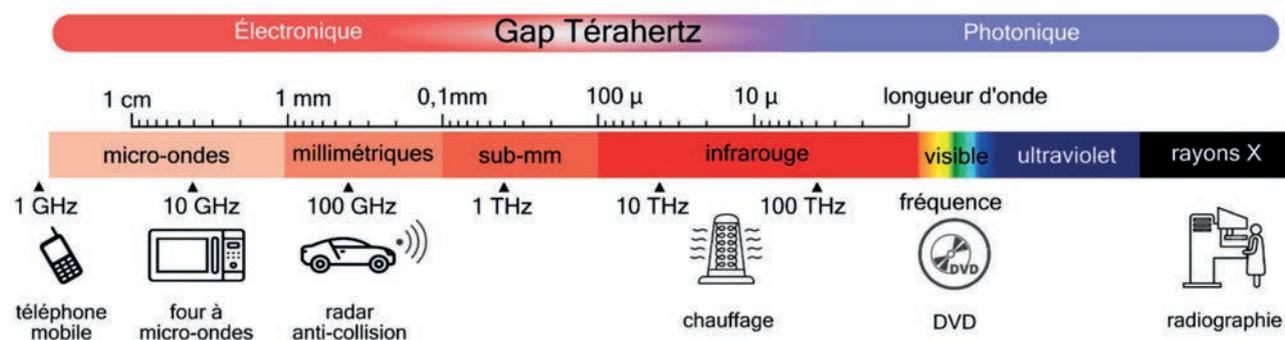


Figure 1 : Le « gap Téraherertz ». Il existe peu de sources capables d'engendrer des ondes électromagnétiques situées entre 300 GHz et 30 THz – Source : réalisée par l'auteur.

à des fréquences THz, comme le magnétron⁽²⁾, le gyrotron⁽³⁾ ou le carcinotron⁽⁴⁾. Mais la plupart de ces dispositifs soit se trouvent sous la forme de prototypes dans des laboratoires de recherche, soit ne sont pas suffisamment compacts pour être industrialisables dans le cadre d'une production de masse. Enfin, l'on dispose également de sources THz de grande puissance comme des synchrotrons ou des lasers à électrons libres⁽⁵⁾, mais il s'agit de grands instruments de recherche utilisés pour analyser des matériaux ou des molécules d'intérêt biologique.

Sources, détecteurs et systèmes

L'usage des ondes THz implique la mise au point des sources, détecteurs et autres composants nécessaires à la réalisation des systèmes d'analyse et de mesure. Malheureusement, il n'existe pas actuellement une source THz idéale, capable de fournir une puissance de l'ordre que quelques milliwatts, réglable sur une grande plage de fréquences THz et qui soit compacte et puisse fonctionner à température ambiante. On peut cependant envisager de mettre au point des sources spécifiques fondées sur diverses technologies et qui s'avèrent particulièrement adaptées à des applications précises.

Sources

Pour produire des ondes THz, on peut adopter deux stratégies.

Premièrement, on peut utiliser la technologie des micro-ondes, qui s'appuie sur divers composants électroniques de commutation rapide, comme les diodes Gunn, les diodes Impatt ou les diodes à effet tunnel résonant⁽⁶⁾, ou encore des transistors à haute mobilité d'électrons⁽⁷⁾.

(2) C'est le même type d'appareil qui équipe le four à micro-ondes : un filament cylindrique chauffé, situé au centre d'une cavité métallique sous vide, émet des électrons qui sont ensuite accélérés par une différence de potentiel. Les électrons se déplacent radialement vers les parois de la cavité, mais subissant l'action d'un champ magnétique parallèle à l'axe de la cavité, leur trajectoire devient spirale, produisant ainsi une onde électromagnétique.

(3) Des électrons, émis par un filament chaud, sont accélérés par une haute différence de potentiel et traversent une région avec un fort champ magnétique longitudinal. La trajectoire des électrons devient hélicoïdale et, en conséquence, ils émettent des ondes électromagnétiques qui sont amplifiées par la cavité résonante.

(4) Un flux constant d'électrons provenant d'un canon à électrons traverse une cavité résonante soumise à un signal de radiofréquence. Ce flux est alors modulé par l'interaction avec la cavité, puis arrive dans une deuxième cavité où il génère un signal de même fréquence mais amplifié. En réinjectant à l'entrée une partie du signal de sortie, on construit un oscillateur capable d'engendrer des ondes électromagnétiques.

(5) On fait passer un faisceau d'électrons relativistes dans un champ magnétique créé par une suite d'aimants dont les pôles sont orientés alternativement nord-sud, ce qui confère aux électrons un mouvement ondulatoire transversal, avec comme conséquence l'émission des photons monochromatiques dont la fréquence est réglée par la vitesse des électrons ou la valeur du champ magnétique, et qui sont rendus cohérents par confinement dans une cavité.

(6) Il s'agit de dispositifs semi-conducteurs avec des jonctions particulières, qui présentent des résistances négatives dans leur caractéristique intensité/tension, ce qui les rend utilisables dans les oscillateurs de haute fréquence.

(7) Ce sont des transistors à effet de champ, avec des hétérojonctions de construction particulière, dont les électrons forment un gaz électronique à une des interfaces et assurent ainsi le transport de charges avec une grande mobilité, ce qui permet des fréquences de fonctionnement très élevées.

On peut augmenter leur fréquence d'émission jusqu'à la région THz, mais leurs performances en termes de puissance et d'efficacité diminuent au fur et à mesure que la fréquence augmente. Dans le même registre, on peut tirer parti de la non-linéarité de ces dispositifs pour générer des harmoniques dont les fréquences atteignent le domaine du THz, cela demande néanmoins de disposer de sources de pompage de grande puissance et ne permet de délivrer généralement que des puissances de sortie plutôt faibles.

Deuxièmement, on peut faire appel à des technologies optiques. Mais cette fois-ci, on essaie de diminuer la fréquence pour atteindre le domaine des ondes THz, grâce à des dispositifs comme les lasers cascade quantique, ou à divers dispositifs à base d'optique non linéaire, de rectification optique, de mélange en cavité ou d'antennes photoconductrices.

Initialement développés pour émettre dans l'infrarouge, les lasers à cascade quantique sont des lasers à semi-conducteurs, dont les fréquences d'émission ont pu être baissées pour arriver à quelques THz. Ils sont très compacts, peuvent être accordés sur une plage limitée, mais nécessitent un système de refroidissement cryogénique. Un grand effort de recherche est actuellement développé pour rendre ces composants fonctionnels à des températures moins basses, atteignables grâce à des cryostats à base d'effet Peltier.

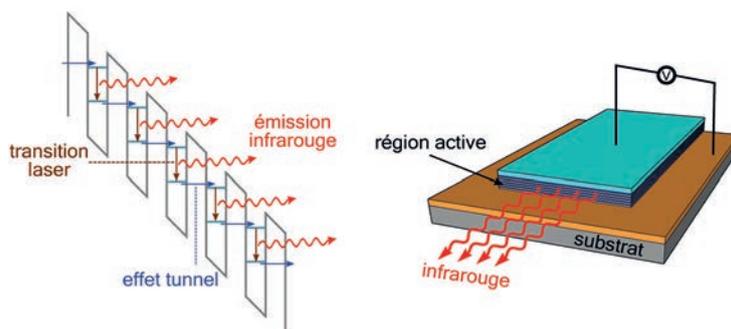


Figure 2 : Laser quantique à cascade. Il est formé par un empilement de couches semi-conductrices déposées par épitaxie, qui forment une succession de puits de potentiel séparés par des barrières de potentiel. Les électrons traversent ces barrières par effet tunnel, puis effectuent des transitions entre les deux niveaux d'énergie des puits quantiques, émettant ainsi du rayonnement, en général de l'infrarouge. De ces traversées et transitions successives vient l'appellation de laser à cascade – Source : réalisée par l'auteur.

Deux ondes optiques qui traversent un milieu non linéaire, par exemple un cristal, peuvent produire des battements par différence de fréquences, en particulier dans le domaine THz. En pratique, on utilise une impulsion laser ultra-courte, cette différence de fréquences se réalisant entre les diverses composantes de cette impulsion. Les sources THz basées sur cette technologie sont généralement beaucoup moins efficaces, l'énergie photonique du rayonnement THz étant bien inférieure à celle des faisceaux optiques. Il existe également un autre défi : les ondes THz produites sont divergentes, résultat de leur longueur d'onde relativement longue par rapport à la taille du milieu non linéaire.

On peut engendrer des ondes THz en faisant appel à une seule onde optique, par la méthode appelée « redressement optique ». On envoie dans certains gaz des impulsions femto-secondes, ce qui engendre des ondes THz. Dans ce cas, un plasma est généré par la superposition d'un faisceau infrarouge avec son deuxième harmonique. Pour une bonne efficacité de conversion, un contrôle de phase soigneux des ondes impliquées est nécessaire. Par rapport au redressement optique dans les cristaux, la largeur de la bande d'émission est généralement plus grande permettant d'obtenir des énergies d'impulsion plus élevées.

Les antennes photoconductrices peuvent fonctionner à la fois comme source et comme détecteur d'ondes THz. Elles se composent de deux bandes métalliques parallèles légèrement espacées, déposées sur un matériau semi-conducteur dont les porteurs de charge ont à la fois une courte durée de vie et une haute mobilité, comme le GaAs. On applique alors une tension de polarisation sur ces deux bandes métalliques et l'on envoie un bref *pulse* laser focalisé sur la zone située entre ces deux bandes, ce qui provoque un bref court-circuit. La variation du potentiel induit des oscillations rapides dans l'antenne, en particulier des ondes THz, sur une large bande de fréquences et de grands angles d'émission.

Les antennes photoconductrices peuvent également fonctionner en mode continu. On les éclaire par deux lasers mono-fréquence, ce qui module la conductivité du semi-conducteur avec une fréquence de battement égale à la différence de fréquences des deux lasers. Le potentiel électrique se trouve ainsi modulé, ce qui engendre des ondes THz de fréquence déterminée et accordable dans certaines plages de valeurs.

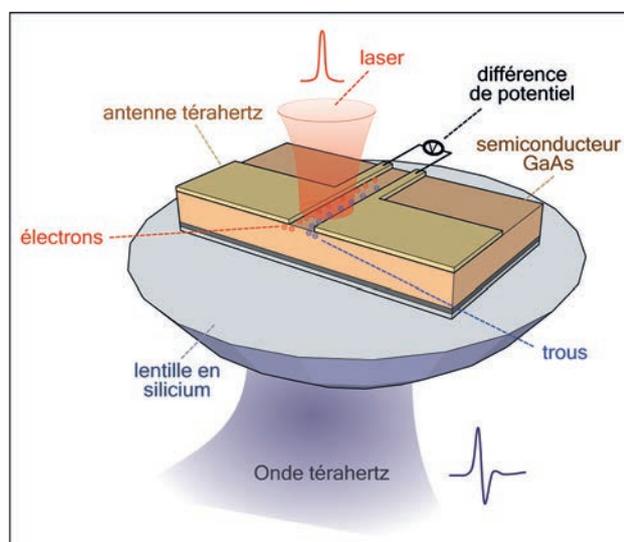


Figure 3 : Antenne photoconductrice. On éclaire avec un bref pulse laser le semi-conducteur, ce qui engendre des paires électrons-trous et provoque un bref court-circuit entre les deux bandes métalliques de l'antenne. Cette oscillation rapide du potentiel provoque une onde THz qui sera ensuite focalisée à l'aide d'une lentille en silicium – Source : réalisée par l'auteur.

Détecteurs

Un système THz doit être capable non seulement de produire, mais aussi de détecter et de mesurer ce rayonne-

ment. Plusieurs technologies de détecteurs sont en cours de développement, parmi lesquelles les diodes Schottky, les antennes photoconductrices, des détecteurs non linéaires ou de phase optique et des bolomètres.

La diode Schottky est une jonction métal semi-conducteur⁽⁸⁾. Sa vitesse de commutation est élevée et sa tension directe est faible, ce qui a permis de multiplier les applications dans la détection des signaux de haute fréquence. Étant des composants non linéaires, les diodes Schottky sont aussi utilisées comme mélangeurs dans la détection par battement de fréquences (hétérodyne).

Les antennes photoconductrices, citées auparavant comme sources THz, peuvent également fonctionner comme des détecteurs. Mais, dans ce cas, c'est l'onde THz qui engendre la tension aux bornes de l'antenne, ce qui génère un courant électrique qui est ensuite amplifié et mesuré. Comme la durée de vie des porteurs est courte, la détection du signal n'a lieu que pour des laps de temps courts. Un des défis technologiques actuels est de baisser le coût de fabrication de ces antennes en remplaçant l'épitaxie à jet moléculaire par le dépôt chimique en phase vapeur, procédé plus adapté à une production de masse.

Lorsqu'une onde THz et un rayonnement laser traversent un matériau non linéaire, ils peuvent interagir l'un avec l'autre, ce qui a pour conséquence une modification de la fréquence du laser (une addition ou une soustraction de fréquence avec l'onde THz), qui peut être détectée par des méthodes d'interférométrie.

Les bolomètres sont des détecteurs thermiques. Ils détectent le rayonnement électromagnétique par la chaleur générée lors de l'absorption. Ce principe s'applique également aux ondes THz, il faut cependant se rappeler que la conversion en chaleur ne mesure que l'énergie des impulsions et ne permet pas de disposer d'informations sur les longueurs d'onde ou les phases. Le bolomètre est par définition un dispositif de détection incohérent.

Dans certains cas particuliers, le dispositif THz peut être à la fois source et détecteur. Cela arrive quand l'onde sortante d'un laser traverse l'échantillon à mesurer, puis est réinjectée dans la cavité du laser, ce qui a pour résultat une modification du fonctionnement du laser laquelle peut se traduire par un signal mesurable. Un tel dispositif a été mis au point récemment, sur la base d'un laser à cascade pulsé.

Systèmes

Une méthode classique de spectroscopie est d'envoyer l'onde THz produite par la source à travers l'échantillon à mesurer, puis d'analyser l'amplitude de l'onde sortante à l'aide d'un détecteur.

Une technique plus élaborée est la spectroscopie dans le domaine temporel THz, où l'émetteur et le récepteur THz

(8) Les porteurs majoritaires du semi-conducteur sont injectés rapidement dans la bande de conduction du métal et deviennent ainsi des électrons libres. L'absence de recombinaison dans la région de barrière (à la différence de la jonction pn de diode classique) confère aux diodes Schottky des temps de commutation très brefs.

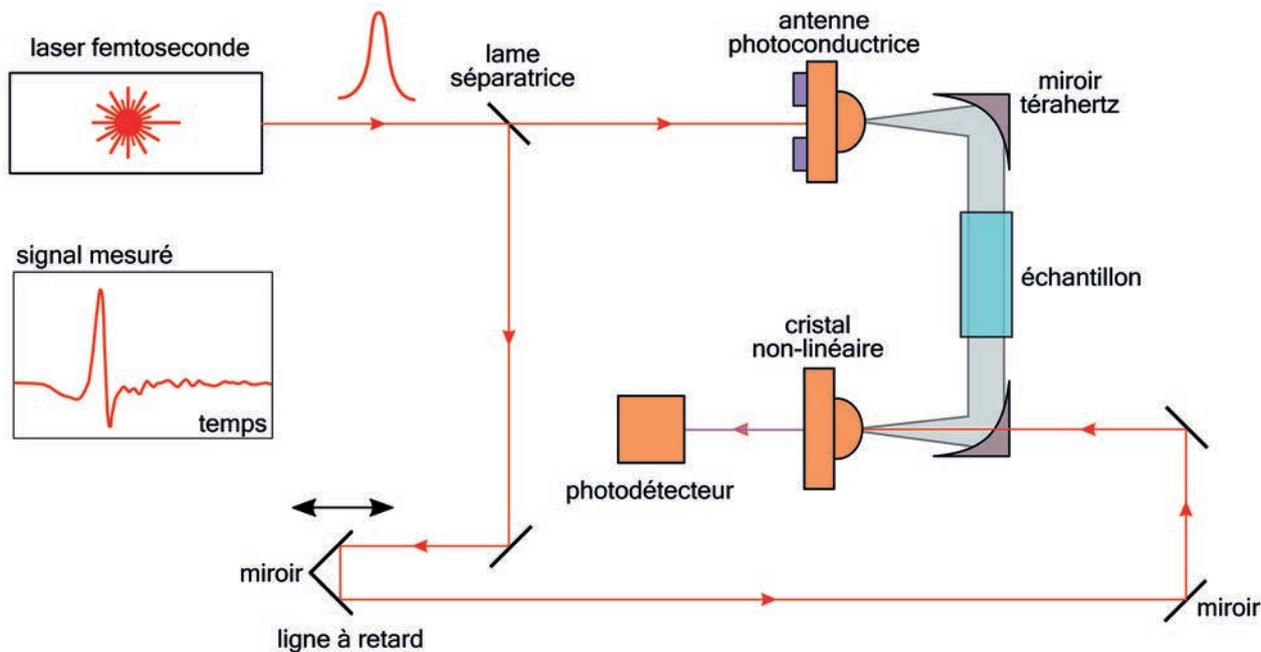


Figure 4 : Spectroscopie dans le domaine temporel. Un pulse laser ultra-court est envoyé sur une antenne photoconductrice, ce qui engendre des ondes THz, et après être passé par une ligne à retard, il arrive sur un cristal non linéaire. L'onde THz traverse l'échantillon, puis arrive sur le cristal non linéaire générant une modification légère de la fréquence du rayon laser. Cette modification est mesurée par le photodétecteur. Le déplacement du miroir permet de régler le délai, ce qui permet de mesurer la phase du signal, en plus de son amplitude – Source : réalisée par l'auteur.

sont étroitement couplés. La même impulsion optique, émanant d'un laser ultrarapide qui produit des ondes THz au niveau de la source, est également envoyée au détecteur après être passée par une ligne à retard, qui lui confère un délai variable. On effectue alors des mesures répétées à des délais différents. Ce système constitue une sonde à impulsions capable de mesurer non seulement des amplitudes mais également la phase de l'onde, ce qui donne des informations supplémentaires sur la nature des matériaux analysés.

Les applications industrielles des ondes THz

Les ondes THz ont été, dans un premier temps, utilisées en astrophysique ⁽⁹⁾. Elles permettent d'identifier de manière précise des molécules présentes dans l'espace, à travers leurs signatures spectroscopiques spécifiques qui se situent dans la bande de fréquences correspondant à ces ondes. Plus récemment, la spectroscopie THz a permis de mettre en évidence dans les nuages interstellaires des molécules organiques complexes liées à l'apparition de la vie.

Les propriétés remarquables de ces ondes (faible énergie photonique, forte absorption dans l'eau, fréquences correspondant aux signatures spectrales de nombreuses substances) les rendent particulièrement appropriées pour

de nombreuses applications industrielles, qui ont récemment commencé à se multiplier.

Biomédical

Faisant partie des rayonnements non ionisants, les ondes THz sont moins nocives pour les tissus vivants que les rayons X, ce qui les rend particulièrement adaptées à l'imagerie médicale, en particulier à la détection du cancer de la peau ou du sein, au repérage des caries dentaires, à l'évaluation de la gravité des plaies et des brûlures ⁽¹⁰⁾. Et ce d'autant plus que les ondes THz peuvent traverser les milieux diélectriques non conducteurs, comme les pansements médicaux.

Industrie

De nombreuses substances chimiques ont des signatures spectrales caractéristiques de la bande de fréquences THz. On peut alors utiliser les ondes THz pour détecter et identifier une contamination indésirable lors de la production de substances chimiques dans l'industrie pharmaceutique, ou dans l'industrie agroalimentaire pour vérifier la fraîcheur des aliments.

L'absorption des ondes THz par les molécules d'eau peut être mise en œuvre pour déterminer en temps réel la quantité d'eau dans les huiles lubrifiantes, qui représente un facteur important d'usure des pièces mécaniques.

La plupart des matériaux polymères sont transparents au rayonnement THz. Il est alors possible d'examiner la qualité des pièces en plastique extrudées ou collées dans

(9) Sur une grande partie du spectre THz, la longueur d'onde du rayonnement est inférieure au millimètre. C'est la raison pour laquelle on les appelle dans les applications astrophysiques les ondes submillimétriques.

(10) Les ondes THz sont fortement absorbées par l'eau, ce qui limite l'emploi de l'imagerie THz à l'exploration des tissus situés près de la surface du corps, ou pauvres en eau, comme les tissus adipeux.

divers produits de l'industrie du plastique ; les mêmes applications sont possibles dans l'industrie du papier.

Afin d'obtenir un recyclage de qualité, il est nécessaire de trier et séparer les différents types de plastiques collectés. Les ondes THz peuvent améliorer l'équipement de tri optique actuellement utilisé pour mieux identifier les différents types de résines plastiques présents dans les déchets.

Contrôle non destructif

L'imagerie THz peut servir dans le contrôle de la qualité des produits en matériaux composites, par exemple pour évaluer l'intégrité structurelle des éoliennes en identifiant dans des échantillons de polypropylène ou d'autres matériaux les zones présentant des teneurs en fibres différentes.

De même, les composites à base de polymères de bois, sensibles à l'absorption d'eau, peuvent être examinés par spectroscopie THz afin de surveiller leur teneur en eau. Suivant le même principe, on peut évaluer l'humidité ou l'épaisseur du papier, en mesurant l'atténuation de l'onde THz qui le traverse.

Un emballage en carton ou en plastique est transparent vis-à-vis des ondes THz, ce qui permet dans le domaine du conditionnement des produits de détecter les articles défectueux et les objets étrangers, et de vérifier après transport que le produit emballé n'a pas été endommagé.

Dans le même registre, les ondes THz peuvent permettre de détecter, avec une résolution inférieure à 1 mm, des contaminants potentiellement dangereux dans les aliments : morceaux de plastique, bois, verre, pierre ou métal.

L'inspection des infrastructures vieillissantes comme les oléoducs ou les gazoducs peut être réalisée à l'aide des ondes THz, qui sont capables de détecter les taches de corrosion situées à la surface de pipelines recouverts de matériaux isolants de divers types, comme la laine minérale ou la mousse d'uréthane.

L'imagerie THz à grande surface a déjà été utilisée pour identifier d'éventuels défauts présentés par le réservoir externe de la navette spatiale, les ondes THz étant capables de traverser le revêtement de mousse qui couvre le réservoir sur une profondeur de 20 cm.

Enfin, les ondes THz peuvent également être utilisées dans l'analyse matérielle et la conservation d'œuvres d'art (peintures, manuscrits, trouvailles archéologiques).

Télécommunications

Les fréquences élevées des ondes THz les rendent particulièrement appropriées pour le déploiement de systèmes de télécommunications de très haut débit et à faible latence. Ces bandes de fréquences n'ont d'ailleurs pas encore été attribuées. Cependant, la forte atténuation des ondes THz dans l'atmosphère, due à la présence de vapeur d'eau et de l'oxygène, les rendent peu adaptées pour les télécommunications à longue distance. Les applications visées sont plutôt celles se rattachant aux réseaux de très haut débit et de courte portée à l'intérieur des bâtiments, notamment celles nécessaires au déploiement de la 6G ou de l'Internet des objets.

Agriculture

La forte absorption dans l'eau des ondes THz les rend particulièrement appropriées comme outils de mesure et de surveillance de la teneur en eau des tissus végétatifs, avec des applications dans le domaine du *monitoring* de l'irrigation des cultures.

Défense et sécurité

L'imagerie THz est déjà utilisée dans les aéroports pour les contrôles de sécurité visant à détecter la présence d'armes dissimulées ; elle constitue une alternative aux systèmes à micro-ondes ou à rayons X.

La spectroscopie THz peut également être utilisée pour la détection de matières explosives, en particulier des explosifs de fabrication artisanale, ou encore pour la détection des substances chimiques illicites.

La forte atténuation des ondes THz lors de leur propagation à l'air libre, due à la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère, réduit leur portée à des valeurs étant de l'ordre du kilomètre. Néanmoins, cette courte portée peut constituer un atout en rendant plus difficile l'interception par l'ennemi des communications confidentielles échangées entre les diverses unités armées, en particulier entre les navires de guerre.

Leur marché

Le marché des technologies THz se divise en quatre domaines : les sources d'ondes THz, les détecteurs, les systèmes et les composants. Son volume annuel mondial est actuellement de 450 millions d'euros ; il devrait dépasser les 2 milliards d'euros en 2027, avec un taux de croissance de 25 % par an⁽¹¹⁾.

Il est dominé par plusieurs entreprises :

- Menlo Systems, un *spin-off* de l'Institut Max Planck, qui fabrique de nombreux produits depuis les antennes et composants THz jusqu'aux systèmes complets de spectroscopie THz.
- TeraView, un *spin-off* de l'Université de Cambridge, qui produit des équipements d'imagerie et de spectroscopie THz pour la mesure et l'analyse des couches de peinture, des matériaux composites, des circuits intégrés ou des médicaments.
- Microtech Instruments (aux États-Unis), qui fabrique des instruments de mesure pour les applications d'imagerie et de spectroscopie ultra-rapides au laser, Raman, multi-photons et THz.
- Advantest (Japon), qui fabrique des équipements de test automatique pour l'industrie des semi-conducteurs et des instruments de mesure destinés à être intégrés dans des systèmes électroniques, à base de fibre optique ou recourant aux communications sans fil ; certains d'entre eux font appel à des technologies THz.

Parmi les acteurs THz, figurent également les sociétés Advanced Photonix, Traycer, Terasense et Insight Product

(11) Industry Research, Rapport "Global Terahertz (THz) Technology Market Size, Status and Forecast 2021-2027".

aux États-Unis, Digital Barriers et QMC Instruments au Royaume-Uni, Gentec Electro-Optics au Canada et Toptica Photonics en Allemagne.

Les grands groupes industriels détiennent 36 % des parts de marché et sont actifs sur toute la chaîne de valeur de la filière THz, les entreprises de taille intermédiaire en détiennent, quant à elles, 37 % et les PME 27 %, ces dernières focalisant leur effort de R&D sur les sources et les détecteurs.

En Europe, le marché est orienté vers le secteur des systèmes THz et a pour cible la détection des objets et des défauts sur de grandes surfaces, la mesure des épaisseurs et la caractérisation chimique et structurale de petits objets et défauts sur de petites surfaces ou volumes.

La R&D THz en France

Il existe en France une tradition de recherche dans le domaine des ondes millimétriques et THz, liée au développement des applications en télécommunications de l'industrie de la Défense.

Un groupement de recherche, NanoTeraMir, fédère environ 28 laboratoires et 7 entreprises dans le domaine des fréquences THz et infrarouges moyens, mais aussi dans celui des nanosciences et des nanotechnologies. Parmi les entreprises participantes à ce groupement, peuvent être citées : III-VLab (opto et microélectronique), Thales (Défense), Lynred (détecteurs infrarouge), Nethis (contrôle non destructif), Minatec (micro et nanotechnologies), Kapteos (mesures électromagnétiques), Terakalis (détecteurs, systèmes) ou encore Mirsense (lasers à cascade quantique).

Plusieurs *start-ups* ont été créées, que nous avons déjà citées pour certaines : Lytid (sources THz), Teratonics (détecteurs, systèmes), Selenoptics (composants et fibres optiques) ou Terakalis (détecteurs, systèmes).

Il faut également souligner la mise en place récente d'une chaire industrielle Thales-ENS afin d'accélérer le développement des détecteurs pour les communications THz.

Cependant, ce domaine est dominé en Europe, par l'Allemagne. Dans l'initiative européenne Teraflag, qui fait intervenir une centaine d'universités et organismes de recherche, 17 sont allemands, 18 britanniques et 10 français. Sur les 41 PME participantes, 11 sont allemandes et seulement 2 sont françaises. Enfin, sur les 20 grands groupes, 11 sont allemands et 2 français.

Conclusion

Les ondes THz sont un domaine d'avenir avec un fort potentiel d'applications industrielles et un marché en plein développement. Il subsiste cependant plusieurs obstacles technologiques à franchir. Des progrès restent à faire en termes de performance des dispositifs et de coût de fabrication, afin de permettre une industrialisation à grande échelle.

Bibliographie

- DHILLON S. S. *et al.* (2017), "The 2017 terahertz science and technology roadmap", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50.
- CHATTOPADHYAY G. (2011), "Technology, Capabilities, and Performance of Low Power Terahertz Sources", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* 1.
- LEWIS R. A. (2019), "A review of terahertz detectors", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 52.
- GARBACZ P. (2016), "Terahertz Imaging – Principles, Techniques, Benefits and Limitations", *Problemy Eksploatacji* 100.
- WIETZKE S. *et al.* (2009), "Industrial applications of THz systems", *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* 7385.

Des ondes non ionisantes électromagnétiques (ONIE) à toutes les étapes du processus productif dans le secteur de l'agroalimentaire

Par Hervé FLOCH et Patrice GAMAND

Pôle de compétitivité ALPHA – Route des Lasers & Hyperfréquences – ALPHA – RLH

Et Clément DAIGNAN, Nicolas PICARD et Laure SANDOVAL

SANODEV

Le secteur agroalimentaire est en pleine évolution pour prendre en compte la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires, la sortie du glyphosate, le suivi des cultures en temps réel et la numérisation de l'agriculture, tout cela dans un contexte de changement climatique. Afin de répondre aux exigences de protection des cultures, de conservation, de décontamination et de préservation des saveurs, tout en assurant l'innocuité du produit final pour le consommateur et en respectant l'environnement, le recours aux technologies dites physiques se révèle tout à fait pertinent. Les ultraviolets et plus particulièrement les UVC, les micro-ondes (3 - 300 GHz) notamment, ont la capacité de répondre à ces besoins. Nous montrons dans cet article les effets des micro-ondes sur le développement foliaire des plantes, conduisant ainsi à une solution de désherbage. Nous mettons également en évidence le fait que la lumière UV pulsée permet une décontamination des légumes ou des fruits offrant ainsi une solution de conservation efficace, économique et durable. De même, nous montrons que la modernisation des techniques agricoles motivée par un souci d'optimisation des ressources, des coûts et des rendements, s'appuie sur la mise en jeu des technologies de radiocommunications et d'imagerie. Les ondes radiofréquences permettent l'utilisation et le déploiement de capteurs communicants de type IoT et de suivre en temps réel des paramètres de pilotage des cultures. Les techniques d'imagerie sont également une aide précieuse pour l'étude de certains phénomènes comme le stress hydrique des cultures ou les maladies. Est également mis en évidence le fait que les ondes non ionisantes contribuent fortement à la transition écologique soit en appui au désherbage en évitant le recours aux produits phytosanitaires, soit au travers de solutions de décontamination et de désinfection ne recourant pas à l'emploi de produits chimiques. Les défis à venir concernent aussi les aspects formation des acteurs de la filière et surtout l'évolution du modèle économique de celle-ci.

Introduction

Dans le secteur agroalimentaire, les attentes ont évolué. L'interdiction des produits phytosanitaires est en cours, notamment à travers le plan de réduction des produits phytosanitaires et de sortie du glyphosate. La grande distribution, face à l'avènement d'applications comme Yuka (l'application mobile qui scanne vos produits alimentaires pour en connaître la composition), a décidé de revoir la

formulation de certaines de ses recettes en excluant certains conservateurs et produits présentant un risque ou un danger sanitaire.

La prise en compte croissante des effets néfastes à court, moyen et long termes de l'utilisation des produits chimiques sur l'environnement, que ce soit directement (sol, air, humain) ou indirectement (pollution des eaux), favorise l'adoption de procédés alternatifs.

Les dynamiques de changement climatique en cours font également apparaître de nouvelles problématiques culturelles, avec notamment la colonisation de certains biotopes par des espèces invasives nouvelles (végétales ou animales).

Afin de répondre aux exigences de protection des cultures, de conservation et de décontamination des produits, de préservation des saveurs, tout en assurant l'innocuité du produit final pour le consommateur et en respectant l'environnement, le recours aux technologies dites physiques se révèle tout à fait pertinent.

Les ultraviolets et plus particulièrement les UVC⁽¹⁾, les micro-ondes notamment, ont la capacité de répondre à ces besoins.

Depuis les phases de culture jusqu'au conditionnement final des produits (bruts ou transformés), une solution efficace, économique et durable existe.

Ces technologies physiques permettent d'améliorer l'extraction pour les composés volatiles.

Pour la conservation des fruits, les UVC s'avèrent adaptés, car ils les traitent en surface sans modifier leurs propriétés organoleptiques. Pour la conservation des céréales, les micro-ondes présentent des avantages très intéressants en ce qui concerne le traitement en masse de ces produits et leur préservation.

Au-delà des procédés, la modernisation des techniques agricoles motivée par un souci d'optimisation des ressources, des coûts et des rendements, s'appuie sur la mise en jeu des technologies de radiocommunications et d'imagerie. Les ondes radiofréquences ont fait leur apparition dans l'agriculture au sens large et dans l'agroalimentaire en particulier, avec l'arrivée de capteurs communicants il y a une quinzaine d'années. Les technologies de communications sans fil permettent de transmettre les données enregistrées par les capteurs vers des terminaux mobiles ou fixes. Il est alors possible de connaître en temps réel un certain nombre de paramètres (l'humidité locale, la température locale...) et également de transmettre des images, ce qui permet d'être informé sur l'état des cultures et d'en optimiser le rendement. Parmi les standards de communication, nous pouvons citer le WiFi, les réseaux cellulaires ou les réseaux propriétaires comme SigFox (opérateur télécoms de l'Internet des objets – IoT). L'introduction de systèmes de localisation dans les équipements agricoles, comme le GPS, permet également une optimisation des opérations réalisées sur les cultures pour un compromis optimum entre rendement et coût. Les technologies de l'imagerie sont, quant à elles, des alliées précieuses pour établir un diagnostic sanitaire macroscopique des cultures (imagerie satellitaire), mais également pour réaliser une analyse microscopique pour anticiper l'apparition de maladies chez les plantes.

Dans cet article, nous développerons, dans une première et une seconde partie, l'utilisation des ondes hyperfréquences et de la lumière ultraviolette UVC pour les

cultures et dans le secteur de l'agroalimentaire. Dans une troisième partie, nous décrirons l'intérêt de l'utilisation de l'imagerie dans ces mêmes secteurs. Nous concluons en brossant un tableau des enjeux et défis à relever en matière d'utilisation des ondes non ionisantes par la filière agricole, notamment l'agroalimentaire.

Utilisation des ondes hyperfréquences

La possibilité de détruire par micro-ondes des graines et plantes parasites, en remplacement de l'épandage d'herbicides, a été explorée dès le début des années 1970⁽²⁾.

Il s'agissait de détruire, avant ensemencement, les graines et les jeunes pousses de plantes non souhaitées, afin de donner à la plante utile une avance suffisante sur la réapparition des premières par voie éolienne.

Les tissus végétaux sont très sensibles à l'effet thermique des UHF. Ainsi, des feuilles de haricot mexicain *Prosopis glandulosa* Torr soumises à une température de 46°C dans un four classique ne montrent aucune lésion, alors qu'elles subissent une détérioration de 78 % exposées à la même température, obtenue cette fois par micro-ondes en seulement 6 secondes [5].

De même, le pouvoir germinatif de la graine du haricot *Phaseolus vulgaris* n'est pas affecté par un échauffement de 27 à 50°C résultant d'un placement dans un bain d'eau, mais décroît de 62 % si le même échauffement est obtenu par micro-ondes. L'interprétation de ce résultat n'est pas clairement établie, même il s'agit plus vraisemblablement d'effets d'absorption préférentielle en certaines zones de la graine, conduisant à des températures locales bien supérieures à la température moyenne.

Le problème consiste à atteindre la graine ou la racine, à travers une épaisseur variable d'une terre de composition également variable et habitée d'une faune et d'une flore, dont la présence est, elle aussi, souhaitée.

Il faut toutefois souligner que le facteur de dissipation est très largement dépendant de la nature du sol et de son taux d'humidité.

Le flux d'énergie nécessaire pour bloquer la germination a fait l'objet de diverses estimations : il varie de 100 à 1 600 J.cm⁻² et se situe en moyenne à environ 800 J.cm⁻² [6] et [7]. Il a été évalué à seulement à 183 J.cm⁻² sur la base d'essais de terrain réalisés à Freeport (Floride) [8]⁽³⁾.

(2) F. Davis et R. Menges du service de recherche agricole de l'UDA à Welasco (Texas), J. Wayland de l'Université d'agriculture et mécanique du Texas à College Station, M. Merkle de la société Phytocorp. A College Station et R. Robinson de la First American Farms de Freeport (Floride) [1], [2], [3], [4].

(3) À titre d'exemple, un applicateur de 1 kW se déplaçant à la vitesse de 1,5 km/h et muni d'un système rayonnant générant un champ constant sur 40 cm dans le sens du déplacement, soumettrait une graine de 1 cm² de section, enfouie à 2,5 cm de profondeur, dans un sol organique, à un flux correspondant à 93,2 % de la puissance incidente, soit 932 W pendant une seconde, c'est-à-dire une énergie de 932 J, et, dans un sol minéral, à un flux équivalent à seulement 28,4 % de la puissance incidente, soit une énergie de 284 J.

(1) UV les plus énergétiques, d'une longueur d'onde comprise entre 200 et 280 nm.

La molécule d'eau est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. La différence d'électronégativité entre ces deux constituants lui confère un caractère dipolaire : ainsi, la molécule d'eau s'oriente suivant la direction d'un champ électrique extérieur. Soumise à un champ électromagnétique, la molécule pivote sans cesse et cette agitation induit une production de chaleur, et donc une élévation de la température.

L'action est analogue pour des molécules plus complexes, comme les lipides ou les composés aromatiques. Au niveau de la plante, et plus particulièrement des parties aériennes qui sont les premières exposées, cette augmentation de la température entraîne la mort de la plante, par hyperthermie. Le phénomène est le même pour le système racinaire qui est néanmoins plus difficile à atteindre du fait de l'écrantage du sol.

La Figure 1 ci-dessous montre l'augmentation de la température d'un plant exposé à un rayonnement micro-ondes. La température qui dépasse les 60°C entraîne la lyse cellulaire et donc la mort du plant.

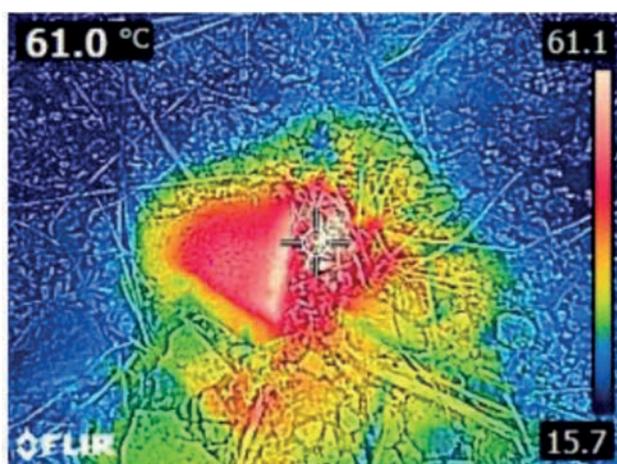


Figure 1 : Observation de l'augmentation de la température d'un plant exposé à un rayonnement micro-ondes – Source : SANODEV.

Les effets du stress électromagnétique induits sur la plante sont ainsi à rapprocher des effets du stress hydrique.



Figure 2 : Exemple de traitement par micro-ondes : AV = le plant avant irradiation ; AP = le plant après irradiation – Source : SANODEV.

En France, à la suite de travaux menés par le CERT-ONERA de Toulouse, des essais sur le terrain débutèrent en octobre 1977 au domaine de Pouyemenjon à Solferino (Landes). Le prototype de désherbage utilisé, mis au point par la société AUHFA, a été monté sur un tracteur dont la prise de force entraînait un alternateur. Les transformateurs et redresseurs de haute tension se trouvaient dans une armoire placée derrière le siège du conducteur ; les magnétrons et leurs dispositifs de refroidissement, ainsi que les isolateurs, étaient installés dans un coffre à l'avant du véhicule. De ce coffre sortaient des guides flexibles alimentant des cornets émetteurs. La puissance installée était de 10 kW et la vitesse de l'ordre de 1,5 km/h. Le désherbage a été efficace pendant un an sur une profondeur de 10 cm.

La Figure 2 ci-après donne un exemple de traitement par micro-ondes : on observe une dégradation de la partie foliaire.

Utilisation de la lumière ultraviolette

Une alternative à des méthodes conventionnelles de protection des plantes source de dommages importants

Dans leur environnement naturel, les plantes sont soumises à de nombreux stress. Ils peuvent être abiotiques (vent, gel, grêle...) ou biotiques (virus, champignons, insectes...).

Actuellement, la maîtrise de ces stress passe en agriculture conventionnelle par l'utilisation de produits phytopharmaceutiques. Cependant, de nombreuses études comme le contexte actuel montrent que l'utilisation systématique et abusive de certains de ces produits est à l'origine d'effets négatifs sur la santé et sur l'environnement, et s'accompagne de la présence de résidus indésirables dans les fruits et les légumes (Urban *et al.*, 2018).

Les stimulateurs des défenses naturelles, aussi appelés éliciteurs, semblent représenter une méthode de lutte alternative intéressante. Les éliciteurs agissent sur la plante en induisant une résistance *via* la synthèse de molécules de défense. De nombreuses molécules peuvent être ainsi concernées (formes actives d'oxygène, hormones, acide jasmonique, éthylène, acide abscissique) (M. C. Dufour, 2011).

De par leur action, ces molécules élicitrices peuvent jouer un rôle sur :

- la sensibilité spécifique de la plante à un agent pathogène ;
- le renforcement des cellules pour limiter le développement de l'agent pathogène ;
- l'agent pathogène directement ;
- les cellules de la plante.

Naturellement, plusieurs facteurs peuvent influencer la synthèse des molécules de défense (Dat *et al.*, 2000) :

- le stress hydrique : il limite directement la photosynthèse par la fermeture des stomates et favorise, par conséquent, la synthèse de formes actives de l'oxygène dans les chloroplastes ;
- les températures froides ;
- l'exposition aux hautes températures ;
- les métaux lourds ;
- les radiations UV ;
- le stress physique et mécanique que subit la plante ;
- une attaque par des agents pathogènes et ravageurs.

Les défenses des plantes peuvent également être stimulées par des facteurs physiques, comme des blessures ou des expositions aux UVC.

Les méthodes physiques d'élicitation, telles que l'application de rayonnements UV, ont l'avantage de pouvoir être utilisées en plus des méthodes conventionnelles existantes et d'être indépendantes des conditions exogènes.

Les effets des UV sur les végétaux

Sur Terre, la croissance des plantes est possible grâce à la protection offerte par la couche d'ozone (O₃), qui joue le rôle d'un écran vis-à-vis des rayonnements UV les plus énergétiques au niveau de la stratosphère : elle absorbe les rayons solaires UVC et une partie des rayonnements UVB.

Une des conséquences de l'application des rayons UV sur les plantes est la génération d'un stress oxydatif (Costa *et al.*, 2002) à la suite de la formation des espèces réactives oxygénées qui peuvent altérer les lipides, les pigments, les protéines et même les acides nucléiques (Dai *et al.*, 1997).

Les rayonnements UV de type A (315 à 400 nm) sont moins néfastes que les rayonnements UVB et UVC sur les plantes (Barta *et al.*, 2004).

Certains articles soulignent l'effet néfaste des rayonnements UV sur la production de la matière fraîche et sur le nombre de feuilles, dû aux dommages occasionnés aux voies photosynthétiques (Krizek *et al.*, 1998), quand d'autres mentionnent la biosynthèse d'anthocyanes, qui absorbent les UV dans le spectre de la photosynthèse et réduisent ainsi la capacité photosynthétique des feuilles, donc leur croissance (Tsormpatsidis *et al.*, 2007).

Un autre effet potentiel serait la production progressive de métabolites secondaires qui entreraient en compétition directe avec la plante pour l'assimilation du carbone qui est nécessaire à sa croissance.

Un travail mené par Mahdavian *et al.* (2008) sur le *Cap-sicum annuum* L., un piment d'ornement, montre l'im-

portance de l'accumulation des flavonoïdes, notamment la quercétine, en réponse aux effets d'une exposition de 27 minutes par jour, durant 14 jours, à des rayonnements d'UVA (320-390 nm), d'UVB (312 nm) et d'UVC (254 nm), correspondant respectivement à des doses de 6,1, 5,8 et 5,7 W.m².

Les UVC émis à faible dose semblent stimuler les défenses des végétaux

Les UV émis à des doses hormonales (doses hormiques) activent les mécanismes de défense naturelle des plantes (UVC ; Urban *et al.*, 2018), notamment chez la vigne (Xi *et al.*, 2014). En effet, soumises à une exposition soudaine et intense aux radiations UV, les plantes réagissent en synthétisant des ROS (Reactive Oxygen Species ou espèces réactives d'oxygène), qui sont des acteurs vérifiés des mécanismes de défense des plantes vis-à-vis des maladies et des ravageurs. La synthèse de ces molécules implique les voies métaboliques de défense, comme la synthèse de métabolites secondaires (Lamb et Dixon, 1997).

Les radiations UVB (280-315 nm) ont été identifiées comme permettant d'augmenter la résistance des feuilles des plantes aux attaques des agents pathogènes. Mais une période de rayonnement de plusieurs jours, ce qui représente un temps relativement long, est nécessaire pour que leur action soit efficace (Demkura et Ballaré, 2012).

Du fait de leur faible longueur d'onde, les rayons UV de type C (200-280 nm) sont plus énergétiques que les UVB. Ils sont arrêtés au niveau de la couche d'ozone par un mécanisme réactionnel de photolyse des molécules d'oxygène. Ils permettent de stimuler le métabolisme secondaire, notamment la synthèse de composés phénoliques tels que les flavonoïdes, les phytoalexines, les stilbènes ou le resvératrol. Des études ont montré l'accumulation de phytoalexines dans la peau d'éléments végétaux ayant fait l'objet d'un traitement UVC.

Plusieurs études réalisées par des précurseurs ont en particulier mis en évidence l'effet des UV sur la stimulation des défenses des plantes, des fruits et des légumes. Charles et ses co-auteurs ont montré, en 2008, qu'une exposition aux UV de type C stimulait la défense des tomates, après leur récolte, contre la pourriture causée par le *Botrytis cinerea*, un champignon microscopique. Par ailleurs, Demkura et Ballaré ont, en 2012, mis en évidence une voie de défense des plantes du genre *Arabidopsis* contre ce même champignon, quand celles-ci sont exposées à des rayons UV de type B (280 à 315 nm).

De nouvelles études ont montré que coupler UVC et UVB permettrait d'élargir les mécanismes de défense induits. Ces deux types d'UV pourraient en effet stimuler des voies de synthèses différentes et ainsi permettre une stimulation plus large et plus efficace de la plante vis-à-vis de ses agresseurs.

Les UVC à haute dose détruisent les organismes

Les rayons UVC sont des rayonnements électromagnétiques de très haute énergie, dont le spectre de longueur d'onde s'étend de 200 à 280 nm. Les rayonnements avec une longueur d'onde de 254 nm sont utilisés pour leurs

propriétés germicides, en particulier bactéricides (Bank *et al.*, 1990). Ils agissent par dénaturation de l'ADN des micro-organismes.

Les résultats d'études montrent une diminution significative des teneurs en chlorophylle « a », en chlorophylle « b » et en chlorophylle totale de plantes soumises à des rayonnements UV – mais seulement sous l'effet des rayonnements UVB et UVC –, par comparaison avec celles des plantes témoins. Cette inhibition est plus marquée pour les plantes exposées aux rayonnements UVC.

Des effets similaires sont notés pour les caroténoïdes, avec des diminutions de 11 et de 20 % observées chez les plantes exposées respectivement aux UVB et aux UVC. Par ailleurs, les caroténoïdes jouent un rôle protecteur des plantes contre les rayonnements UVB (Rau *et al.*, 1991) et les rayonnements UVC (Campos *et al.*, 1991).

La réduction des pigments chlorophylliens a un effet négatif sur l'efficacité de la photosynthèse et, de fait, sur l'accumulation de la biomasse laquelle sert ainsi d'indicateur de la sensibilité aux rayonnements UVB (Smith *et al.*, 2000).

Utilisation des techniques d'imagerie

Les systèmes à base de caméras optiques et hyper-spectrales sont munis de capteurs de lumière (dans la gamme des fréquences visibles, infrarouge, térahertz – 100 GHz à 30 THz), qui transforment l'intensité lumineuse en courant/tension électriques restitués sous forme de pixels. Les images sont alors traitées et analysées en utilisant des algorithmes sophistiqués pour déterminer, par exemple, le stress hydrique des cultures, certaines maladies comme la flavescence dorée dans les vignobles, les rendements de cultures ou le jaunissement de parcelles. La Figure 3 ci-dessous montre une cartographie de parcelles réalisée par imagerie représentant les effets de jaunissement des cultures.

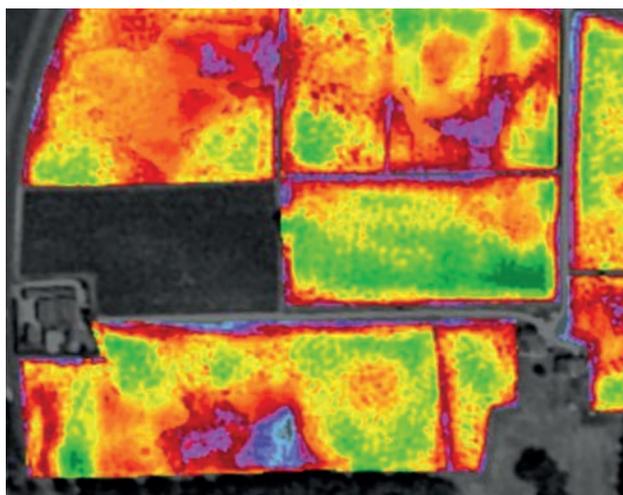


Figure 3 : Exemple typique d'une cartographie réalisée à partir de relevés opérés par caméras pour étudier le jaunissement des cultures – Source : SANODEV.

Ces caméras sont embarquées sur des drones ou des robots, ce qui permet de réaliser une cartographie aérienne des parcelles. Une localisation par GPS permet ensuite de déterminer avec précision les zones objet de la recherche.

La technologie lidar (télé-détection par laser) est également utilisée dans le domaine de l'agriculture. Un lidar est un système optoélectronique composé d'un émetteur laser, d'un récepteur comprenant un collecteur de lumière (dispositif optique) et d'un photodétecteur qui transforme la lumière en signal électrique, ainsi que d'une chaîne électronique de traitement du signal qui extrait l'information recherchée. Des relevés de l'état des forêts et des végétations, ou informant sur le niveau de rendement de certaines cultures, comme montré dans la Figure 4 ci-dessous, sont obtenus grâce à cette technologie.

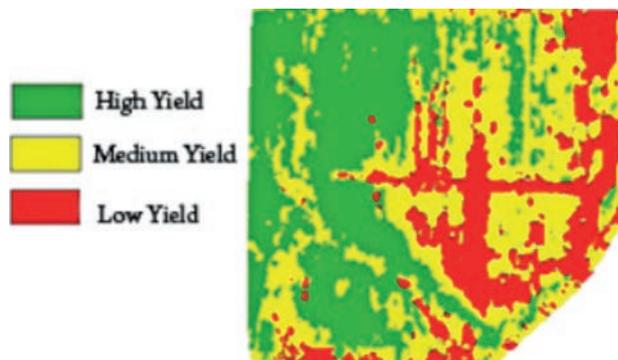


Figure 4 : Cartographie de rendement sur une parcelle obtenue par technique lidar – Source : SANODEV.

Ainsi, il existe plusieurs techniques faisant appel à la technologie d'imagerie. Dans tous les cas, elles nécessitent de faire appel à des algorithmes de traitement des données pour mettre en évidence les facteurs que l'on souhaite suivre.

Conclusion : les défis à relever

Les technologies joueront certainement un rôle important dans l'agriculture de demain, et plus particulièrement dans l'industrie agroalimentaire. La maîtrise des ondes hyperfréquences ou des rayonnements UV permet de proposer des solutions pour, par exemple, se passer des produits chimiques ou des conservateurs qui peuvent s'avérer être des perturbateurs endocriniens. Pour ce faire, l'agriculture numérique, dite de précision, nécessite le déploiement à grande échelle des technologies de radiocommunications et d'imagerie. Outre ces défis techniques, il est nécessaire pour pouvoir utiliser ces outils de former les agriculteurs et d'éduquer les consommateurs sur les potentialités et les précautions d'usage de telles ondes. Il est également important de rechercher des solutions à faible consommation d'énergie, à rayonnement dirigé et protégé, et sans impact sur l'environnement.

Les ondes non ionisantes permettront ainsi de contribuer à une transition écologique, soit en appui au désherbage en évitant le recours aux produits phytosanitaires ou encore au travers de solutions de décontamination et de désinfection ne recourant pas à l'emploi de produits chimiques. Toutefois, le coût de l'utilisation des ondes non ionisantes et des technologies associées reste un enjeu important au regard du modèle économique de la filière agricole, surtout dans l'agroalimentaire.

Le pôle de compétitivité ALPHA – Route des Lasers & Hyperfréquences®

ALPHA – RLH est un pôle de compétitivité *Deep Tech* de classe internationale basé en Nouvelle-Aquitaine rassemblant quelque 300 adhérents. Parmi ses membres, le pôle compte plus de 220 entreprises *high tech* et une cinquantaine d'organismes et d'établissements de recherche, de formation et/ou de transfert de technologies autour de sept domaines d'activité stratégiques (DAS) : trois DAS socles technologiques – « Photonique – Laser » et « Électronique – Hyperfréquences » et un nouveau DAS (en émergence) structuré autour des « Matériaux » pour la photonique et l'électronique – et quatre DAS orientés marché : « Communication – Sécurité » ; « Santé – Dispositifs médicaux – Autonomie » ; « Aéronautique – Spatial – Défense » et « Énergie – Bâtiment intelligent ». Enfin, le pôle s'appuie également sur un domaine d'activité transverse : « IoT – Industrie du futur ».

Pour autant ces domaines applicatifs ne sont évidemment pas les seuls concernés par les technologies « électronique et photonique » associées au numérique, au caractère très diffusant et constituant le cœur de l'expertise du pôle. Les transports, l'agroalimentaire, la cosmétique, le textile et l'économie circulaire, pour ne citer qu'eux, sont des secteurs qui regorgent de nombre de défis à relever, auxquels les membres du pôle savent répondre en proposant des solutions technologiques innovantes. L'entreprise SANODEV basée à Limoges est le parfait exemple de ces pépites utilisant les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (ONIEA) au bénéfice notamment du secteur agroalimentaire ⁽⁴⁾.

(4) Pour en savoir plus sur le pôle ALPHA – RLH : <https://www.alpha-rlh.com/fre>

Références

[1] DAVIS F., WAYLAND J. & MERKLE M. (1971), "Ultra-high-frequency electromagnetic fields for weed control: phytotoxicity and selectivity", *Science* 173, pp. 535-537.

[2] DAVIS F., WAYLAND J., ROBINSON C. & MERKLE M. (1973), "Phytotoxicity of UHF electromagnetic fields", *Nature* 241, pp. 291-292.

[3] WHATLEY T., WAYLAND J., DAVIS F. & MERKLE M. (1973), "Effects of soil moisture on phytotoxicity of microwave fields", *Proceedings of the Weeds Science Society Symposium* 26, p. 389.

[4] MENGES R. & WAYLAND J. (1974), "UHF electromagnetic energy for weed control in vegetables", *Weed sci.* 22, n°6, pp. 584-690.

[5] WAYLAND J., DAVIS F., YOUNG L. & MERKLE M. (1972), "Effects of UHF fields on plants and seeds of mesquite and beans", *J. Microw. Power* 7, n°4, pp. 385-388.

[6] OLSEN R. (1975), "A theoretical investigation of microwave irradiation of seeds in soil", *J. Microw. Power* 10, n°3, pp. 281-296.

[7] MENGES R. & WAYLAND J. (1974), "UHF electromagnetic energy for weed control in vegetables", *Weed Sci.* 22, n°6, pp. 584-590.

[8] WAYLAND J., MERKLE M., DAVIS F., MENGES R. & ROBINSON R. (1975), "Control of weeds with electromagnetic fields", *Weed Res.* 15, pp. 1-5.

La génodique : de l'émergence d'un nouveau champ scientifique à sa validation sur le terrain, puis sur celui académique

Par Pedro FERRANDIZ
Genodics

Dans cet article, est décrite l'histoire d'une découverte dont les effets concrets sont observables et répétés, mais dont s'est détournée pendant des décennies la curiosité des cercles académiques, du fait de son étrangeté et de l'insuffisante élucidation des phénomènes en cause. En parallèle, la Chine et l'Inde, pour ne citer que ces pays, ont développé des dispositifs similaires à grande échelle, sans être plus avancées, voire peut-être en l'étant encore moins dans la compréhension profonde desdits phénomènes. À travers le récit de cette histoire, se pose la question des modes de reconnaissance des ruptures en matière de connaissance scientifique. Ce récit montre aussi que les sciences sont avant tout une aventure humaine.

Introduction

En juin 1992, François Gros, alors secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, déclara à Joël Sternheimer, docteur en physique théorique depuis 1966, que ses travaux avaient peut-être trente ans d'avance. Trente ans plus tôt, Moshé Flato de l'équipe de Louis de Broglie à l'Institut Henri Poincaré envisageait une relation entre les masses des particules élémentaires. Il incita alors Sternheimer à travailler sur cette question et une formulation de cette relation fut proposée ⁽¹⁾. Ce fut le point de départ des travaux de Sternheimer qui seront ensuite supervisés par André Lichnerowicz ⁽²⁾. L'indépendance institutionnelle lui paraissant nécessaire pour pouvoir mener des recherches originales, il devient chercheur indépendant. Il dépose un premier brevet en 1985, puis un second en 1992 ⁽³⁾ qui por-

tait sur l'**existence de phénomènes ondulatoires** participant de la synthèse des protéines, laquelle est transposable à des fréquences audibles par l'être humain.

La « génodique », qui regroupe ces différents concepts, apparut alors comme l'embryon d'un nouveau champ scientifique. Sternheimer fut dès lors soutenu et aidé par une quarantaine d'amis scientifiques, dont notamment les biologistes Marie-Claude Lang et Vincent Bargoin qui apportèrent des contributions séminales.

La première transposition audible d'une séquence d'acides aminés d'une protéine, dénommée « protéodie », a été faite par Sternheimer, en août 1985. Elle portait sur l'antitrypsine humaine ; la protéodie réalisée apparue très structurée pour le chercheur. La première observation permettant de faire l'hypothèse d'un effet spécifique a été faite en décembre 1985 : une personne anémique se trouva captée par l'écoute de la protéodie de l'hémoglobine alpha et, une semaine après, son dosage s'était normalisé. Bien entendu, si ces premiers constats n'étaient pas représentatifs, ils étaient néanmoins suggestifs. Ils poussèrent Sternheimer à prendre le risque scientifique de considérer comme une hypothèse à examiner le principe d'un effet biologique de ces fréquences transposées.

Des sons et des plantes : un long chemin expérimental

Pour aller plus loin, il s'agissait de passer à des expériences reproductibles et portant sur des organismes syn-

(1) FLATO M. & STERNHEIMER J., C. R. Acad. Sc. Paris 259, p. 3455, 1964. Note présentée par Louis de Broglie : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k4015m.image.f535.langFR>

(2) STERNHEIMER J., « Musique des particules élémentaires », C. R. Acad.Sc. Paris 297, p. 829, 1983. Note présentée par Lichnerowicz A. : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5652910x.image.r=sternheimer.f199.langFR>. Présentation orale faite lors du séminaire de physique mathématique – Lichnerowicz A., Collège de France (1984), reproduction dans *Rev. Bio-Math.* 94, p. 1, 1986.

(3) STERNHEIMER J., « Procédé de régulation épigénétique de la biosynthèse des protéines par résonance d'échelle », brevet n°FR 92 06765, 1992 – Numéro de publication : 2691796. Dans les 179 pays signataires de la Convention de Berne, le procédé original créé par Joël Sternheimer est protégé par le droit d'auteur du pays de son créateur ; ce droit couvre les codes et la méthodologie qu'il a mis au point pour transposer le génome en séquences de sons ou de couleurs.

thétisant des protéines, mais considérés comme dépourvus de toute subjectivité : les végétaux.

Au début des années 1990, Philippe Fléjo, musicien et ami de Sternheimer, me présenta à ce dernier. Je préparais un diplôme d'ingénieur spécialisé dans les industries des céréales.

Pour essayer d'objectiver au mieux les effets des diffusions de protéodies, nous convînmes d'une série d'essais sur une culture de tomates dans un jardin de la banlieue parisienne. Dans les années qui suivirent, ces essais furent répétés en Ariège, dans l'Oise, au Japon, au Sénégal, puis en Suisse et en Belgique. La diffusion de protéodies apportait bien, en fonction des séquences sonores utilisées, des différences mesurables sur le plan de la croissance, du nombre de fleurs, de la production, du taux de sucre ou encore de la résistance à la sécheresse et de la conservation des fruits.

À l'ENSMIC, Philippe Roussel nous donna en 1993 l'opportunité d'expérimenter dans son laboratoire, avec un ami, la stimulation, dans des conditions contrôlées, de la fermentation de la pâte à pain par une transposition sonore d'un alcool déshydrogénase de levure. Les résultats furent présentés aux journées techniques de l'ENSMIC et publiés dans la revue *Industrie des céréales* ⁽⁴⁾.

Tous ces essais se faisaient avec des moyens très réduits. Au tournant des années 2000, un besoin de structuration de ces recherches se fit ressentir. Sternheimer, Bargoin et moi-même avons ainsi créé le Réseau associatif de chercheurs indépendants, qui nous a permis de lancer de nouveaux essais, de mettre en place des formations, d'organiser des séminaires et de participer à quelques colloques afin de présenter les observations et les hypothèses qui semblaient émerger. Deux livres écrits par Yôichi Fukagawa, physicien et traducteur du brevet de Sternheimer, ont été publiés au Japon ⁽⁵⁾.

En novembre 2001, l'arsénite de sodium est interdit pour le traitement de la vigne. C'était à l'époque le seul moyen pour réduire l'impact de l'Esca, une maladie du bois de la vigne. L'œnologue Pierre Paillard, qui avait fait la connaissance de Sternheimer lors d'une conférence de Jean-Marie Pelt ⁽⁶⁾, lui demanda si des protéodies pourraient remplacer ce produit. Raffaele Tabacchi, spécialiste des maladies de la vigne à l'Université de Neuchâtel, suggéra des protéines spécifiques de la résistance de la vigne. Pierre Paillard trouva cinq vigneronns prêts à tenter cette expérimentation. S'en suivirent trois années d'essais. Des résultats positifs semblaient apparaître, mesurables en fonction de la distance par rapport au radiocassette utilisé

pour diffuser pendant quelques minutes par jour, à environ 60 dB, des protéodies dérivées de ces protéines.

En mars 2004, après dix années d'examen et d'échanges richement documentés, le deuxième brevet de Sternheimer fut validé par un jugement de l'Office européen des brevets (OEB). Deux expériences y contribuèrent, l'une sur une culture de cellules productrices d'interleukine 2, menée par Marie-Claude Lang à l'ESPCI, et l'autre sur des bactéries *Vibrio Ficheri* productrices de protéines fluorescentes, réalisée par Christian Loiseau au sein du laboratoire de Jean-Marie Pelt à l'Université de Metz. Ces résultats confirmèrent pour l'OEB la validité sans équivoque des revendications de Sternheimer ⁽⁷⁾.

Pendant cette période, aux côtés de Sternheimer, nous avons appris à utiliser ce procédé et définis les bases de sa mise en œuvre : réaliser d'abord une étude bibliographique pour déterminer les protéines impliquées, puis une recherche des homologues entre les séquences vibratoires de ces protéines et celles des organismes impliqués pour vérifier les éventuels effets agonistes ou antagonistes (une discipline en soi), pour procéder au « décodage » des protéines en protéodies (un apprentissage en soi) et, enfin, aboutir à la définition du protocole de diffusion et de la méthode d'évaluation.

La création de Genodics SAS : la preuve du concept sur le terrain

C'est à l'occasion d'un séminaire, en juin 2007, que nous rencontrons Michel Duhamel, ingénieur conseil en organisation, spécialisé dans le management de l'innovation. Intéressé par ce sujet, il rassemble un ensemble de notes, de comptes-rendus et autres documents pour présenter les travaux de Sternheimer lors de l'attribution du Prix de la technologie du millénaire, lancé par la Finlande. Sans succès.

La rencontre avec Duhamel a été décisive pour la création de Genodics. Les cinq premiers actionnaires réussissent à réunir un capital de 40 000 € ; l'entreprise est créée en mai 2008. Quinze autres suivent, puis vingt-cinq nouveaux, ce qui a permis de financer les premières années d'activité. Nous sommes aujourd'hui soixante-trois actionnaires.

Notre objectif était d'abord de faire la preuve du concept sur le terrain, tout en développant une activité viable qui pourrait à son tour financer une fondation permettant de mener une recherche plus fondamentale et d'assurer également le volet Formation.

Le premier défi a été de développer des diffuseurs sonores utilisables en plein air : la *P-box*, un diffuseur autonome, a ainsi été créée. En 2015, un nouveau modèle intégré et pilotable à distance a été produit en lien avec l'un de nos actionnaires.

(4) FERRANDIZ P. (1993), « Procédé de régulation épigénétique de la synthèse protéique : essais en panification », *Industries des céréales*, n°85, p. 40 : <https://genodics.net/JMSternhei/bekkoame/Pain.Pedro.html>

(5) FUKAGAWA Y., « Qu'est-ce que la musique des protéines », éd. Chikuma, Tokyo, septembre 1999, et « Écoute le code secret de la vie », éd. Shugakutan, Tokyo, août 2007.

(6) PELT J.-M. (1996), *Les langages secrets de la nature*, chap. 18, Fayard, rééd. en Livre de Poche n°14435, 1998.

(7) LANG M.-C. et al. (2002), *Inhibition de la production de l'IL2*, février : <https://register.epo.org/application?documentId=EFSU08VOM-PHX10&number=EP93913082&lng=en&npl=true>

LOIZEAU C. (2003), *Induction of bacterial luminescence in Vibrio Fischeri through exposure to the proteodies of its LuxA and LuxB genes*, février : <https://register.epo.org/espacenet/application?documentId=EFSU08VJMNPHX10&number=EP93913082&lng=en&npl=true>



Stimulation de la culture de salades sous serre – Photo©GENODICS.

Des clients, qui sont avant tout des partenaires de recherche... fidèles

Les premières installations sont réalisées en 2008 en Alsace, en Touraine et en Champagne, chez des vignerons avec qui nous avons fait les essais sur l'Esca de la vigne, ainsi qu'en Provence, chez le maraîcher Gilles Josuan avec qui nous travaillions depuis deux ans sur un virus mosaïque endémique des cultures de courgettes.

Ces agriculteurs ont permis à Genodics de présenter à leurs collègues le procédé et les premiers résultats. De quatre clients en 2008 nous sommes passés à seize en 2010⁽⁸⁾. Par prospection, notre activité s'est étendue dans la vallée de la Loire, puis en Aquitaine, en Bourgogne, dans le Jura et, plus récemment, dans la vallée du Rhône et en Occitanie.

Chaque installation constituait un cadre d'expérimentation convenu avec l'agriculteur, définissant ensemble les objectifs ainsi que les modalités d'évaluation. Nous nous

engagions à lui rembourser nos prestations en cas d'échec, ce qui ne nous arriva que très rarement. En moyenne sur ces douze années, 96 % de nos installations ont été reconduites. Ils sont aujourd'hui 173 agriculteurs à nous faire confiance, représentant près de 300 installations sur plus de 2 500 hectares.

Les résultats et les observations ainsi obtenus nous ont permis d'optimiser nos applications, aussi bien au regard de leur contenu que des modalités de leur mise en œuvre, et d'en développer de nouvelles. L'agriculteur est notre partenaire de recherche ; avec pour nous une contrainte, celle de ne pouvoir tester que des formulations dont le risque est maîtrisé. La mise au point d'une nouvelle application prend de 3 à 5 ans.

De nombreuses tentatives de rapprochement avec la recherche publique et privée

Pour cinq de nos premières installations, nos clients agriculteurs ont pu bénéficier de subventions PTR (Prestation technique réseau), allouées par les agences régionales d'OSEO et destinées à financer 70 % du budget nécessaire à l'essai d'une innovation les concernant. OSEO a ensuite estimé que l'innovation étant de notre fait, c'était à nous de demander la subvention. On ne rentrait plus dès

(8) FERRANDIZ P. *et al.* (2018), "Epigenetic Regulation of Protein Biosynthesis by Scale Resonance: Study of the Reduction of Esca. Effects on Vines in Field Applications", *Life Sciences, Information Sciences*, summary 2016, March, pp. 305-315, doi: 10.1002/9781119452713.ch28. Traduction française : <https://www.researchgate.net/publication/324266455>

lors dans le cadre défini par OSEO. Depuis lors, nos recherches appliquées sont uniquement financées par nos clients, nos fonds propres et le crédit d'impôt recherche (CIR).

L'INRA(E) nous apparaissant comme un partenaire naturel, nous avons engagé dès 2008 des contacts avec les différentes directions relevant de cet organisme de recherche : de la quarantaine d'échanges intervenus sur une période de dix ans, aucune intention d'étudier avec sérieux le sujet n'a pu se concrétiser, l'absence de publication, en dépit de celle de l'OEB, étant rédhibitoire. N'est-ce pas pourtant un cas fréquent lorsqu'il est question d'innovation de rupture ?

Pendant ce temps, sur le terrain, des résultats significatifs étaient obtenus sur le traitement de l'Esca de la vigne, que nous avons présentés dès 2010 à l'INRA, à l'ITV et à des chambres d'agriculture. Nous avons alors été introduits auprès du GIS PicLeg, une structure de recherche du syndicat Légumes de France. Le procédé ne leur paraissait pas crédible. Nouvelle déception.

En 2011, la chambre d'agriculture de Tours et l'ITV de Colmar ont demandé à la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF) de vérifier que nous n'étions pas des escrocs. L'œnologue chargé de cette enquête conclut qu'il n'y avait rien à redire et que nos clients étaient satisfaits de nos prestations. Malgré ses conclusions, aucune structure ne nous contacta.

Pendant ce temps, nous avons continué à accumuler des résultats expérimentaux positifs, avec vingt à trente installations de plus par an, puis cinquante à partir de 2018 principalement en France, puis en Suisse, au Québec et en Belgique.

La première collaboration constructive avec le milieu académique s'est nouée avec le Laboratoire Frank Duncombe à Caen, sur l'herpès des naissains d'huîtres. De 2011 à 2013, avec une doctorante de l'Université de Caen, nous avons testé différentes séries de protéodies, qui ont donné des résultats positifs⁽⁹⁾. Lorsque nous avons tenté de reconduire ces essais, les budgets ont été interrompus, car la profession s'est désintéressée de ce sujet qui était pourtant encore d'actualité. Nous avons dépensé 40 000 € sans obtenir aucun retour.

La seconde collaboration a commencé en 2013 avec le laboratoire ERRMECe de l'Université de Cergy-Pontoise : son directeur de recherche, Olivier Gallet, incité par l'un de ses étudiants, Victor Prévost, accepta de travailler avec nous, à frais partagés, pour valider le concept. Avec ses équipes, il a réalisé plusieurs séries d'expériences en aveugle visant à tester l'influence d'une seule protéodie – une déhydrine – sur la germination de pois sous stress

hydrique. Les résultats ont été publiés en septembre 2020 dans la revue *Heliyon*⁽¹⁰⁾.

Ces dernières années, trois centres techniques nous ont sollicités pour tester notre solution chez des agriculteurs. Les temps changent ! Le constat fait de notre longévité et les nombreux témoignages d'utilisateurs relayés par les médias étonnent et suscitent l'intérêt des acteurs de terrain, mais pas celui des institutions de recherche publiques.

Cependant, fin février 2021, le Centre technique de l'industrie des fruits et légumes (CTIFL) a présenté la génodique dans un *webinaire* sur les voies d'innovation en matière de protection des cultures. Commentant ses travaux, Olivier Gallet a évoqué une nouvelle voie de recherche, le « protéomimétisme », qui peut s'insérer dans le domaine du biomimétisme qui connaît déjà de nombreux développements.

L'évaluation sur le terrain : facile à dire, mais plus délicat à faire

La première difficulté d'une évaluation sur le terrain, nous la rencontrons quand le problème étudié... ne se pose pas ! Un essai consacré aux conséquences du gel de printemps, au titre d'une année où ce phénomène météorologique ne s'est pas produit, ou un essai sur le mildiou, sans occurrence de mildiou sur les témoins non traités... : c'est une année perdue à chaque fois.

La deuxième difficulté réside dans la maîtrise de la portée des diffusions sonores et de leurs effets. À de nombreuses reprises, nous avons constaté que le problème ciblé (l'Esca, le mildiou...) semblait résolu aussi bien dans la zone couverte par la diffusion que dans une zone proche de cette dernière mais non couverte. Avec l'expérience, nous avons appris que l'effet se faisait sentir au-delà de la zone où la diffusion était audible !

Une fois ces observations intégrées, il faut trouver la combinaison des séquences à diffuser qui soient à même de donner des résultats : 1 an = 1 saison = 1 essai. Cela prend du temps. En douze ans, nous avons néanmoins pu développer cinquante applications du procédé génodique.

Idéalement, pour évaluer, il faut aussi une zone témoin qui présente en tous points les mêmes caractéristiques que la zone plus large de test. Or, sur le terrain, c'est très rarement possible : dans le cas de la vigne, nous avons trouvé seulement trois zones témoins chez les 150 vigneron avec qui nous travaillons, dont une installation au château Gaudrelle, à Vouvray, que nous suivons depuis 2012⁽¹¹⁾. Autre exemple, chez un maraîcher, deux serres accueillant

(9) HOUSSIN M. *et al.*, « Réduction de l'impact du virus OsHV1 sur des naissains d'huîtres », Laboratoire Franck Duncombe, Caen : <https://www.researchgate.net/publication/339527872> (avril 2012) et <https://www.researchgate.net/publication/339528058> (avril 2013).

(10) PRÉVOST V. *et al.* (2020), "Diffusions of sound frequencies designed to target dehydrins induce hydric stress tolerance in *Pisum sativum* seedlings", *Heliyon*, septembre : <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04991>

(11) PRÉVOST V. *et al.* (2020), *Synthèse des campagnes d'expérimentation in situ : étude des cas Vigne (champignons : Esca et mildiou), Endive (bactérie : Erwinia) et Courgette (virus : WMV2, ZYMV)*, janvier, <https://www.researchgate.net/publication/338479404>

À paraître dans *Quantum Thinking for Agroecology: Theory and Practice for the Farming of Tomorrow*, Université de Coventry (UK), Taylor and Francis.

une même variété de tomates qui, outre des plantations intervenant rarement au même moment, ne sont que peu souvent soumises à la même exposition au soleil... La réalité de terrain n'est pas facilement compatible avec les conditions de laboratoire.

La Figure 1 ci-après correspond à un exemple de gradient d'effets sur le mildiou de la vigne. Ce modèle a été éprouvé directement dans les vignes, mais aussi en serre et en tunnel de maraîchage, sur une expression du botrytis, d'un virus mosaïque de la courgette ou du pépinovirus. Il l'a été également en arboriculture, sur la tavelure de pomme et sur la sharka du pêcher.

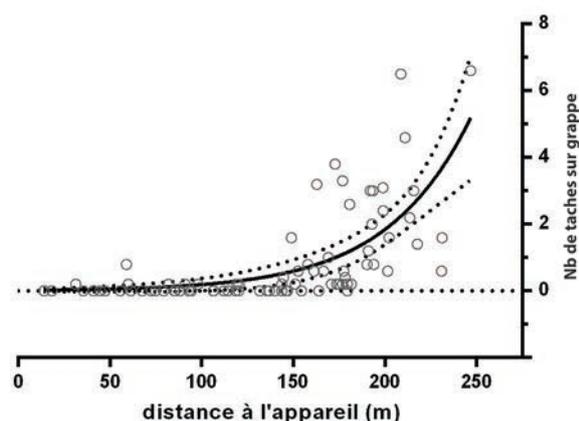


Figure 1 : Nombre de taches de mildiou observées par grappe de raisin sur des groupes de 5 cepes en fonction de la distance par rapport à l'appareil de diffusion : IC 99 % – N=83 groupes, soit 415 cepes – ©GENODICS.

C'est sur le traitement de l'Esca, la maladie du bois de la vigne, que nous avons recueilli le plus grand nombre de données : environ 300 comptages ont été faits. Cette évaluation nous a permis de comparer les taux de mortalité des parcelles de vignes avant (avec au minimum trois années de recul) et après mise en place des diffusions.

Ces évaluations faites avec le vigneron nécessitent que ce dernier suive avec précision cet indicateur. La Figure 2 en bas de page en donne une synthèse.

Un troisième modèle a été élaboré pour l'évaluation d'un processus cyclique, le « forçage d'endives ». De septembre à mars, une quantité donnée de racines sont placées chaque jour dans la salle de « forçage », dont elles ressortiront vingt-et-un jours plus tard en tant qu'endives formées. Nous avons opéré des cycles de vingt-et-un jours avec diffusion et vingt-et-un autres sans diffusion, de sorte que les lots d'endives ont bénéficié selon le cas de 0 à 21 jours de diffusion : l'augmentation du rendement, corrélée à la baisse du nombre des endives de second choix (touchées par une bactériose et effeuillées) est clairement corrélée au nombre des jours de diffusion reçues par chaque lot (voir la Figure 3 ci-dessous).

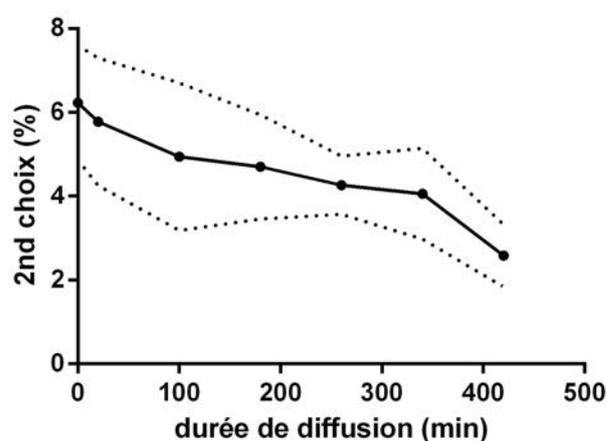


Figure 3 : Pourcentage des endives de second choix en fonction de la durée de diffusion (N=211 séries, soit 541 tonnes d'endives IC 95 %) – ©GENODICS.

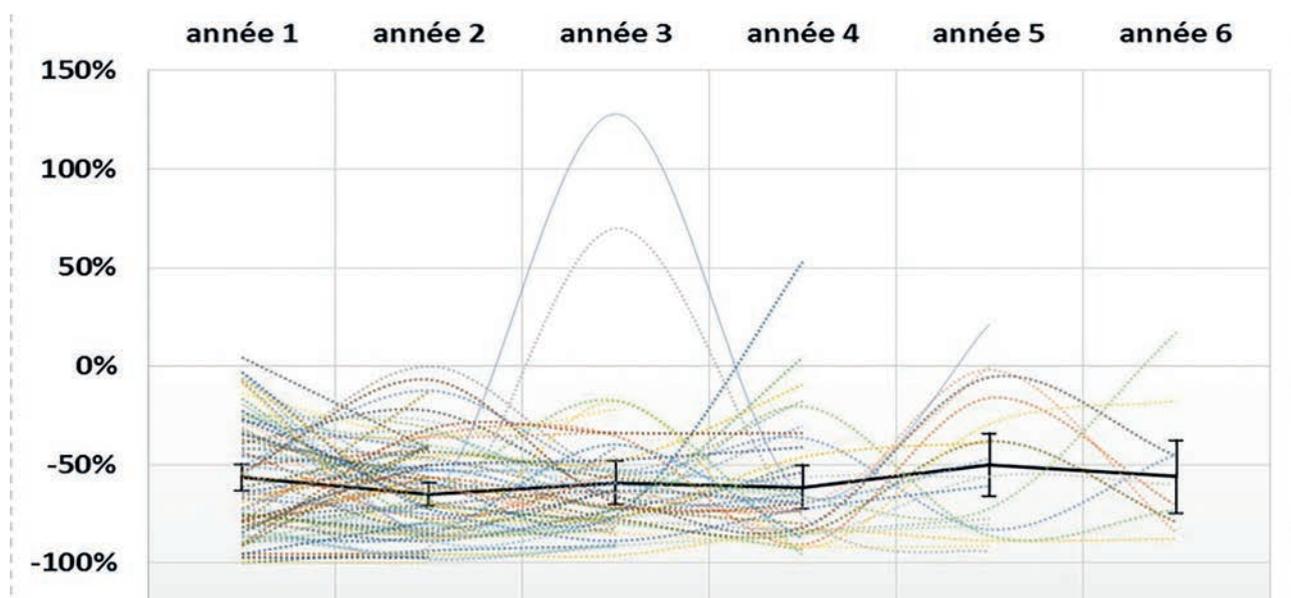


Figure 2 : Évolution du taux de mortalité liée à l'Esca par rapport à la moyenne historique de mortalité (N=91 parcelles, 1 209 020 cepes de vigne sur 260 ha. Au total, IC 99 %) – ©GENODICS.

Depuis six ans, dans le Roussillon, nous comparons le nombre des pêcheurs arrachés à la suite de la détection d'une virose, la Sharka. Sur 100 hectares sonorisés, comparés à 200 autres hectares non sonorisés, l'évolution de l'arrachage entre ces deux zones montre une différence de 50 % en faveur de la zone sonorisée.

Ces suivis et ces observations prennent du temps. Ils nécessitent une forte implication de nos partenaires agriculteurs, que nous remercions ici pour leur volontarisme.

Conclusion

Cinquante applications développées en douze ans, correspondant à 300 installations sur 2 500 ha, c'est une réalité qui commence à se voir. Elle suscite une curiosité croissante et des questions de plus en plus insistantes dans les milieux professionnels. Espérons qu'elle suscite enfin un intérêt de la part des instituts de recherche.

De la santé du vivant à l'optimisation de processus biologiques, nous sommes conscients de l'étendue de ce qui nous reste à faire et à développer. Le monde du vivant est plus vaste et plus sophistiqué que les représentations que beaucoup en ont !

« Science sans conscience n'est que ruine de l'âme », disait Rabelais. Sujet et objet ne sont-ils pas les deux faces d'une même pièce ⁽¹²⁾ ? La génodique permettrait-elle de les réconcilier ?

(12) STERNHEIMER J. (2001), « Le lieu de la distinction sujet-objet dans les sciences de la nature », conférence organisée dans le cadre du colloque « Prospective III », à Cerisy-la-Salle (France), 30 mai 2001 (révisé le 24 mars 2003) : <https://www.academia.edu/11496313>

STERNHEIMER J. (2006), « Génodique appliquée à la guérison des écosystèmes », conférence organisée dans le cadre du colloque « Serge Winogradsky », aujourd'hui les Ateliers techniques du SIAAP, Colombes (France) : <https://www.academia.edu/10100828>

Bibliographie

CELUZZA J. F. & FERRANDIZ P. (1993), « Procédé de régulation épigénétique de la synthèse protéique – Essai en panification », revue *Industrie des céréales*, n°85, décembre, p. 40 : <https://aemic.com/blog/article/procede-de-regulation-epigenetique-de-la-synthese-proteique-essai-en-panification.html>. Présentation faite lors des « Journées techniques de l'ENSMIC 1993 ».

FERRANDIZ P., DUHAMEL M. & STERNHEIMER J. (2018), "Epigenetic Regulation of Protein Biosynthesis by Scale Resonance: Study of the Reduction of ESCA Effects on Vines in Field Applications – Summary 2016", *Researchgate*, mars, <https://www.researchgate.net/publication/324266455>

PRÉVOST V., DAVID K., GALLET O. & HINDIÉ M. (2020), "Diffusions of sound frequencies designed to target dehydrins induce hydric stress tolerance in *Pisum sativum* seedlings", *Open Access Heliyon*, September 23, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04991>

PRÉVOST V., DUHAMEL M., FERRANDIZ P. & STERNHEIMER J. (2020), « Synthèse des campagnes d'expérimentation *in situ* et utilisations pratiques de la méthode de régulation épigénétique de la synthèse protéique développée par J. Sternheimer, dans le domaine agricole : étude des cas Vigne (champignons : Esca et Mildiou), Endive (bactérie : *Erwinia*) et Courgette (virus : WMV2, ZYMV) », *Researchgate*, janvier, <https://www.researchgate.net/publication/338479404>

Réglementation sanitaire et environnementale des ONIEA

Par **Natalie COMMEAU** et **Philippe BODÉNEZ**

Ministère de la Transition écologique – Direction générale de la Prévention des risques (DGPR)

Nous pouvons être confrontés à des sources de bruit très variées durant la journée et la nuit : bruit de nos voisins, des entreprises, de loisirs, des transports... C'est pourquoi la réglementation encadrant la limitation de l'exposition au bruit est vaste. Plusieurs lois, décrets et arrêtés sont partiellement ou entièrement consacrés au bruit. Un texte reste fondateur : la loi n°92-1444 du 31 décembre 1992 relative à la lutte contre le bruit. La plupart de ses articles sont toujours en vigueur et codifiés dans le Code de l'environnement. Ce droit français a été complété par le droit européen. Enfin, l'encadrement juridique des nuisances sonores des aéronefs relève en grande partie du droit international.

Les valeurs limites d'exposition du grand public aux ondes non ionisantes électromagnétiques (ONIE) actuellement en vigueur datent de 2002. La loi n°2015-136 du 9 février 2015, dite loi Abeille, traite de la sobriété, de la transparence, de l'information et de la concertation en matière d'exposition aux ONIE. L'ensemble de ces dispositions visent à limiter au mieux l'exposition de nos concitoyens à ces ondes, qui dans certains cas peuvent générer des désagréments plus ou moins importants.

Le cadre réglementaire des nuisances acoustiques (ONIA)

Le bruit est l'une des premières nuisances dont se plaignent les habitants des zones urbaines.

La politique de lutte contre le bruit comporte plusieurs volets : bruit des objets, des activités et des transports.

Bruit des transports

Transport terrestre

Construction de voies de transport

Une nouvelle voie routière ou ferroviaire ne doit pas générer un bruit excessif pour les futurs riverains. Pour les routes, les niveaux sonores générés par une nouvelle infrastructure ou la modification significative d'une infrastructure existante ne doivent pas dépasser une certaine valeur pour chacun des deux indicateurs suivants : le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A entre 6 h et 22 h, noté LAeq (6 h-22 h), et B entre 22 h et 6 h, noté LAeq (22 h-6 h). Leurs valeurs dépendent du type de bâtiments situés à proximité des voies (habitation, établissement de santé...) et du niveau de bruit constaté avant les travaux dans la zone traversée par la voie.

La réglementation pour les voies ferroviaires est bâtie sur le même principe. Les lignes ferroviaires non TGV bénéficient de limites de bruit supérieures de 3 dB à celles des lignes à grande vitesse.

Classement sonore des voies

En fonction des niveaux sonores de référence diurnes et nocturnes, les infrastructures de transport terrestre sont classées en cinq catégories. Les règles générales les concernant sont fixées par arrêté et la classification est, quant à elle, déterminée par arrêté préfectoral. Les habitations construites après édification de l'infrastructure sont tenues de respecter des exigences d'isolement acoustique dépendant de plusieurs paramètres : catégorie de l'infrastructure, distance par rapport à l'infrastructure, angle du bâtiment par rapport à l'infrastructure... Le maître d'ouvrage peut ne pas se conformer à ces règles, mais il doit alors réaliser une étude détaillée pour calculer le niveau d'isolement acoustique à respecter. La valeur minimale d'isolement est de 30 dB en métropole et de 33 dB dans les départements d'Outre-mer.

Points noirs de bruit

Certains cas ne sont pas couverts par la réglementation décrite précédemment. C'est le cas des points noirs de bruit (PNB) : des habitations qui, construites antérieurement à une infrastructure de transport terrestre, sont exposées à des niveaux de bruit nocturne ou diurne trop élevés. Les propriétaires des logements considérés au même titre que les locaux d'enseignement, de soins, de santé ou d'action sociale peuvent bénéficier d'une subvention du ministère chargé de l'Environnement pour financer leurs travaux d'isolation acoustique.

Bruit des véhicules et des pneus

Les niveaux d'émission sonore des véhicules motorisés, y compris les deux-roues, et des pneus sont encadrés par des règlements européens. Un arrêté indique les niveaux de bruit à ne pas dépasser pour un régime moteur et une vitesse déterminés, en fonction de la date de mise en circulation et de la catégorie du véhicule.

Loi d'orientation des mobilités (LOM)

La loi n°2019-1428 d'orientation des mobilités contient cinq articles relatifs au bruit (art. 90 à 93, et art. 94 s'agissant des nuisances sonores aériennes). Ces articles prévoient la prise d'arrêtés pour encadrer le bruit des transports ferroviaires ainsi que les vibrations qu'ils génèrent. Ils prévoient également une expérimentation d'une durée de deux ans visant à la réalisation de mesures des émissions sonores des véhicules motorisés par des appareils de contrôle automatique. Enfin, la loi précise que chacun des acteurs publics (État, collectivités, établissements publics...) concourt à l'élaboration d'une politique dont l'objectif est la mise en œuvre du droit reconnu à chaque citoyen de vivre dans un environnement sonore sain.

Transport aérien

Performance acoustique des avions

Pour pouvoir voler, un aéronef doit disposer d'un certificat acoustique. La procédure de certification a été définie par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). Les modalités et conditions de certification sont définies dans l'annexe 16 de la convention de l'OACI, ainsi que les prescriptions de performance acoustique des aéronefs selon leur type, leur masse et leur année de certification. Les différents cas de figure sont organisés en 14 chapitres. Les avions à réaction les plus bruyants, ceux du chapitre 2, sont interdits dans les aéroports de l'Union européenne (UE) depuis 2002.

Plans d'exposition au bruit

Un plan d'exposition au bruit (PEB) est un document d'urbanisme opposable aux tiers qui organise l'urbanisation autour des aérodromes. Ce plan définit des zones de gêne (A, B, C, et parfois D) à partir de perspectives d'utilisation d'un aéroport. Les indicateurs utilisés décrivent les niveaux de bruit perçus durant un jour-type (24 h, Lden) ou lors d'une nuit-type (Ln). La gêne décroît des zones A jusqu'aux zones D. Globalement, les zones A et B, celles dites « de très forte gêne », sont inconstructibles. Dans la zone C, certaines constructions sont autorisées sous conditions. Dans la zone D, les nouveaux logements sont autorisés à condition d'être isolés acoustiquement : c'est aussi le cas pour les rares logements dont la construction a été autorisée dans les autres zones. L'adoption d'un PEB est l'aboutissement d'une procédure complexe supervisée par le préfet de département comprenant notamment une consultation des communes concernées ainsi qu'une enquête publique.

L'article 94 de la LOM prévoit que tout futur acquéreur ou locataire (habitation, usage professionnel...) doit être informé sur le fait que l'immeuble convoité est situé dans le périmètre d'un PEB.

Plans de gêne sonore

Les onze plus grands aéroports français ont tous un plan de gêne sonore (PGS). Les logements situés dans le périmètre du PGS peuvent bénéficier, sous certaines conditions, d'une aide pour leur insonorisation. Cette aide est financée par la taxe sur les nuisances aériennes (TNSA) payées par les compagnies aériennes pour chaque décollage de leurs avions à partir des plateformes concernées, selon le principe du pollueur-payeur. La taxe est perçue par les exploitants d'aérodromes qui la redistribuent ensuite aux riverains bénéficiaires.

L'Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires (Acnusa) dispose de compétences spécifiques sur les aéroports dotés d'un PGS, comme la définition du nombre des stations de mesure du bruit, leur emplacement ou les modalités de réalisation des mesures.

Restrictions environnementales

En dernier recours, des restrictions d'exploitation peuvent être imposées aux aéroports pour protéger les riverains du bruit. Ces restrictions sont établies site par site en prenant en compte les caractéristiques de l'aérodrome, les effets prévisibles de la réduction à la source du bruit des aéronefs, les mesures d'aménagement du territoire et les règles de construction, les procédures de navigation aérienne ainsi que les coûts et les avantages induits par les restrictions envisagées. L'Acnusa dispose du pouvoir de sanctionner les manquements à ces restrictions.

Directive 2002/49 relative à la gestion et à l'évaluation du bruit dans l'environnement

Cette directive impose aux États membres d'élaborer tous les cinq ans des cartes de bruit selon les indicateurs Lden et Ln pour les grandes infrastructures de transport (routier, ferroviaire et aérien) ainsi que pour les grandes agglomérations. Ces cartes sont suivies de l'adoption de plans de prévention du bruit dans l'environnement (PPBE) qui indiquent les mesures prises pour prévenir les effets du bruit, réduire les niveaux de bruit et protéger les zones calmes. Au titre de la quatrième échéance de la directive, la France devra fournir en 2022 les cartes de 45 000 km de routes, de 7 000 km de voies ferrées, de dix aéroports et de quarante-neuf agglomérations. Les PPBE devront être notifiés en 2024. Les cartes et les PPBE sont disponibles sur les sites Internet des structures en charge de leur élaboration. Un exemple de ces cartes est présenté dans la Figure 1 de la page suivante.

Acoustique des bâtiments

Isolation des logements

La réglementation en matière d'acoustique impose des résultats minimaux à atteindre dans les bâtiments neufs ou faisant l'objet d'une rénovation importante. Les critères portent notamment sur :

- l'isolation contre les bruits aériens de l'extérieur ;
- l'isolation contre les bruits aériens à l'intérieur ;
- l'isolation contre les bruits de choc ;
- la limitation des bruits des équipements collectifs ou individuels de l'immeuble.

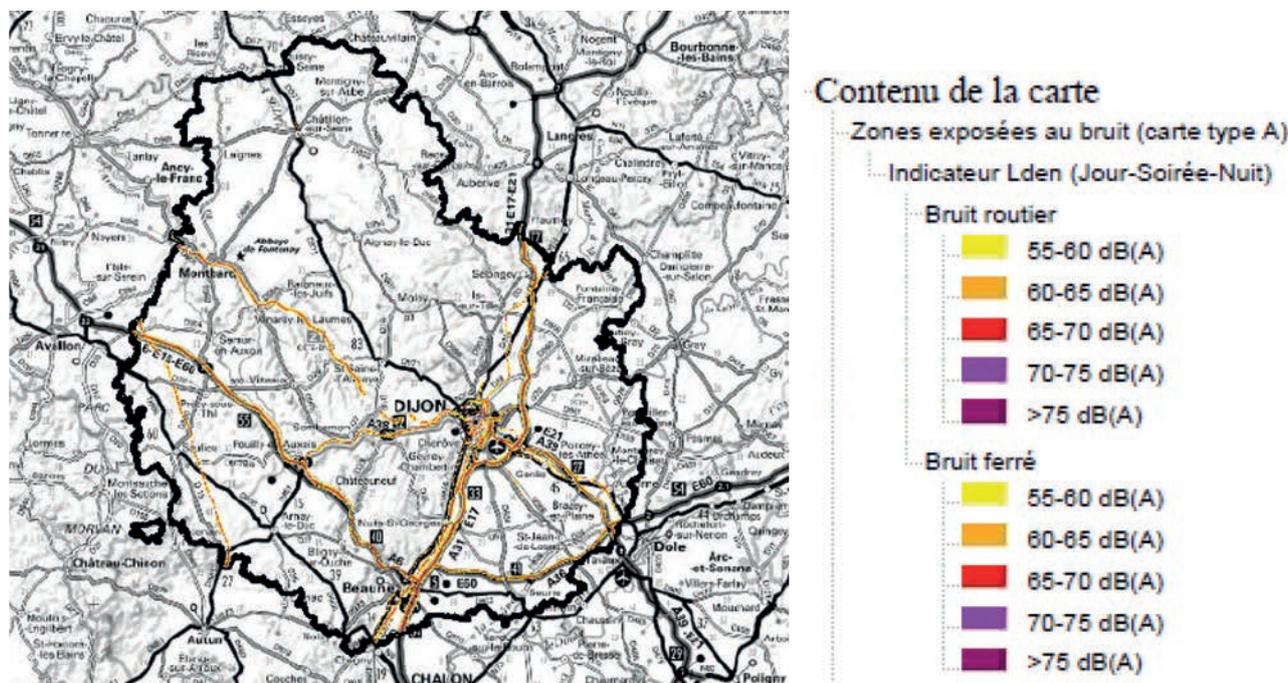


Figure 1 : Carte de bruit en Lden pour le bruit routier et le bruit ferré en Côte d'Or établie au titre de la troisième échéance de la directive 2002/49.

Les valeurs d'isolation extérieure dépendent de la localisation du bâtiment (situé dans une zone de classification des voies, dans un PEB, etc.). Les valeurs d'isolation intérieure dépendent du type de pièces (pièce à vivre, cuisine, salle d'eau...).

La réglementation encadre également l'isolation acoustique et la durée de réverbération moyenne pour les établissements d'enseignement (ne s'applique pas aux crèches), les établissements de santé et les hôtels. La localisation dans un PEB est prise en compte.

Attestation acoustique

À l'achèvement de la plupart des bâtiments d'habitation, les maîtres d'ouvrage ont l'obligation de fournir une attestation de prise en compte de la réglementation acoustique à l'autorité ayant délivré le permis de construire. Elle est jointe à la déclaration attestant l'achèvement et la conformité des travaux et s'appuie sur des constats effectués en phase de conception, en cours de chantier, et, pour les opérations d'au moins dix logements, sur des mesures acoustiques dont le nombre est déterminé en fonction du nombre de logements construits.

Bruit de voisinage

Il existe trois types de bruit de voisinage (hors les bruits générés par les transports, les activités de la Défense nationale, les installations nucléaires de base, les installations classées pour la protection de l'environnement et les ouvrages de distribution de l'énergie électrique) :

- les bruits liés au comportement d'une personne ou d'une chose dont elle a la charge ;
- les bruits provenant des activités professionnelles, sportives, culturelles ou de loisirs ;
- les bruits provenant des chantiers.

Les bruits de comportement sont des bruits perçus de jour comme de nuit, comme les cris d'animaux, les outils de bricolage... Les nuisances occasionnées sont constatées par des agents assermentés. Une constatation auditive suffit. La conciliation est nécessaire avant la saisine du tribunal compétent.

La réglementation générale applicable au deuxième type de bruit prévoit que celui-ci ne doit pas dépasser 3 dB d'émergence (c'est-à-dire que le bruit engendré par l'activité ne doit pas dépasser de plus de 3 dB le bruit constaté en dehors du bruit de l'activité considérée) entre 22 h et 6 h et 5 dB d'émergence entre 6 h et 22 h. Si le bruit dure moins de 8 h, l'émergence peut être plus élevée par application d'un facteur correctif dépendant de la durée du bruit. Il existe également des conditions d'émergence spectrale (en considérant le bruit non pas pris dans sa globalité, mais par rapport à des plages de fréquences), ainsi que des exceptions quand le bruit perçu avec les fenêtres fermées est particulièrement bas.

Chaque maire peut définir par arrêté les plages horaires durant lesquelles les activités générant des bruits de voisinage sont interdites.

Il existe une réglementation particulière pour les sons amplifiés (sons amplifiés au moyen d'un système électrique, lors de certains concerts par exemple). La réglementation encadre, notamment (cela dépend du type d'activité et du lieu), le niveau de pression acoustique toléré sur une durée de quinze minutes, prévoit l'information du public sur les risques auditifs et la mise à la disposition de celui-ci de protections acoustiques. L'émergence pour les riverains est également encadrée. Enfin, dans certains cas définis, une étude d'impact des nuisances sonores (EINS) est requise afin de prévenir les atteintes à la tranquillité ou à la santé du voisinage.

Les chantiers doivent respecter les exigences de limitation du bruit fixées par les autorités compétentes. Toutes les précautions pour limiter le bruit doivent être prises.

Le bruit des installations classées (ICPE) est encadré par deux arrêtés, dont un spécifique aux éoliennes. La réglementation comporte des valeurs d'émergence et des niveaux de bruit à ne pas dépasser. Pour les éoliennes, la valeur d'émergence peut être plus élevée si la durée de fonctionnement est inférieure à 8 h par 24 h.

La protection du public vis-à-vis des ondes électromagnétiques non ionisantes (ONIE)

Une réglementation spécifique encadre les valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques.

Le décret qui définit cette réglementation reprend une recommandation du Conseil européen relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz). Cette dernière reprend elle-même les lignes directrices de l'ICNIRP (Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants). L'ICNIRP est une ONG basée en Allemagne qui publie des guides proposant des valeurs limites pour toutes les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (UV, lumière, infrarouge, ultrasons, radiofréquences...).

Les valeurs limites déterminées en fonction de la fréquence de l'ONIE sont indiquées dans la Figure 2 ci-dessous.

Réglementation relative aux radiofréquences

Les radiofréquences sont des ondes électromagnétiques dont la fréquence est comprise entre 3 kHz et 300 GHz.

Limitation de l'exposition

L'exposition du public est essentiellement due aux émissions d'appareils radioélectriques (téléphones portables, tablettes...) et des réseaux de télécommunications (téléphonie, radio...).

La réglementation comprend plusieurs volets :

- **Limitation ou condition de la vente et de la publicité**
Certains appareils radioélectriques sont interdits à la vente s'ils s'adressent à des enfants de moins de six ans. Les téléphones doivent être vendus avec un kit oreillette. L'utilisation d'un téléphone par un élève est interdite durant les heures d'enseignement...
- **Sobriété de l'exposition**
Il doit être fait la preuve de la sobriété des établissements accueillant des personnes vulnérables au regard de l'exposition de ces dernières aux ondes électromagnétiques.
- **Points atypiques**
Lorsqu'en un endroit le niveau d'exposition aux champs électromagnétiques générés par des radiofréquences dépasse substantiellement celui observé sur le territoire national, on parle alors de point atypique. Le gestionnaire de l'antenne de télécommunications identifiée doit prendre des mesures pour en réduire, si cela est techniquement possible, le niveau d'exposition, sans altérer la qualité de service. La valeur d'un point atypique, le recensement et le suivi de ces points sont assurés par l'Agence nationale des fréquences (ANFR).
- **DAS**
Le débit d'absorption spécifique (DAS) de tous les équipements radioélectriques terminaux (les téléphones et, plus généralement, tous les objets connectés) est encadré. Le DAS est la puissance du flux d'énergie produit par un appareil connecté et absorbé par l'utilisateur lorsque

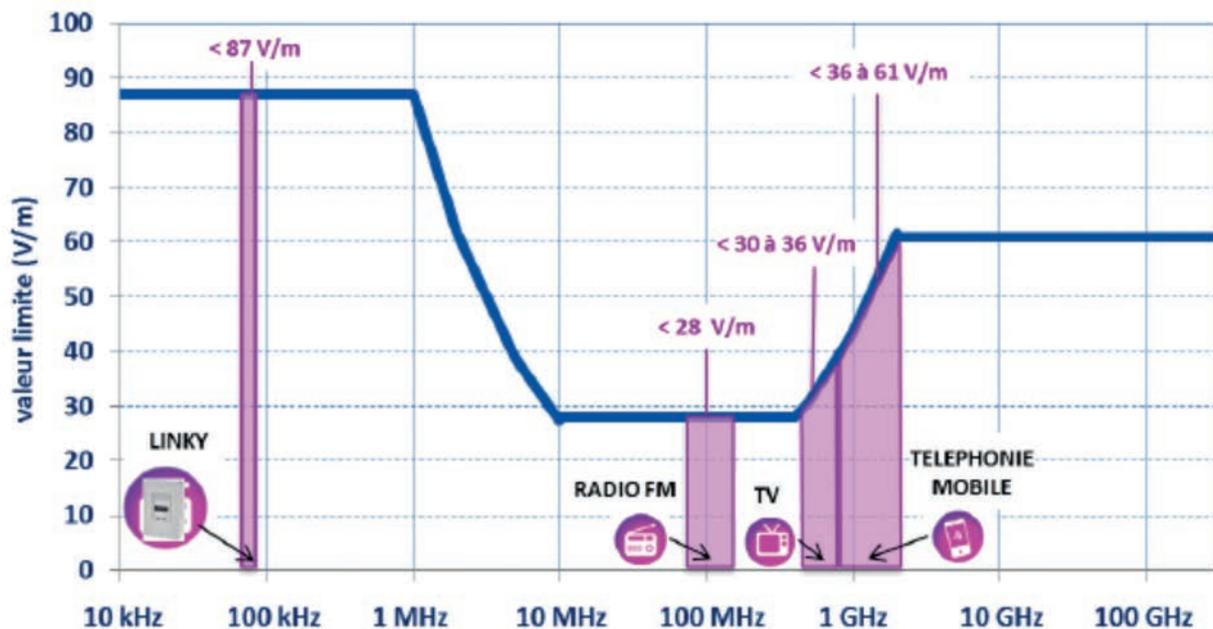


Figure 2 : Valeur limite du champ électrique (V/m) en fonction de la fréquence (décret n°2002-775).



Figure 3 : Procédure à suivre pour demander une mesure de l'exposition aux ondes électromagnétiques.

l'appareil fonctionne à pleine puissance et dans les pires conditions d'utilisation. La réglementation définit trois types de DAS : DAS « tête », DAS « tronc » et DAS « membre ». En outre, les valeurs de DAS doivent figurer dans les notices des appareils et être affichées dans les lieux de vente.

Information et médiation

Dès qu'une personne souhaite exploiter une installation radioélectrique, elle doit en informer le maire, et ce dès la phase de recherche. Un dossier dit d'information au maire (DIM) est remis à celui-ci au moins un mois avant le dépôt de la demande d'autorisation d'urbanisme ou de la déclaration préalable nécessaires à la construction d'une nouvelle installation et dans le même délai avant le début des travaux apportant des modifications substantielles. Dans les huit jours suivant la réception du DIM, le maire peut demander à l'exploitant une simulation de l'exposition aux champs électromagnétiques générés par l'installation. Cette simulation est intégrée au DIM, lequel est mis par le maire à la disposition du public dans les dix jours suivant sa réception. Les habitants disposent d'un délai de trois semaines pour formuler des observations.

Lorsque le préfet de département estime qu'une médiation est requise concernant une installation radioélectrique existante ou projetée, ou que celle-ci résulte, le cas échéant, d'une demande du maire, il peut convoquer une instance de concertation qui doit faciliter la résolution à l'amiable du différend.

Depuis fin 2019, un Comité national de dialogue relatif aux niveaux d'exposition du public aux ondes a été créé au sein de l'ANFR. Il participe à l'information de l'ensemble des parties prenantes (associations, opérateurs et constructeurs, collectivités...), notamment sur les niveaux d'exposition aux ondes dans l'environnement.

Contrôle de l'exposition du public

Chaque particulier peut solliciter gratuitement une mesure de son exposition aux ondes dans son logement ou dans

les lieux accessibles au public (parcs, commerces...). Ce dispositif est géré par l'ANFR. Le mécanisme est décrit dans la Figure 3 ci-dessus.

Réglementation relative aux basses fréquences

Cette réglementation concerne les lignes à haute tension (> 1 000 V en courant continu et > 1 500 V en courant alternatif) pour une fréquence de 50 Hz.

Le gestionnaire de transport public d'électricité contrôle le champ magnétique de :

- toute nouvelle ligne au plus tard douze mois après sa mise en service ;
- toute ligne de tension supérieure à 50 000 V ayant subi des modifications substantielles ou ayant été arrêtée pendant plus de deux ans. Le contrôle se fait douze mois après l'achèvement des travaux ou la remise en service.

Le gestionnaire établit un plan de contrôle et de surveillance (PCS) de la ligne considérée en indiquant les endroits où des personnes sont susceptibles d'être exposées à un champ électromagnétique. Les lignes existantes doivent être contrôlées au moins tous les dix ans en certains des points accessibles à des personnes (zones où des bâtiments sont construits, parcs...).

L'ensemble des résultats de mesures des PCS sont disponibles sur le site : www.cem-mesures.fr

Des collectivités et diverses associations agréées peuvent demander au gestionnaire du réseau public de transport d'électricité d'effectuer des mesures complémentaires. Ce dernier n'est pas tenu d'y donner suite. Il doit alors informer le préfet et le demandeur des raisons pour lesquelles il refuse de procéder aux mesures. Le préfet peut imposer au gestionnaire d'effectuer ces mesures dans les trois mois suivant son refus.

Conclusion

Le bruit demeure une nuisance importante à laquelle de nombreux Français sont exposés. Une période de calme

a été observée lors du confinement au printemps 2020, notamment dans les centres urbains : baisse drastique des trafics routier, ferroviaire et aérien, ainsi que de l'activité liée à l'arrêt de nombreux chantiers, à la fermeture de bars, de restaurants ou d'établissements diffusant de la musique. Une partie des citoyens ont pu redécouvrir des sons habituellement inaudibles, comme le chant des oiseaux. En revanche, certains bruits de voisinage (travaux de bricolage ou de jardinage, voix humaines...) ont été davantage perçus à certains endroits. Cet apaisement global a fait prendre conscience à certains du plaisir, voire de la

nécessité, d'être au calme. Cela pourrait aboutir à l'avenir à une aspiration à une meilleure protection contre le bruit.

Concernant les ONIE, la France est en train de transposer la directive (UE) 2018/1972 établissant le Code des communications électroniques européen. Les modifications concernant l'exposition porteront sur les points d'accès sans fil à portée limitée, dits « petites cellules », qui seront surtout déployés avec la montée en puissance de la 5G, en particulier lorsque la bande 26 GHz sera utilisable pour cette technologie.

Aux États-Unis : existence d'une forte politique scientifique et industrielle « public-privé » en faveur de la recherche sur les ONIEA

Par Yves FRENOT, Xavier BRESSAUD et Kévin KOK HEANG

Service pour la Science et la technologie de l'Ambassade de France aux États-Unis (Washington)

Aux États-Unis comme ailleurs, les utilisations des ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (ONIEA) se développent dans des domaines extrêmement variés. La recherche est particulièrement active en ce qui concerne l'interaction des ondes avec le vivant, que ce soit en vue de leur utilisation médicale ou s'agissant de leur impact sur la santé. L'omniprésence de cet axe de recherche dans des champs si divers fournit un angle pour passer en revue l'ensemble de l'écosystème américain : l'étude des ONIEA y est promue à l'échelle nationale par des programmes ambitieux portés par les agences fédérales de recherche. Les projets financés sont mis en œuvre tant par les grandes universités que par des entreprises *deep tech* se saisissant des innovations émergentes de la recherche, sous le regard intéressé des grands groupes technologiques. Cet écosystème foisonnant est observé et normé, sans toutefois le soumettre à trop de rigidité, par les agences fédérales de régulation qui cherchent un dosage efficace entre le principe de précaution et l'innovation.

Introduction

Le système américain de R&D repose sur quatre piliers qui en ont assuré, jusqu'à aujourd'hui, le succès : 1) un investissement massif du gouvernement fédéral ; 2) un groupe d'universités de recherche très compétitives et attractives ; 3) une participation élevée des entreprises à l'effort national en R&D ; et 4) la grande efficacité de son système de transfert de technologie. Ainsi, l'activité de recherche se répartit entre trois principaux groupes d'acteurs : le gouvernement fédéral, les universités de recherche (publiques ou privées) et les entreprises privées.

En l'absence d'un véritable ministère de la Recherche, la stratégie scientifique américaine, à l'échelle fédérale, est impulsée par la Maison Blanche (Office of Science and Technology Policy – OSTP), mais est très largement modulée par le Congrès qui décide, *in fine*, du financement des départements et agences fédérales impliqués. Ceux-ci disposent de quelques laboratoires propres, mais fonctionnent essentiellement comme des agences de moyens vis-à-vis des universités. Ces dernières disposent d'une très grande autonomie dans leurs activités de recherche, qui résulte notamment de sources de financement diversifiées, qui, outre leurs fonds propres, proviennent pour moi-

tié des agences fédérales, mais également des États, et d'entreprises privées. En 2020, le budget fédéral consacré à la R&D ⁽¹⁾ s'est élevé à 156 milliards de dollars (Mds\$). Il ne constitue néanmoins qu'environ un quart du montant total de l'investissement américain en R&D (de l'ordre de 550 Mds\$), le reste provenant d'entreprises et de fondations privées. La dépense des universités consacrée à la recherche est d'environ 70 Mds\$; une part conséquente est donc opérée au niveau fédéral ou par les entreprises elles-mêmes.

Au niveau fédéral, le sujet ONIEA ne bénéficie pas d'une stratégie dédiée. L'approche de l'OSTP consiste à dégager des priorités stratégiques et des problématiques générales à résoudre (par exemple, le maintien du *leadership* du pays dans les industries du futur, sécurité et innovation en matière de santé publique...), qui sont ensuite déclinées par grandes thématiques par les agences et départements. À l'échelle des laboratoires, la distinction OI/ONI, comme le rapprochement entre OE et OA ne semblent pas non plus jouer un rôle très structurant. Au plan fondamental, les projets impliquant des ONIE sont distribués dans différentes

(1) <https://fas.org/sgp/crs/misc/R46341.pdf>

catégories ⁽²⁾ de la physique, tandis que l'acoustique, en tant que telle, ne bénéficie pas d'une très forte visibilité. En revanche, du point de vue des applications, certains champs se structurent autour de propriétés ou d'usages plus pointus (par exemple, la photonique, la nanobiophysique, l'imagerie médicale...), comme nous allons essayer de l'illustrer à travers certains exemples qui ne prétendent pas donner une image exhaustive du domaine considéré.

Les programmes de recherche des agences fédérales impliquant les ONIEA

NSF

La National Science Foundation (NSF) est la référence en matière d'agence de financement de la recherche fondamentale (hors santé). Son budget était en 2020 de l'ordre de 8 Mds\$. Parmi le grand nombre de programmes qu'elle pilote, certains sont consacrés à l'étude des réseaux sans-fil pour eux-mêmes, comme les Platforms for Advanced Wireless Research – PAWR – ou le Millimeter-Wave Research Coordination Network. D'autres, comme Electronics, Photonics and Magnetic Devices, sont dédiés à la recherche sur la conception de systèmes *hardware* intégrant des aspects chimiques et biologiques dans l'optique d'application en matière de santé, de médecine et de suivi biologique et environnemental. Le pôle Engineering Biology and Health Cluster, qui vise à l'intégration des sciences de la vie et de l'ingénierie pour résoudre des problèmes de santé, soutient certains projets s'articulant autour des ONIEA. Le programme New Light and Acoustic Wave Propagation: Breaking Reciprocity and Time-Reversal Symmetry (NewLAW) a octroyé, sur quatre ans, un budget de 18 millions de dollars (M\$) réparti entre neuf équipes d'ingénieurs travaillant sur la thématique « Penser différemment la propagation des ondes acoustiques et lumineuses » et ayant produit à la fin 2019 une vingtaine d'articles.

NIH

Le National Institute of Health (NIH), dont le budget était de près de 40 Mds\$ en 2020, concentre l'ensemble de ses moyens sur la recherche médicale. Plusieurs études portant sur l'impact des ondes sur la santé sont ainsi financées (voir *infra*). Les projets soutenus par le NIH sont répertoriés par thème sur un site dédié ⁽³⁾. Concernant les ONIEA, mentionnons parmi ses innombrables programmes le Common Fund's Stimulating Peripheral Activity to Relieve Conditions qui vise à accélérer le développement d'outils thérapeutiques permettant de moduler l'activité électrique des nerfs, et parmi ses sous-structures, le National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering qui dispose de laboratoires propres dédiés à la recherche sur l'imagerie.

(2) Sciences de l'atome, des molécules et de l'optique (AMO) ou Physique de la matière condensée (CMMP), par exemple. On peut se référer aux rapports de la National Academy of Science pour plus de détails sur la structuration de ces catégories : <https://www.nap.edu/catalog/25613/manipulating-quantum-systems-an-assessment-of-atomic-molecular-and-optical>

(3) <https://reporter.nih.gov/search/RBoJ9LdhFUarozek66YA7Q/projects>

USDA

Le Department of Agriculture (USDA) a consacré près de 3 Mds\$ en 2020 à la recherche, notamment en pilotant des programmes destinés à assurer la qualité nutritionnelle et la sécurité alimentaire des produits. Parmi les technologies testées et développées, celles fondées sur les ONIEA (lumières et champs électriques pulsés, micro-ondes, traitements ultrasons ou magnétiques...) permettent d'améliorer la qualité des produits ou de tester de façon non destructive leur qualité et leurs propriétés physico-chimiques. Mentionnons en particulier le programme Food Safety (National Program 108 ⁽⁴⁾), dans le cadre duquel plusieurs projets explorent les possibilités offertes par les ONIEA, comme :

- le développement de technologies alternatives d'intervention pour les produits frais ou peu « processés » ⁽⁵⁾ ;
- la photodégradation des aflatoxines M1 et B1 dans les aliments liquides épais, un processus utilisant la lumière ultraviolette de longueur d'onde courte ⁽⁶⁾.

DARPA

La Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) dépend du Département de la Défense (DoD) qui dispose du plus gros budget de recherche fédéral (65 Mds\$ en 2020). Elle pilote des programmes ayant des visées duales, dont certains à un niveau très fondamental et couvrant tout le champ scientifique. Elle porte notamment de nombreux programmes impliquant des ONIE ^(7,8) (laser, photonique, radars...) ou ONIA (détection sous-marine, extinction de flammes par ondes acoustiques...). D'autres programmes abordent la compréhension des mécanismes d'interaction des ONIEA avec le vivant. Initié il y a plus de dix ans et maintenant arrivé à terme, le programme QuBE (Quantum effects in Biological Environments) ^(9,10) avait déjà pour but de mieux comprendre les phénomènes quantiques à l'œuvre dans les systèmes biologiques utilisés comme capteurs. Plus récent, le programme RadioBio s'intéresse à la communication utilisant des ondes électromagnétiques entre les biosystèmes. Coordonné par l'entreprise Phytlsigns/Vivent SARL ⁽¹¹⁾ et l'Université GeorgiaTech, ce programme soutient des projets très divers menés par plusieurs universités ; mais la liste complète de ces projets n'est pas publique, du fait notamment que certains sont « classifiés ». Le Biology Technology Office, qui regroupe les programmes liés à la biologie fondamentale,

(4) <https://www.ars.usda.gov/research/programs-projects/?mode=Code=80-72-05-30>

(5) <https://www.nal.usda.gov/fsrio/research-projects/development-alternative-intervention-technologies-fresh-or-minimally-processed-foods>

(6) <https://www.nal.usda.gov/fsrio/research-projects/photodegradation-aflatoxins-m1-and-b1-highly-turbid-liquid-foods-using-short-wave-length>

(7) <https://www.darpa.mil/program/nascent-light-matter-interactions>

(8) <https://www.darpa.mil/program/extreme-optics-and-imaging>

(9) <https://www.darpa.mil/program/quantum-effects-in-biological-environments>

(10) <https://idstch.com/technology/biosciences/quantum-biology-taking-first-steps-lead-fundamentally-new-technologies-including-bio-inspired-sensors/>

(11) Une entreprise suisse : <https://www.phytlsigns.com/company/> et <http://vivent.ch/>

compte lui aussi certains projets impliquant des ONIEA, comme Advanced Plant Technologies ou Persistent Aquatic Living Sensors. Dans une optique radicalement différente, le programme Next-Generation Nonsurgical Neurotechnology⁽¹²⁾ explore les relations homme-machine au travers des méthodes non invasives.

D'autres organes fédéraux, comme le Department of Energy (DoE) ou l'Air Force Office of Scientific Research (AFOSR), disposent chacun d'un budget de recherche conséquent et portent quelques projets interdisciplinaires en lien avec les ONIEA.

Structuration de l'écosystème articulé autour des ONIEA

Dans le secteur des télécommunications, la recherche et le développement sont bien sûr très développés et l'actualité est, aux États-Unis comme ailleurs, très concentrée sur les innovations qui pourraient accompagner le déploiement de la 5G (voir *infra*). Plutôt que de détailler cet aspect classique de l'usage des ondes, essayons d'illustrer le dynamisme de l'écosystème américain à travers quelques exemples qui sont à des degrés de maturité différents.

Photonique

Les travaux conduits à l'Université de Rochester sur le contrôle des propriétés électroniques de la matière à l'aide de lasers⁽¹³⁾ ont été soutenus au niveau fédéral⁽¹⁴⁾. Ils s'inscrivent naturellement dans la participation de cette université à un *cluster*⁽¹⁵⁾ regroupant acteurs académiques et industriels locaux de la photonique, un *cluster* qui porte notamment le partenariat public-privé AIM Photonics⁽¹⁶⁾ (American Institute for Manufacturing Integrated Photonics). D'autres *clusters* centrés sur les métiers de la « photonique » existent dans tout le pays (Connecticut, Floride, Nouveau Mexique, Arizona, Colorado). La National Photonic Initiative (NPI), créée en 2012, a joué un rôle crucial dans le regroupement d'acteurs gouvernementaux, académiques et industriels de ce domaine, dans l'orientation des choix d'investissement dans cette technologie devenue aujourd'hui stratégique et a ainsi structuré le secteur. Le salon Photonics West, qui regroupe chaque année à San Francisco chercheurs et industriels venus du monde entier, consacre l'une de ses trois sessions spécialisées – BIOS –, aux interactions avec le vivant.

Médecine bioélectronique

Le Photoacoustic & Ultrasonic Systems Engineering Lab (Pulse Lab⁽¹⁷⁾) de l'Université Johns Hopkins, s'intéresse à la libération modulée de médicaments par utilisation d'ultrasons⁽¹⁸⁾. En partenariat avec l'Université d'Arkansas, le

département d'ingénierie mécanique de cette université a également développé des outils de diagnostic (cancer) opérant dans le domaine optique pour limiter les radiations ionisantes. Au sein du College of engineering de l'Université Carnegie Mellon⁽¹⁹⁾, une équipe travaille sur l'utilisation des ultrasons comme guide de la lumière pour l'amélioration de l'imagerie médicale. En synergie avec le dynamisme de la recherche universitaire du secteur, l'investissement des GAFAs dans le domaine de la santé, centré sur l'exploitation des données, ne néglige pas à ce titre les interactions des ondes et du vivant. Apple, par exemple, s'est concentré sur la mesure de paramètres du vivant à l'aide de capteurs électroniques. La création en 2016 par Alphabet et GSK de Galvani Bioelectronics⁽²⁰⁾, une société nantie de 700 M\$, a marqué les esprits : celle-ci développe, en propre et en collaboration avec des laboratoires universitaires, des implants miniaturisés capables de stimuler des parties du corps grâce aux ondes électriques. La société estime que les premiers traitements pourront être commercialisés en 2023. Le marché de la médecine bioélectronique est vu comme très prometteur et le paysage est en (re)composition : nombreuses fusions et acquisitions, incertitude sur les produits et les modèles d'affaires qui en émergeront. Ainsi, derrière les acteurs les plus visibles, se cache un nombre important d'entreprises (Medtronic Plc., Boston Scientific Corporation, Liva Nova Plc, Electrocore, Nevro, et St. Jude Medical) et une multitude de *start-ups* qui cherchent à valoriser certaines des technologies développées dans les laboratoires universitaires. Mentionnons à titre d'exemple la *start-up* Iota Bioscience⁽²¹⁾ (rachetée récemment par le japonais Astellas), qui détient une licence exclusive sur les senseurs bioélectroniques (chargés par ultrasons) implantables qui, développés à UC Berkeley, entrent en interaction directe avec le système nerveux.

Transfert d'énergie

Les technologies développées pour assurer le chargement des implants par le biais d'ondes acoustiques peuvent aussi être exploitées dans des contextes tout à fait différents. Au sein du John and Claire Bertucci Nanotechnology Laboratory de l'Université Carnegie Mellon⁽²²⁾, une équipe explore les effets piézoélectriques notamment en vue de l'utilisation d'ultrasons pour alimenter des capteurs pour les *smart cities*. Dans le cadre du programme Electrical, Communications and Cyber Systems (ECCS) de la NSF, deux projets sur le transfert d'énergie par ondes acoustiques pour alimenter des instruments peu énergivores sont menés, l'un à VirginiaTech⁽²³⁾ et l'autre à GeorgiaTech⁽²⁴⁾, tous deux en lien avec des *start-ups*. Des technologies analogues sont également développées par la *start-up* SonicEnergy⁽²⁵⁾. Les ONIE permettent elles

(12) <https://www.darpa.mil/news-events/2019-05-20>

(13) <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.98.121305>

(14) <https://www.nap.edu/read/25613/chapter/9?term=rochester#249>

(15) <https://newyorkphotonics.org/>

(16) <https://www.aimphotonics.com/about-us>

(17) <https://pulselab.jhu.edu/>

(18) <https://hub.jhu.edu/2017/01/24/ultrasound-pulse-release-drugs-to-rat-brain/>

(19) <https://www.ece.cmu.edu/news-and-events/story/2019/04/sound-steers-light-through-the-brain.html>

(20) <https://www.galvani.bio/>

(21) <https://iota.bio/>

(22) <https://www.cmu.edu/news/stories/archives/2019/september/power-full-sound-waves.html>

(23) https://nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1711139

(24) https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1829821

(25) <https://sonicenergy.com/>

aussi de transporter de l'énergie, mais de manière mieux canalisée que dans les fours à micro-ondes : si la recharge de véhicules électriques pendant qu'ils roulent semble encore assez lointaine ⁽²⁶⁾, la même perspective d'un rechargement en cours d'utilisation pour les téléphones cellulaires et autres outils électroniques a donné naissance à plus de 200 *start-ups* : d'après tracxn.com ⁽²⁷⁾, sept des dix plus prometteuses sont américaines (par exemple, Ossia, Energeous, GuruWireless...).

Régulation des ONIEA : protection de la santé et encouragement de l'innovation

À l'échelle fédérale, se manifeste une tension entre le devoir d'assurer la protection des citoyens et l'impératif de la stimulation de l'innovation. La balance s'exprime dans la formule *light touch regulation*, une réglementation *a minima*, dont le souci est surtout de laisser une marge de liberté suffisante à l'innovation. Les agences fédérales chargées de la régulation s'appuient cependant sur un travail approfondi et sur les résultats de recherche existants pour formuler leurs recommandations et fixer des normes d'utilisation.

NIST

Le National Institute of Standards and Technology (NIST), qui dépend du Département du Commerce, est une agence fédérale qui mène des activités particulières de recherche. Son rôle est de définir des cadres de travail et des standards n'ayant en général pas de caractère contraignant, mais étant dans les faits des références. Le NIST dispose de plusieurs programmes liés à l'utilisation des ondes pour répondre à des problématiques de métrologie, de caractérisation des matériaux ou d'imagerie : Magnetics, Optical physics, Quantum information science ou encore Radiation, Spectroscopy et celui se situant à l'interface avec le vivant, à savoir Nanobiophotonics. Le NIST procède aussi, indépendamment des questions de santé, à des mesures d'exposition aux radiations, notamment s'agissant des technologies qui pourraient être utilisées dans le cadre de la 5G.

FDA

La Food and Drugs Administration (FDA), qui dépend, quant à elle, du Department of Health and Human Services, est la principale agence fédérale de régulation dans le domaine de la santé publique. Ses rapports les plus complets sur l'impact sur la santé des radiations (ionisantes et) non ionisantes ont été publiés dans les années 2000-2010. En octobre 2018, elle a produit un document portant sur les normes et la réglementation applicables aux produits électroniques de consommation courante ^(28,29) (non médi-

caux). Plus pointu, Biosensing, Ultrashort Laser Therapeutics and Nanobiophotonics est un programme d'évaluation de l'efficacité et de la sûreté de ces procédés. La FDA régit aussi l'utilisation médicale des ONIEA, notamment l'utilisation des lasers ⁽³⁰⁾, des micro-ondes, de la résonance magnétique nucléaire ⁽³¹⁾, des ultrasons ⁽³²⁾ et autres sources de radiofréquences. Lors du développement de nouveaux outils, chercheurs et innovateurs sont invités à entretenir un contact étroit avec l'agence, qui propose des procédures permettant d'autoriser des expérimentations à différentes échelles pour mettre au point des dispositifs innovants. Peut notamment être cité le Breakthrough Devices Program ⁽³³⁾.

La FDA s'appuie aussi sur des travaux du NIH, qui a mis en place un programme intitulé Non-Ionizing Radiation Programme ⁽³⁴⁾, lequel détaille les mesures et règles à suivre pour assurer la protection des personnels travaillant sur les campus du NIH. Le NIH héberge aussi le National Institute of Environmental Health Sciences qui, par le biais de son National Toxicology Program, est l'institut dédié aux effets des ONIE sur la santé.

Enfin, la FDA travaille avec l'Environmental Protection Agency (EPA) en matière de régulation de l'impact des ondes non ionisantes sur la qualité de la nourriture ⁽³⁵⁾. En revanche, aucune étude d'ampleur n'a été conduite concernant leur impact sur l'environnement.

FCC

La Federal Communications Commission (FCC), qui est placée sous l'autorité du Congrès, est le principal régulateur dans le domaine des télécommunications. Moins centrée sur les questions de santé, elle assure *in fine* la régulation concernant les ondes radiofréquences : tout instrument émetteur doit être agréé ⁽³⁶⁾. C'est donc elle qui centralise les informations concernant les effets de la 5G sur la santé humaine. Pour satisfaire l'administration américaine, qui a fait du déploiement de la 5G une priorité, la FCC a significativement affaibli les réglementations relatives à l'impact environnemental de l'implantation des antennes. S'appuyant seulement sur des rapports de l'OMS et de la FDA, elle a estimé, qu'il n'existait pas, à ce jour, de « preuve scientifique » de risques, et n'indique qu'« à titre d'information » que certaines études émettent sur ce point des réserves (renvoyant ainsi aux travaux de la FDA, et donc à ceux du NTP).

(26) <https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1575364>

(27) <https://tracxn.com/d/trending-themes/Startups-in-Wireless-Charging>

(28) <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/radiation-emitting-products-and-procedures/home-business-and-entertainment-products>

(29) <https://www.fda.gov/medical-devices/cdrh-research-programs/ultrasonics-laboratory>

(30) <https://www.fda.gov/medical-devices/cdrh-research-programs/biosensing-ultrashort-laser-therapeutics-and-nanobiophotonics>

(31) <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/medical-imaging/mri-magnetic-resonance-imaging>

(32) <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/medical-imaging/ultrasound-imaging>

(33) <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/breakthrough-devices-program>

(34) <https://www.ors.od.nih.gov/sr/dohs/Documents/NIH%20Non-Ionizing%20Radiation%20Program.pdf>

(35) <https://www.epa.gov/radiation/what-food-irradiation>

(36) <https://www.fcc.gov/consumers/guides/wireless-devices-and-health-concerns>

La société civile

La société civile est, dans son ensemble, plus méfiante quant aux effets sanitaires et environnementaux des ONIE. Des sociétés savantes, comme la Health Physics Society⁽³⁷⁾ ou la BioelectroMagnetics Society⁽³⁸⁾, sont très investies sur le sujet ; de nombreuses associations, comme Americans for Responsible Technology, et des *Think Tanks*, comme le National Resources Defense Council ou l'Environmental Health Trust, qui scrutent l'actualité et les travaux de recherche, estiment que les recommandations de la FCC reposent sur des études trop anciennes. Ainsi, malgré l'arsenal impressionnant dont disposent les agences, les démarches et les questionnements sur le déploiement de la 5G relèvent plus de l'action de groupes de citoyens, d'associations, y compris professionnelles, d'ONG, etc. que, de celle des autorités et des institutions qui, sur ce plan, ont fait le choix de l'innovation plutôt que celui de la précaution.

Conclusion

Les ONIEA, si elles ne sont pas formellement mises en avant comme priorité stratégique à l'échelle fédérale, bénéficient aux États-Unis d'une attention convergente s'exprimant au travers de moyens importants à la fois publics, militaires, académiques et privés, et à la hauteur des nombreuses innovations qu'elles promettent, notamment dans le cadre de leurs interactions avec le vivant. Les organes de régulation sont organisés pour quantifier les ef-

(37) <https://hps.org/>

(38) <https://www.bems.org/>

Présentation du Service pour la science et la technologie de l'Ambassade de France aux États-Unis

Ce service compte une vingtaine d'agents aux profils scientifiques variés répartis entre l'Ambassade de Washington et les consulats généraux. Son rôle est d'assurer une veille scientifique et technologique dans ce pays, de faciliter les coopérations scientifiques franco-américaines et de promouvoir la science et la technologie française aux États-Unis. L'ensemble de l'équipe a contribué à la collecte des informations présentées dans cet article, dont la mise en forme a été effectuée par Yves Frenot, conseiller scientifique, directeur de recherche au CNRS, spécialiste de l'écologie polaire, Xavier Bressaud, attaché scientifique, professeur de mathématiques à l'Université Toulouse III – Paul Sabatier détaché, et Kévin Kok Heang, ingénieur et spécialiste de l'IA sous les angles scientifiques et politiques, tous trois en poste à Washington.

fets des ondes dans de multiples cadres, mais sont avant tout soucieux de ne pas brider l'innovation et accordent ainsi une certaine confiance à la capacité des acteurs à s'auto-réguler. Ils laissent de fait les organisations non gouvernementales, académiques, sociales et professionnelles mener le débat sur les impacts de ces techniques. La dynamique de l'ensemble est puissante, et s'exprime fortement à l'export, en particulier en matière médicale.

Recherche polycentrique, PME innovantes et exportations : les clés d'un succès allemand centré sur la photonique

Par Julien POTIER

Service pour la Science et la technologie de l'Ambassade de France en Allemagne (Berlin)

Pionnière dans la recherche sur les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (ONIEA), l'Allemagne bénéficie d'une recherche universitaire, extra-universitaire et industrielle polycentrique, soutenue par des investissements publics et privés conséquents. La recherche sur les usages des ONIEA est essentiellement structurée autour du domaine photonique, allant de l'ultraviolet aux térahertz. La dynamique d'innovation dans ce secteur favorise l'émergence d'un tissu industriel dense, en particulier dans la production d'outils et de procédés industriels et à usage médical. De petites et moyennes entreprises innovantes tirant des exportations une part croissante de leur chiffre d'affaires y jouent un rôle prépondérant. L'Allemagne se distingue également par le fort encadrement institutionnel des ONIEA. Soutenu par les agences fédérales de radioprotection, un champ de recherche portant sur les effets potentiels des ONIEA sur la santé et l'environnement se développe, contribuant à la mise en place d'une législation prudente.

Introduction

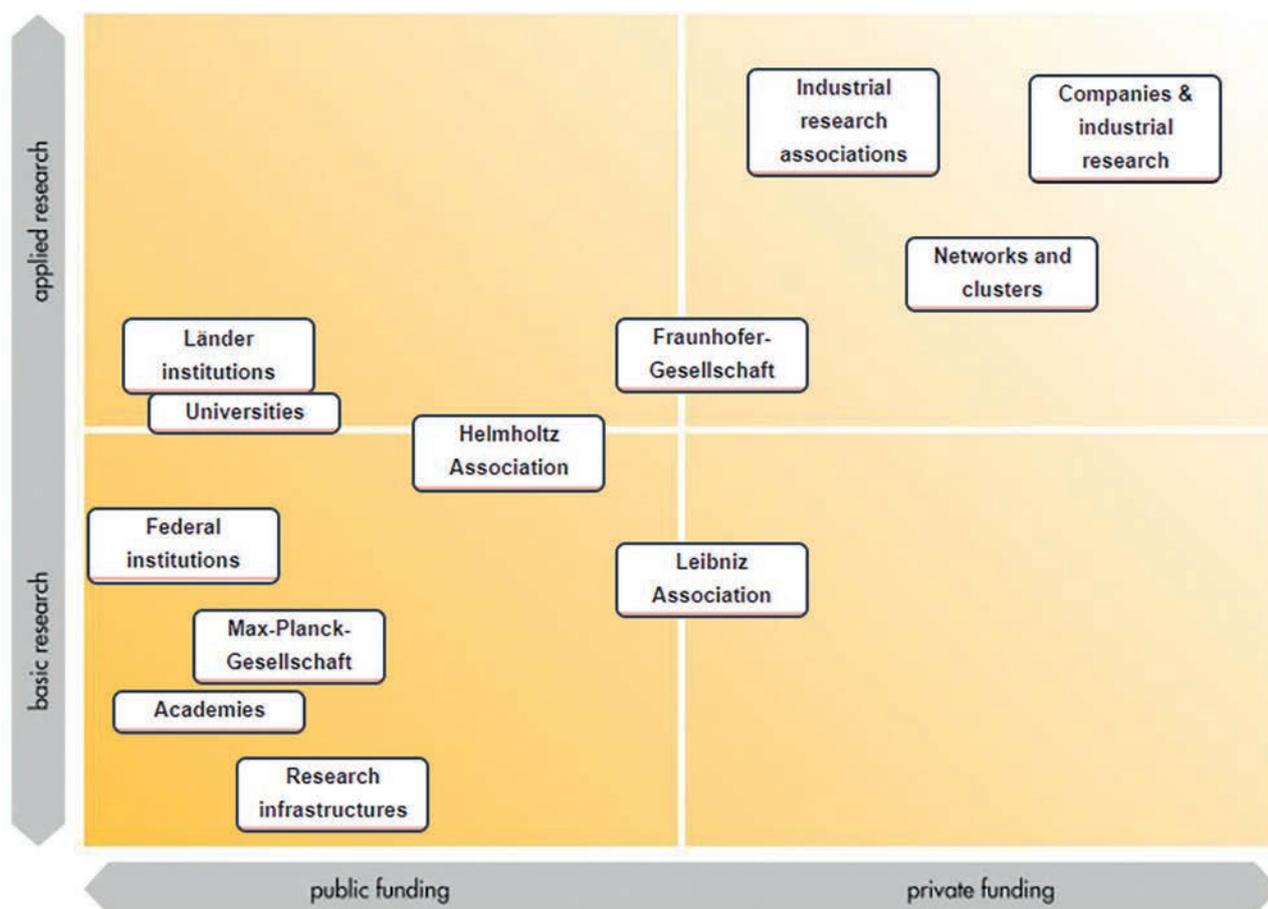
Historiquement pionnière dans les sciences physiques et les découvertes sur les ONIEA, la patrie d'Hermann Von Helmholtz, d'Heinrich Hertz, de Max Planck et d'Albert Einstein prend aujourd'hui encore une part importante dans l'émergence de nouveaux usages des rayonnements non ionisants et l'acquisition de nouvelles connaissances en la matière, en particulier dans le domaine photonique. L'Allemagne bénéficie d'une recherche polycentrique soutenue par l'État et les Länder. Les pouvoirs publics soutiennent de manière significative la recherche fondamentale, mais également la recherche appliquée, jusqu'aux applications industrielles. Les instituts Fraunhofer, les universités techniques et les *clusters* jouent un rôle particulièrement important dans le transfert technologique à l'industrie. L'Allemagne a ainsi pu faire émerger un tissu économique d'entreprises innovantes œuvrant sur des applications variées des ONIEA. Leur activité est particulièrement dynamique dans la production de matériels et d'outils destinés au secteur médical et à la production industrielle. La progression de nouveaux usages et la prudence marquée du grand public vis-à-vis des effets des rayonnements électromagnétiques ont par ailleurs suscité des travaux de recherche sur les effets des ONIEA sur la santé et l'élaboration d'une législation protectrice.

Les agences gouvernementales de radioprotection investissent le champ des ondes non ionisantes. Au-delà des marchés porteurs dans les usages industriels et médicaux, le monde de la recherche allemand est actif sur de nouvelles applications. Les usages dans l'agriculture et l'agroalimentaire font l'objet de projets de recherche, mais leur potentiel reste incertain. Par ailleurs, d'importants investissements sont actuellement réalisés dans la photonique au service des technologies de la communication, et plus particulièrement des technologies quantiques.

Une recherche polycentrique bénéficiant d'un fort investissement public et privé

Il est difficile de circonscrire avec précision l'activité de recherche sur les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques, tant la diversité de leurs applications est large, tout comme le spectre de fréquences concerné, allant des ultraviolets jusqu'aux fréquences les plus basses. Les grands acteurs allemands de la recherche sont tous impliqués sur ce vaste domaine.

Parmi les grandes universités, le groupement TU9 rassemble les principales universités techniques (TU), établissements spécialisés dans les sciences de l'ingé-



Paysage des acteurs de la recherche en Allemagne, par niveau de recherche et sources de financement – Source : Site Internet Research in Germany : www.research-in-germany.org

nier. Certaines universités de sciences appliquées – appelées *Fachhochschulen* ou *Hochschulen für angewandte Wissenschaften*, elles sont plus ou moins l'équivalent des IUT – disposent de bonnes capacités en matière de recherche appliquée. En outre, quatre grands organismes de recherche extra-universitaires disposent d'une autonomie de gestion et de financements apportés conjointement par l'État fédéral et les Länder. L'activité de la société Max Planck est orientée vers la recherche fondamentale, avec 1,8 milliards d'euros (Mds€) de budget en 2018, assuré à 80 % par un financement institutionnel public et à 20 % sur ressources propres. La communauté Helmholtz regroupe les grandes infrastructures de recherche, avec un budget 2018 de 4,8 Mds€, financé à 70 % par l'État fédéral et les Länder, le reste en ressources propres. La société Fraunhofer tire près de 84 % des ressources composant son budget de 2,8 Mds€ des financements obtenus sur projets, dont 70 % issus de contrats avec l'industrie et 30 % de ceux conclus avec le secteur public. La contribution totale du secteur public au financement des instituts Fraunhofer s'élève à 22 %. Enfin, la communauté Leibniz rassemble des instituts de recherche appliquée à l'ancrage local marqué, s'intéressant à des thèmes souvent liés aux enjeux d'environnement, d'agriculture et de sciences humaines. Son budget 2019 s'élevait à 2,1 Mds€, dont les deux tiers provenaient d'un financement institutionnel public, assumé

à parité par l'État fédéral et les Länder ; le dernier tiers correspondant aux recettes tirées de contrats, principalement publics⁽¹⁾. Enfin, s'y ajoutent les importantes capacités de recherche des acteurs industriels, qui interviennent souvent en synergie avec les institutions précitées, en particulier avec les instituts Fraunhofer, au sein de *clusters* d'innovation. Les acteurs privés se regroupent également au sein d'associations de recherche industrielle (voir la figure ci-dessus).

L'écosystème d'innovation photonique bénéficie du soutien public et de débouchés importants à travers la production d'outils et de procédés industriels

Le domaine de recherche identifiable comme concernant le plus spécifiquement l'usage des ondes non ionisantes est celui de la photonique ; il couvre le spectre des rayon-

(1) Service pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France en Allemagne, « Fiche pays Allemagne », CurieXplore, août 2020. Consultable à l'adresse suivante : <https://curieexplore.enseignement-sup-recherche.gouv.fr/fiche/DEU>

nements non ionisants allant de l'ultraviolet jusqu'aux térahertz ⁽²⁾. La photonique est en Allemagne un sujet bien identifié qui désigne non seulement un domaine de recherche auquel des programmes et des rapports gouvernementaux sont consacrés, et auquel des instituts et *clusters* sont dédiés, mais également un secteur économique institutionnalisé, structuré notamment autour de Spectaris, l'association composée d'industriels de la photonique, et d'OptecNet, le réseau d'innovation pour les technologies optiques.

(2) Classification du syndicat professionnel Spectaris.

Le ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche (*Bundesministerium für Bildung und Forschung - BMBF*) s'est doté en 2012 d'un programme dédié aux technologies photoniques – *Photonik Forschung Deutschland* –, qui arrivera à son terme en 2022. Le BMBF estime son soutien annuel à la recherche photonique à 90 millions d'euros. Dans le rapport *Photonics in Germany* produit en 2019 par Trias Consult, l'association allemande des constructeurs de machines et d'équipements (VDMA) salue ce soutien public apporté au développement des technologies photoniques, en particulier industrielles, et voit les clés du succès allemand dans la mise en place d'un cadre législatif favorable et d'une coopération étroite entre les instituts de recherche et les acteurs de l'industrie.

L'écosystème photonique allemand : de la recherche à l'industrialisation et à la formation

La présence d'une industrie structurée autour de la photonique place les instituts spécialisés de la société Fraunhofer et des universités techniques (TU) au premier plan de la recherche sur ces technologies. Ainsi, l'Institut Fraunhofer pour les technologies laser (ILT) d'Aix-la-Chapelle, avec ses 500 employés, développe de nouvelles solutions de production industrielle dans plusieurs secteurs. À titre d'exemple, l'*Extreme High-Speed Laser Material Deposition* (EHLA), développé avec l'Université technique d'Aix-la-Chapelle (RWTH), est destiné à remplacer, car plus sobre en énergie et plus précis, le chromage dur et la pulvérisation thermique. La technologie EHLA a pu bénéficier d'un transfert rapide au profit de l'industrie grâce à plusieurs partenariats public-privé. L'entreprise « spin-off » ACunity, issue des laboratoires de l'ILT, a notamment coopéré avec l'entreprise néerlandaise Hornet Laser Cladding pour la livraison de trois systèmes EHLA au groupe chinois Hebei Jingye. Le Centre laser de Hanovre (LZH) est aussi une des institutions en pointe dans divers applications des technologies laser, avec une orientation marquée pour le transfert d'innovation à l'industrie. L'Institut Fraunhofer pour l'optique appliquée (IOF), situé à Iéna, développe des systèmes optiques innovants destinés aux micro- et nano-technologies, aux interactions humain-machine et aux technologies quantiques. Il met au point notamment la technologie d'optique *freeform*, pour des applications variées allant des télescopes et capteurs biomédicaux jusqu'aux systèmes d'assistance à la conduite. Il faut aussi citer l'Institut Fraunhofer pour les technologies silicium (ISIT), pour la production d'instruments de mesure (micro-miroirs, systèmes LIDAR), ainsi que l'Institut Fraunhofer Heinrich Hertz (HHI), spécialisé dans les technologies des télécommunications (dont la communication optique sans fil) ou encore l'Institut Fraunhofer pour la physique des solides (IAF), spécialisé sur les applications des circuits haute fréquence dans les technologies de communication, l'électromobilité, les capteurs spectroscopiques et les semi-conducteurs. L'Institut technologique de Karlsruhe (KIT), université technique et premier centre de recherche universitaire d'Allemagne, et l'Université technique de Munich (TU Munich) sont aussi très présents sur les technologies photoniques. Les instituts Fraunhofer et les universités techniques sont complémentaires avec les capacités de recherche fondamentale des instituts Max Planck pour la physique de la lumière (MPL Erlangen), pour la chimie biophysique (Heidelberg) et pour l'optique quantique (MPQ Munich), et avec celles des instituts Leibniz pour les technologies photoniques (IPHT Iéna), pour la microélectronique innovante (IHP Francfort-sur-l'Oder) ⁽³⁾ et sur la croissance des cristaux (IZK Berlin) ⁽⁴⁾.

D'autres organismes de recherche s'associent aux instituts spécialisés pour développer des solutions photoniques nouvelles répondant à une grande variété d'enjeux. Des applications sont ainsi étudiées en matière de ressources agricoles, par exemple dans la caractérisation optique et électrique des végétaux (Jülich, Leibniz ATB) ou le traitement ultraviolet des aliments (FU Berlin). Les applications sont plus nombreuses dans le domaine médical, entre autres dans l'ophtalmologie, la neurologie ou la néphrologie. L'Institut Leibniz HKI explore l'application des technologies photoniques dans le diagnostic et le traitement des infections. Les synergies entre la recherche médicale et la photonique sont suffisamment nombreuses pour voir l'émergence de centres de recherche dédiés, comme le Centre pour la médecine optique et photonique à Iéna.

L'intérêt croissant que connaissent les applications photoniques depuis les années 2000 et le besoin de main-d'œuvre qualifiée de ce secteur en croissance ont conduit à la mise en place de formations universi-

(3) LACROIX L., *Technologies quantiques. Stratégie de recherche en Allemagne*, février 2021.

(4) *Ibid.*

taires destinées à attirer les étudiants internationaux spécialisés dans ce domaine. L'Institut technologique de Karlsruhe (KIT) a créé en 2006 la *Karlsruhe School of Optics & Photonics* (KSOP), avec la volonté d'attirer les talents étrangers en leur proposant d'accéder à des cursus master et doctorat, puis en les accueillant dans ses laboratoires de recherche. Le KIT compte deux autres institutions semblables destinées spécifiquement aux étudiants internationaux (la *Carl Benz School of Engineering* et la *HECTOR School of Engineering and Management*). Dans un but similaire, la société Max Planck, alliée à plusieurs universités et instituts, a créé en 2018 trois Max Planck Schools dont l'activité s'inscrit dans une phase pilote s'étendant sur cinq ans. Ces trois écoles supérieures sont dédiées respectivement aux sciences cognitives, aux sciences physiques, chimiques et biologiques, et à la photonique (la *Max Planck School of Photonics*). Elles bénéficient d'un soutien du BMBF, à hauteur de 9 millions d'euros sur cinq ans.

Plusieurs *clusters* de compétences créent des synergies entre les différentes capacités de recherche présentes sur un même territoire, en association plus ou moins forte avec le monde de l'industrie. Les régions de l'éna et d'Aix-la-Chapelle se distinguent par la richesse de leurs écosystèmes industriels et de recherche ⁽⁵⁾.

Le *Photonics Cluster* d'Aix-la-Chapelle ⁽⁶⁾, à l'orientation très industrielle, est spécialisé dans les technologies laser. Il rassemble sur le site du *High-Tech Campus* de l'Université RWTH plusieurs organismes de recherche : l'Institut Fraunhofer ILT, l'*Aachen Center for Additive Manufacturing* et le *Digital Photonic Production Forschungscampus* ainsi que de nombreux partenaires privés, dont Siemens, Philips Photonics, MTU Aero Engine, Innolite et Trumpf. Le *Photonics Cluster* couvre les applications dans l'usinage industriel, le médical, la bio-photonique et les technologies de mesure.

Le réseau *Fraunhofer Leistungszentrum Photonik* à l'éna ⁽⁷⁾, à orientation plus académique, regroupe une large palette de compétences, dont les applications laser, les capteurs optiques, les systèmes d'imagerie, l'instrumentation optique pour l'environnement et la biologie, ainsi que l'optique pour les technologies quantiques. Il rassemble l'Institut Fraunhofer IOF, l'Université Schiller, l'Institut Helmholtz de l'éna, l'Institut Leibniz IPHT, l'Institut Leibniz HKI et la *Max Planck School of Photonics*.

(5) Pour une liste plus exhaustive des *clusters*, voir : <https://spie.org/industry-resources/photonics-clusters/european-clusters>

(6) RWTH Aachen Campus, « Photonic Cluster ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.rwth-campus.com/en/forschung/photonics-cluster/>

(7) Institut Fraunhofer IOF, « Leistungszentrum Photonik ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.leistungszentrum-photonik.de/>

En dehors du champ de la photonique, il n'existe pas de programmes gouvernementaux récents sur le développement des usages des ONIEA dans le spectre allant du gigahertz aux basses fréquences, ni de *clusters* dédiés à des usages émergents dans ce spectre de fréquences. Les projets de recherche explorant ces sujets semblaient d'ailleurs plus nombreux par le passé qu'ils ne le sont aujourd'hui.

Les activités de recherche identifiées à ce jour sont soit normatives, portant sur des applications déjà répandues, soit trop fondamentales pour faire déjà l'objet d'une institutionnalisation et d'applications industrielles. Dans le domaine acoustique, l'Institut Fraunhofer pour la physique du bâtiment (IBP) étudie différents usages traditionnels de l'acoustique, allant de l'isolation sonore jusqu'à l'optimisation des instruments de musique. L'Institut fédéral de métrologie (PTB Berlin/Braunschweig), placé sous la tutelle du ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie (*Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – BMWI*), travaille sur l'acoustique appliquée aux normes des bâtiments et des infrastructures de mesure comme les chambres anéchoïques ou réverbérantes. En recherche fondamentale, des chercheurs de l'Institut Max Planck pour les systèmes intelligents (MPI-IS Stuttgart) explorent la méthode d'holographie acoustique, qui permet de manipuler des particules minuscules à l'aide d'ultrasons, et travaillent à son application dans la médecine. Dans un autre

domaine, un projet d'utilisation des micro-ondes pour faciliter la transformation de la biomasse est mené par l'Institut technologique de Karlsruhe (KIT).

Cette faiblesse apparente de la recherche sur les usages des ONIEA hors photonique peut s'expliquer en partie par le peu d'informations disponibles dans le domaine de la recherche militaire, qui est particulièrement concernée par les technologies de communication par satellite, de détection radar, de radiocommunications et d'acoustique. Il est possible qu'elle soit aussi l'expression d'une relative faiblesse des investissements correspondants dans le domaine militaire, et donc dans les applications civiles qui y sont liées.

Hors photonique, l'activité de recherche portant sur les ONIEA se concentre principalement sur l'étude des effets indésirables des rayonnements dus aux usages et aux activités existantes (voir *infra*).

La dynamique d'innovation dans le domaine photonique alimente l'émergence d'un tissu industriel dense, qui tire des exportations l'essentiel de sa croissance

La forte structuration de la recherche en photonique et son orientation vers la recherche appliquée sont liées à un secteur économique émergent, caractérisé en Allemagne par

la variété de ses activités, ses PME innovantes et sa capacité d'exportation. En 2019, le secteur a réalisé un chiffre d'affaires de 37 milliards d'euros, et employait directement environ 125 000 personnes⁽⁸⁾. En 2016, la production photonique allemande concernait le matériel de mesure et de vision assistée (22 %), les technologies médicales et les sciences de la vie (19 %), les composants et systèmes optiques (18 %), les technologies de production (15 %), de l'information (11 %), les sources lumineuses (10 %) et le photovoltaïque (5 %)⁽⁹⁾. Selon le BMBF, **90 % des entreprises du secteur photonique sont des petites et moyennes entreprises**⁽¹⁰⁾.

Pionnière dans la production des technologies photoniques, **l'Allemagne représente 6,4 % du marché mondial**, et 41 % du marché européen⁽¹¹⁾. L'industrie allemande de la photonique se distingue surtout par sa capacité d'exportation. En 2019, elle réalisait 72 % de son chiffre d'affaires sur les marchés étrangers, une part en croissance continue depuis plusieurs années⁽¹²⁾. Entre 2018 et 2019, le marché intérieur est resté stable, tandis que le chiffre d'affaires à l'exportation augmentait de 1,6 %, principalement aux États-Unis (4,4 Mds€) et en Chine (4,1 Mds€). Les Pays-Bas sont le premier marché européen d'exportation (2,9 Mds€), devant la France (1,9 Mds€)⁽¹³⁾.

Une grande partie des entreprises actives sur le secteur de la photonique sont regroupées au sein du syndicat professionnel Spectaris, qui rassemble des entreprises actives sur les ONIEA (y compris hors photonique) appliquées à l'optique, aux technologies médicales et aux technologies de laboratoire. Spectaris regroupe 400 entreprises, essentiellement des PME, qui représentaient en 2019 près de 74 milliards d'euros de chiffre d'affaires et 300 000 employés. Ce syndicat professionnel inclut des activités concernant les rayonnements ionisants utilisés dans les technologies médicales. À l'image du secteur photonique, les entreprises membres de Spectaris sont largement tournées vers l'export, réalisant 63 % de leur chiffre d'affaires en dehors de l'Allemagne⁽¹⁴⁾.

(8) Business France. *Électronique et optique-photonique en Allemagne*, 2020. Consultable à l'adresse suivante : <https://www.teamfrance-export.fr/api/v1/produits-editoriaux/78970/document>

(9) TRIAS CONSULT (2019), *Photonics in Germany*, 2019.

(10) Bundesministerium für Bildung und Forschung, « KMU-innovativ: Photonik und Quantentechnologien ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bmbf.de/de/kmu-innovativ-photonik-610.html>

(11) Spectaris, « SPECTARIS-Spotlight Photonik : Daten und Fakten einer Schlüsseltechnologie », 2019. Consultable à l'adresse suivante : https://www.spectaris.de/fileadmin/Content/Photonik/Zahlen-Fakten-Publikationen/SPECTARIS_Photonik_Spotlight_2018_de.pdf

(12) Spectaris, « Eckdaten der Industrie für optische, medizinische und mechatronische Technologien », 2020. Consultable à l'adresse suivante : https://www.spectaris.de/fileadmin/Content/Photonik/Zahlen-Fakten-Publikationen/Zahlen_SPECTARIS_2019.pdf

(13) Spectaris, « SPECTARIS-Spotlight Photonik : Daten und Fakten einer Schlüsseltechnologie », 2019. Consultable à l'adresse suivante : https://www.spectaris.de/fileadmin/Content/Photonik/Zahlen-Fakten-Publikationen/SPECTARIS_Photonik_Spotlight_2018_de.pdf

(14) Spectaris, « Eckdaten der Industrie für optische, medizinische und mechatronische Technologien », 2020. Consultable à l'adresse suivante : https://www.spectaris.de/fileadmin/Content/Photonik/Zahlen-Fakten-Publikationen/Zahlen_SPECTARIS_2019.pdf

L'écosystème industriel photonique allemand

Le groupe industriel **Siemens** est très présent sur les technologies des ONIEA via différentes filiales. Dans le domaine des technologies médicales, Siemens Healthineers (500 000 employés) utilise les ONIEA dans l'imagerie, le diagnostic et la thérapie. À travers Nokia Siemens Networks, et notamment sa participation dans Coriant, le groupe est aussi présent sur l'optique appliquée aux technologies de communication. Fort de plus de 31 000 employés et d'un chiffre d'affaires de 6,3 Mds€ sur 2019-2020, **Carl Zeiss** est un des leaders mondiaux de l'industrie optique et optoélectronique. Le groupe allemand dispose de plusieurs laboratoires de pointe, dont le *Zeiss Research Microscopy Solutions*, à Iéna. L'entreprise désormais indépendante Jenoptik est issue du site de Carl Zeiss à Iéna. **Trumpf** est une entreprise leader à l'échelle mondiale dans le domaine des machines-outils, des lasers et de l'électronique pour les applications industrielles. Elle compte 14 000 employés pour un chiffre d'affaires 2018-2019 de 3,8 Mds€⁽¹⁵⁾.

Il existe ensuite un riche écosystème de PME innovantes de taille suffisante pour leur permettre de se positionner sur un marché à forte composante export. **LPKF Laser&Electronics** (Hanovre) est une société d'ingénierie spécialisée dans le secteur de la photonique et est un des principaux fournisseurs mondiaux de procédés de production par laser. Elle comptait en 2019 plus de 680 employés, pour un chiffre d'affaires 2018-2019 de 140 M€, réalisé à 90 % par l'activité export. **Topica Photonics** (Munich) couvre différentes technologies, dont les lasers à diode, les lasers à fibre ultra-rapide, les systèmes térahertz et les peignes de fréquence (*frequency combs*). En 2020, l'entreprise a réalisé 76 M€ de chiffre d'affaires, pour 340 employés. L'exemple de l'entreprise **Lasos** (Iéna), spécialisée dans les lasers, montre la force du modèle entrepreneurial allemand. Au départ, simple unité de production de Siemens à Munich, elle est rachetée par Carl Zeiss et transférée à Iéna. Reprise par ses équipes, elle devient une entreprise indépendante en 1997. Lasos est aujourd'hui leader mondial des technologies de microscopie confocale. Dans le domaine spécifique de l'agriculture, trois des sept entreprises participant au nouveau réseau d'innovation DeepFarmbots⁽¹⁶⁾, soutenu par le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie, sont spécialisées sur les ONIEA : OndoSense (capteurs radar), Spacenus (télé-détection et IA) et Toposens (capteurs ultrasons).

(15) Business France, « Électronique et optique-photonique en Allemagne », 2020. Consultable à l'adresse suivante : <https://www.teamfrance-export.fr/api/v1/produits-editoriaux/78970/document>

(16) ZALF, « ZIM cooperation network on AI-based agricultural robotics launched : Artificial intelligence for sustainable agriculture », 20 janvier 2021. Consultable à l'adresse suivante : <https://idw-online.de/en/news761539>

Les entreprises bénéficient d'un soutien public ciblé. Dans le cadre de son initiative *KMU-Innovativ* (PME innovantes), le BMBF a lancé en 2010 un programme de développement des technologies photoniques, qui a permis de financer sur plus de dix ans de nombreux projets portés par des petites et moyennes entreprises innovantes. Le programme *KMU-Innovativ : Photonik/Optische Technologien*, qui arrivera à échéance en 2022, comprend les thèmes de la photonique dans la production, des techniques de mesures, des composants et systèmes optiques, ou encore des techniques d'éclairage et de la bioélectronique⁽¹⁷⁾. Le nouveau programme *KMU-Innovativ : Photonik und Quanten Technologie* (2018-2025)⁽¹⁸⁾ reprend les thèmes du programme précédent, en l'enrichissant au travers des applications dans les techniques médicales, dans la communication, et surtout, dans les technologies quantiques. Ce nouveau programme vient en soutien d'une politique interministérielle de développement des technologies quantiques. Dans le cadre du plan de relance adopté en juin 2020, 2 Mds€ sont fléchés vers ces technologies, dont 400 M€ consacrés au développement de deux ordinateurs. Les ONIEA, et plus particulièrement la photonique, sont déjà au cœur de trois projets « quantiques » soutenus par le BMBF : BrainQSense, Opticlock et QUBE⁽¹⁹⁾. Le progrès technologique sur le quantique constitue pour la photonique, selon les acteurs du secteur, le principal enjeu des années à venir. L'enjeu est d'abord stratégique, en visant à assurer la sécurité de l'information et la puissance de calcul des futurs ordinateurs quantiques. Il est aussi économique, même si, selon le syndicat professionnel Spectaris, les retombées restent encore difficiles à estimer⁽²⁰⁾.

Un encadrement institutionnel et législatif consistant, doté de capacités de recherche conséquentes sur les effets indésirables des ONIEA

L'Office fédéral de radioprotection (*Bundesamt für Strahlenschutz – BfS*)⁽²¹⁾ est l'autorité fédérale responsable de la radioprotection pour l'ensemble de la population. Fort d'une longue expérience dans le domaine de la radioactivité, il prend de plus en plus en considération les rayonnements non ionisants. Le BfS dépend directement du ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la nature et de la Sécurité des centrales nucléaires (*Bundes-*

ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit – BMU) et participe au financement de projets portant sur l'impact des ONIEA. Ils incluent non seulement l'étude des conséquences des rayonnements sur l'homme mais aussi sur l'ensemble de la faune et de la flore⁽²²⁾. La commission de radioprotection (*Strahlenschutzkommission – SSK*) est un organe consultatif du BMU composé d'experts indépendants. Il comprend un comité dédié aux ondes non ionisantes, y compris les rayonnements optiques.

Pour les questions de santé et de sécurité au travail liées aux rayonnements non ionisants, l'autorité compétente est l'Institut fédéral pour la sécurité et la santé au travail (*Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin – BAuA*), placé sous la tutelle du ministère fédéral du Travail et des Affaires sociales (*Bundesministerium für Arbeit und Soziales – BMAS*). De manière plus spécialisée, l'Office pour la protection des consommateurs et la sécurité des aliments (*Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit – BVL*), sous tutelle du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (*Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft – BMEL*), est l'institution de référence pour la régulation des usages dans l'alimentation. Le BMEL dispose à travers l'Institut Max Rübner (MRI) de capacités de recherche sur les effets du traitement des aliments par rayonnement UV. Enfin, le ministère de la Santé (*Bundesministerium für Gesundheit – BMG*) peut s'appuyer sur l'Institut Robert Koch de santé publique (RKI), qui a notamment produit une étude sur les effets de l'utilisation médicale des infrasons et des sons basse fréquence.

Les réseaux de recherche sur la protection contre les radiations intègrent de manière croissante l'enjeu des rayonnements non ionisants. Le réseau de compétence pour la recherche sur les rayonnements (*Kompetenzverbund Strahlenforschung – KVVSF*) assure la coordination des institutions de recherche travaillant dans le domaine des rayonnements, ionisants comme non ionisants, avec un double objectif de mise en relation et de travail commun dans la représentation publique d'intérêts. La société germano-suisse de radioprotection (*Fachverband für Strahlenschutz*) rassemble des chercheurs allemands et suisses travaillant sur les rayonnements ionisants et non ionisants. Membre du réseau IPRA (*International Radiation Protection Association*), la fédération a pour objectifs d'informer le public et de participer à l'élaboration des normes nationales et internationales de radioprotection. Elle comprend un groupe de travail sur les rayonnements non ionisants, avec pour thématiques identifiées les rayonnements solaire, laser, ultraviolet artificiel, visible/infra-rouge, les nuisances lumineuses de voisinage et les champs électromagnétiques⁽²³⁾.

(17) Photonik Forschung Deutschland, « Fördermaßnahme : KMU-innovativ : Photonik/Optische Technologien ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.photonikforschung.de/projekte/kmu-innovativ/foerdermassnahme/kmu-innovativ-photonik.html>

(18) Bundesministerium für Bildung und Forschung, « KMU-innovativ: Photonik und Quantentechnologien ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bmbf.de/de/kmu-innovativ-photonik-610.html>

(19) LACROIX L. Technologies Quantiques. *Stratégie de recherche en Allemagne*, février 2021.

(20) Spectaris, « Trendreport Photonik 2019/2020 ». Consultable à l'adresse suivante : https://www.spectaris.de/fileadmin/Content/Photonik/Zahlen-Fakten-Publikationen/SPECTARIS_Trendreport_Photonik_2019-2020.pdf

(21) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, « Bundesamt für Strahlenschutz ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bmu.de/ministerium/aufgaben-und-struktur/bundesbehoerden/bundesamt-fuer-strahlenschutz/>

(22) Bundesamt für Strahlenschutz, « Mögliche Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Tiere und Pflanzen ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/stellungnahmen/emf/emf-tiere-pflanzen/emf-tiere-und-pflanzen.html>

(23) Fachverband für Strahlenschutz e.V., « Arbeitskreis Nichtionisierende Strahlung ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.fs-ev.org/arbeitskreise/nichtionisierende-strahlung>

Parmi les réseaux de professionnels jouant un rôle actif dans la recherche sur les ondes non ionisantes, nous pouvons également citer la société allemande pour les ultrasons à usage médical (*Deutsche Gesellschaft für Ultraschall in Medizin – DEGUM*), qui a créé en 2011 sa propre institution de formation, l'académie DEGUM pour les ultrasons (*Ultraschall-Akademie der DEGUM*), encadrant des formations continues, des ateliers et symposiums. La société allemande pour la recherche sur le rayonnement en biologie (*Deutsche Gesellschaft für Biologische Strahlenforschung – DeGSB*) est aussi active sur la question. Parmi les quatre sujets d'intérêt identifiés pour être au cœur de son séminaire annuel de l'année 2020, figurait la « radiobiologie des rayonnements non ionisants ». Ce choix témoigne de l'intérêt des biologistes pour les ONIEA. La société allemande pour l'optique appliquée (*Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik – DgaO*) joue un rôle important dans la coordination et le développement d'une recherche liée à l'industrie. Elle se donne également pour mission de promouvoir la place de l'optique dans l'enseignement secondaire et universitaire ⁽²⁴⁾.

Le 5 février 2020, l'Office pour la radioprotection (BfS) a ouvert un nouveau centre de compétence sur les champs électromagnétiques (*Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder*) à Cottbus (Brandebourg), inauguré par la ministre fédérale de l'Environnement, Svenja Schulze ⁽²⁵⁾. Cette inauguration s'inscrit dans le contexte du développement européen du réseau 5G et fait suite à une étude du BfS qui avait souligné, fin 2019, les inquiétudes de la population allemande au sujet de l'impact de la téléphonie mobile et des antennes relais sur la santé ⁽²⁶⁾.

Une législation vigilante en matière de radioprotection et pionnière sur l'encadrement des nouveaux usages

La consistance de cet encadrement institutionnel et des capacités de recherche dans le domaine des ondes non ionisantes apparaît en partie liée aux préoccupations d'une population allemande sensibilisée à la radioprotection en raison de l'inquiétude traditionnelle que suscite chez elle le risque nucléaire. Le cadre législatif est aussi marqué par une approche prudente et régulatrice des usages des rayonnements.

La loi sur la protection contre les effets nocifs sur l'Homme des rayonnements non ionisants lors de leur utilisation (*Gesetz zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung bei*

der Anwendung am Menschen – NiSG) régule depuis le 29 juillet 2009 les applications médicales des rayonnements non ionisants, en obligeant les médecins utilisant ces rayonnements à disposer d'une expertise dans le domaine ou à suivre une formation spécifique ⁽²⁷⁾. Elle distingue trois catégories d'ondes non ionisantes :

- les champs électriques, magnétiques et électromagnétiques (0 à 300 GHz) ;
- les rayonnements optiques (100 nm à 1 mm) ;
- les ultrasons (20 KHz à 1 GHz).

L'ordonnance pour la protection contre les effets nocifs sur l'Homme des rayonnements non ionisants lors de leur utilisation (*Verordnung zum Schutz vor schädlichen Wirkungen nichtionisierender Strahlung bei der Anwendung am Menschen*), qui est entrée en vigueur le 31 décembre 2020, complète la NiSG sur l'utilisation des rayonnements non ionisants à des fins « autres que celles du diagnostic ou du traitement d'un patient, de la détection précoce d'une maladie, des soins prénataux ou de la recherche médicale ». Elle comprend entre autres la régulation de l'utilisation commerciale des rayonnements ultraviolets ⁽²⁸⁾.

Le nouveau règlement limite, depuis le 31 décembre 2020, l'utilisation des rayonnements optiques, hautes fréquences et ultrasons, et l'usage des appareils de stimulation du système nerveux central aux seuls médecins agréés ayant bénéficié d'une formation spécifique. L'utilisation de l'imagerie par ultrasons à des fins non médicales (échographie 3D du fœtus) a été interdite à la même date ⁽²⁹⁾.

A partir du 31 décembre 2021, des restrictions supplémentaires s'appliqueront à l'utilisation d'appareils à basse fréquence, à courant continu et à champ magnétique pour la stimulation musculaire ou nerveuse. Des restrictions s'appliqueront à la même date aux utilisations commerciales de stimulation musculaire électrique, de lumière intense pulsée (épilation), de la haute fréquence et des ultrasons (liposuction) ⁽³⁰⁾.

La LMBestV (*Lebensmittelbestrahlungsverordnung*) régule depuis le 14 décembre 2000 l'utilisation des rayonnements ionisants et non ionisants pour le traitement des aliments. Elle inclut les méthodes électroniques, rayonnements gamma et X, neutrons et ultraviolets (UV), et complète les directives européennes 1999/2EG, 1999/3/CE et 2000/13/CE. La LMBestV a été révisée le 15 février

(24) TRIAS CONSULT (2019), « Photonics in Germany 2019 ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.gtai.de/resource/blob/81758/8d1e83cb9eeaeccf0f1cb60c8a798f4f/photonics-in-germany-2019-data.pdf>

(25) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, « Grußwort zur Eröffnung des "Kompetenzzentrums Elektromagnetische Felder" », février 2020. Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bmu.de/rede/grusswort-zur-eroeffnung-des-kompetenzzentrums-elektromagnetische-felder/>

(26) Bundesamt für Strahlenschutz, « Was denkt Deutschland über Strahlung ? », 2019. Consultable à l'adresse suivante : https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/berichte/handreichung-strahlenbewusstseinsstudie.pdf?__blob=publicationFile&v=4

(27) Bundesamt für Strahlenschutz, « Verordnungen zum Strahlenschutz ». Consultable à l'adresse suivante : https://www.bfs.de/DE/bfs/gesetze-regelungen/strahlenschutzverordnungen/strahlenschutzverordnungen_node.html

(28) *Ibid.*

(29) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, « FAQ : Wer darf das sogenannte "Ultraschall-Babykino" künftig noch anbieten ? ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bmu.de/faq/wer-darf-das-sogenannte-ultraschall-babykino-kuenftig-noch-anbieten/>

(30) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, « Kosmetische Anwendung nichtionisierender Strahlung ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bmu.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/strahlenschutz/nichtionisierende-strahlung/kosmetische-anwendung-nichtionisierender-strahlung/>

2019⁽³¹⁾. Le site de l'Office pour la protection du consommateur et la sécurité des aliments (BVL) distingue actuellement trois usages des rayonnements, régulés différemment :

- Le rayonnement gamma ;
- Les rayons X générés par des équipements fonctionnant à une énergie nominale de 5 mégaélectronvolts ou moins ;
- Les électrons générés par des équipements fonctionnant à une énergie nominale de 10 mégaélectronvolts ou moins.

L'inclusion des UV dans le texte portant principalement sur les rayonnements ionisants fait débat parmi la communauté scientifique, car les UV non ionisants sont associés aux autres rayonnements ionisants. Cette prise de position législative semble indiquer, comme dans le secteur médical, une approche législative prudente au regard de l'usage des rayonnements dans le traitement des aliments.

S'agissant du cadre législatif relatif à la radioprotection contre les ondes non ionisantes, il faut noter l'existence d'une étude internationale comparée très détaillée réalisée par l'Office fédéral de radioprotection (BfS). Datant de février 2016, elle est divisée en deux parties, la première traitant des rayonnements électriques, magnétiques et électromagnétiques (0 Hz à 300 GHz)⁽³²⁾ et la seconde des rayonnements optiques⁽³³⁾. Les réglementations françaises et allemandes sont proches, aucun des deux pays n'apparaît globalement ni plus ni moins restrictif. Dans certains cas, dont celui des solariums, l'Allemagne apparaît plus restrictive.

Conclusion

La recherche sur les usages des ONIEA en Allemagne est dominée par le secteur des technologies photoniques. Le pays est caractérisé par un paysage de recherche polycentrique composé d'universités, de centres de recherche extra-universitaires et d'industriels innovants. L'investissement public important fait dans la recherche fondamentale et la contribution forte du secteur privé à une recherche « en commun » au sein des instituts Fraunhofer permettent une coopération approfondie entre la formation, la recherche et l'industrie. Cette organisation doit beaucoup au poids des petites et moyennes entreprises innovantes, qui est important en Allemagne de manière générale et dans le secteur photonique en particulier. L'attractivité de la formation, entretenue par la recherche universitaire et

par des initiatives dédiées comme la création de la *Max Planck School of Photonics*, permet à l'Allemagne de maintenir son *leadership* technologique en attirant les meilleurs talents mondiaux. Le secteur photonique est dominé par l'activité de production de matériels et outils destinés aux usages médicaux et de production industrielle. Plusieurs projets de recherche portent sur les usages dans l'agriculture et l'agroalimentaire, mais leur potentiel semble limité.

Une force du modèle allemand est sa capacité d'exportation, la plus grande et dynamique partie du chiffre d'affaires des secteurs concernés par les ONIEA étant réalisée sur les marchés étrangers. La stagnation ces dernières années du chiffre d'affaires du secteur photonique sur le marché intérieur est largement compensée par la croissance des exportations. La force des industriels allemands positionnés sur ces usages semble reposer sur un relais de croissance à l'export, en premier lieu aux Pays-Bas, aux États-Unis et en Chine, tandis que le marché intérieur permettrait de soutenir les réalisations les plus en pointe. L'Allemagne bénéficie en outre d'une législation protectrice et de capacités de recherche importantes en matière de radioprotection. Enfin, le secteur photonique bénéficie de la vision stratégique de l'État fédéral. L'Allemagne a en effet récemment investi dans les technologies photoniques en vue du développement des technologies quantiques, dont la maîtrise représente un intérêt stratégique certain et un potentiel économique potentiellement très important. Comme pour d'autres domaines (batteries, technologie de l'hydrogène), l'État fédéral suit ici une stratégie de développement sur le territoire allemand des capacités de recherche et industrielles (optiques et photoniques) de base indispensables au développement des technologies (quantiques) futures.

Remerciements

Je tiens à remercier, au sein de l'Ambassade de France à Berlin, Nicolas Cluzel au Service pour la Science et la technologie pour son travail de relecture, Guillaume Prigent au Service économique régional pour son apport en termes d'informations et de mise en contact sur les aspects économiques, Marie Pallot et Alice Anquetin au Service pour les affaires sociales pour leur apport d'informations sur le cadre légal des applications médicales. Mes remerciements vont aussi au personnel scientifique que j'ai pu contacter, notamment à Pascal Malkemper, Aude Silve, Mario Stahl et Hans-Dieter Reidenbach.

Je remercie également pour leurs éclairages Étienne Le Roux, chargé de mission export à Business France, et Valérie Chambrette, directrice de la Société française de radioprotection.

(31) Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz, « Lebensmittelbestrahlungsverordnung – LMBestV ». Consultable à l'adresse suivante : https://www.gesetze-im-internet.de/lmbestv_2000/BJNR173000000.html

(32) Bundesamt für Strahlenschutz, « Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz – Band 1 ». Consultable à l'adresse suivante : https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2016021914007/3/BfS_2016_3614S80010_Bd1.pdf

(33) Bundesamt für Strahlenschutz, « Ressortforschungsberichte zur kernchnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz – Band 2 ». Consultable à l'adresse suivante : https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2016021914007/5/BfS_2016_3614S80010_Bd2.pdf

Bibliographie

LACROIX L. (2021), *Technologies quantiques : stratégie de recherche en Allemagne*, note MEAE.

BUSINESS FRANCE (2020), « Électronique et optique-photonique en Allemagne », fiche Marché.

SPECTARIS (2020), *Eckdaten der Industrie für optische, medizinische und mechatronische Technologien*.

SPECTARIS (2020), *Trendreport Photonik: Märkte, Entwicklungen, Potenziale*.

GÖTTE S. & LUDEWIG Y. (2019), "Was denkt Deutschland über Strahlung ?", Umfrage, Bundesamt für Strahlenschutz.

TRIAS CONSULT (2019), *Photonics in Germany 2019*.

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (2019), "Verordnung über die Behandlung von Lebensmitteln mit Elektronen-, Gamma- und Röntgenstrahlen, Neutronen oder ultravioletten Strahlen (Lebensmittelbestrahlungsverordnung – LMBestV)".

BUNDESMINISTERIUMS DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (2018), "Verordnung zum Schutz vor schädlichen Wirkungen nichtionisierender Strahlung bei der Anwendung am Menschen (NiSV)".

SPECTARIS (2018), *Photonik Spectaris-Spotlight: Daten und Fakten einer Schlüsseltechnologie*.

PERRIN A. & SOUQUES M. (2018), *Champs électromagnétiques, environnement et santé*, EDP Sciences, Collection « InterSections ».

MISSLING S. (dir.) (2016), "Internationaler Vergleich der rechtlichen Regelungen im nicht-ionisierenden Bereich – Band 1: Ländervergleich der Regelungen für elektrische, magnetische und elektro-magnetische Felder (0 Hz – 300 GHz)", Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz.

MISSLING S. (dir.) (2016), "Internationaler Vergleich der rechtlichen Regelungen im nicht-ionisierenden Bereich – Band 2: Ländervergleich der Regelungen im Bereich Optischer Strahlung", Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz.

Des crédits carbone au service du développement africain

Par Michel VILLETTE

Professeur de sociologie à Agro-ParisTech et chercheur au centre Maurice Halbwachs (ENS/EHESS/CNRS) ⁽¹⁾

Il est vital de reboiser les zones arides du Sénégal et de fournir aux villageois des moyens d'améliorer leurs cultures afin qu'ils disposent de revenus suffisants pour échapper à la migration forcée vers les villes. Ces deux impératifs sont la raison d'être de l'association IRRIGASC et de l'entreprise éponyme. À l'origine de ce projet, une technique d'irrigation qui facilite la croissance des jeunes arbres fruitiers dans les zones arides. D'abord difficilement financés par le mécénat d'entreprise, les projets d'aménagement agricole deviennent à partir de 2021 des puits de crédits carbone. Des entreprises investissent dans la plantation et l'irrigation. S'ils survivent au-delà de cinq ans, les arbres ainsi cultivés rapporteront des crédits carbone négociables tous les cinq ans, c'est-à-dire à chaque audit. La démarche apporte des avantages équilibrés entre les trois partenaires : les multinationales récupèrent à terme des crédits carbone en retour de leur investissement ; la société IRRIGASC se rémunère pour la gestion et l'animation du projet ; et les paysans disposent gratuitement des moyens techniques pour faire pousser des arbres fruitiers dont ils pourront revendre la production.

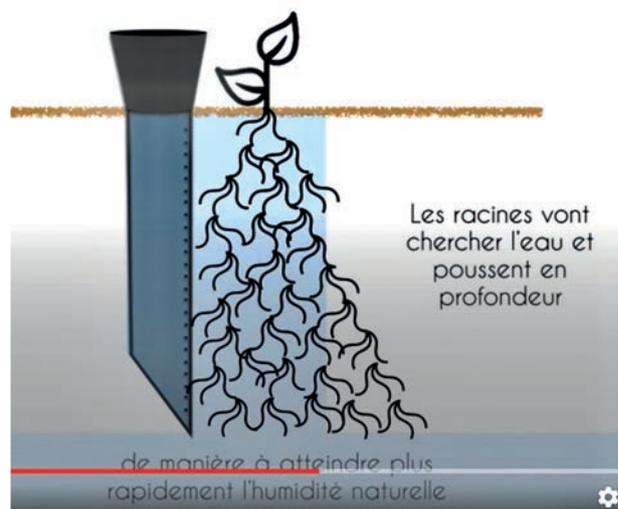
Il est vital de reboiser les zones arides du Sénégal. Il est aussi vital de fournir aux villageois des moyens d'améliorer leurs cultures afin qu'ils disposent de revenus suffisants pour échapper à la migration forcée vers les villes. Ces deux impératifs sont la raison d'être de l'association IRRIGASC et de l'entreprise éponyme.

Au cœur de ce projet ambitieux, un objet technique simple, qui facilite la croissance des jeunes arbres dans les zones arides, et tout particulièrement des arbres fruitiers, comme le manguier et l'anacardier dont les fruits peuvent générer un revenu intéressant pour les agriculteurs.

Cet objet technique simple est une poche en plastique d'environ un mètre de longueur, percée de petits trous, et sur laquelle est soudé un bac en plastique rigide d'une contenance d'un litre. Avant de planter un jeune arbre en zone sèche, la technique consiste à faire un trou d'environ un mètre de profondeur avec une vrille, d'y placer la poche en plastique, de la remplir complètement d'un mélange de sable et de terre, puis de planter l'arbuste juste à côté, avant de remplir régulièrement le petit bac d'eau pour irriguer.

(1) Les informations utilisées dans cet article ont été recueillies au cours d'une mission réalisée dans le cadre du programme MANAGLOBAL de recherche et d'innovation qui a bénéficié du soutien du programme-cadre Horizon 2020 de l'Union européenne, à travers la convention de subvention Marie-Sklodowska Curie 823744.

Au lieu d'étaler ses racines en surface comme il le ferait avec un arrosage traditionnel, le jeune arbuste est obligé de plonger ses racines en profondeur pour arriver jusqu'à l'humidité qui se diffuse tout au long du sac. Ainsi, le jeune arbre accède plus rapidement aux couches profondes du sol, où il trouve une humidité permanente pour survivre sans arrosage.



La gaine d'irrigation IRRIGASC – Illustration ©IRRIGASC.



Plantation de l'association IRRIGASC – Photo©IRRIGASC.

Pendant toute la période d'irrigation, le système n'a consommé qu'un dixième de l'eau qui aurait été nécessaire avec un arrosage classique.

Cette invention agronomique majeure a fait l'objet du dépôt d'un brevet. Elle a été réalisée par Jacques Gasc, un ingénieur agronome, membre de l'Académie des sciences d'Outre-mer, et qui fit toute sa carrière en Afrique. Retraité au début des années 1980, il s'installe au Sénégal et poursuit ses recherches sur la désertification. Après de multiples essais, il met finalement au point ce système « tout bête » d'irrigation, jugé génial par les spécialistes en raison de sa simplicité et de son efficacité.

L'invention a été brevetée en 1992. Jacques Gasc reçut alors le prix de l'innovation des mains du Président de la République sénégalaise.

La petite fille poursuit l'œuvre du grand-père

Sa petite fille, Natacha Gasc, nous dit :

« J'ai été fascinée par le travail de mon grand-père depuis toute petite. Il était au Sénégal et, moi, j'ai grandi en Angleterre. On ne se voyait pas souvent, mais je l'admirais. Chaque fois que je devais faire un exposé à l'école, je présentais ses recherches et son modèle de développement pour l'Afrique. Ça me fascinait.

Lorsqu'il est décédé en 2012, la famille a voulu prolonger son œuvre.

À cette époque, mon père travaillait à Londres. Il s'est déplacé au Sénégal pour mettre en ordre les affaires du grand-père et a fait tourner pendant trois ans l'association IRRIGASC à distance, avec une équipe de bénévoles et deux employés sur place. Dès que j'ai terminé mes études en 2015, je suis venue au Sénégal, en théorie pour trois mois, et ça fait cinq ans que j'y suis.

J'ai fait mes études secondaires à Londres, puis un master en finance à Science-Po Paris. Je ne suis pas agronome. Lorsque je suis arrivée au Sénégal, c'était pour mettre en ordre le côté juridique et administratif de l'association. J'ai adoré le pays et j'y suis restée dans l'espoir de trouver suffisamment de financements pour développer le projet de mon grand-père ».



Natacha Gasc, la directrice de l'association IRRIGASC. Photo©IRRIGASC.

Le système IRRIGASC

IRRIGASC, c'est d'abord un petit atelier basé à Dakar qui a produit un demi-million de systèmes d'irrigation depuis 1992. Les composants sont fournis par une usine de plastique sénégalaise avant d'être assemblés dans l'atelier. Le produit fini est mis à la disposition de l'association IRRIGASC au prix de 500 francs CFA l'unité, soit environ 90 centimes d'euro.

Autour de ce petit atelier de fabrication se développe tout un ensemble de services qui vont de la recherche de financements auprès des grandes entreprises européennes, à la formation des agriculteurs et au suivi des plantations sur le terrain.

Entre 1992 et 2012, Jacques Gasc a supervisé la plantation au Sénégal de plus de 250 000 arbres et, depuis 2013, 100 000 arbres fruitiers supplémentaires ont été plantés au bénéfice de 1 250 familles d'agriculteurs.

L'abandon de programmes avoisine les 15 %, c'est-à-dire le pourcentage de familles qui ne poursuivent pas les travaux commencés et dont les parcelles sont délaissées.

Dans les projets menés à bien, le taux de reprise des arbres à la plantation est de 90 %, grâce à la gaine. Plus de 70 % des arbres irrigués avec la technique IRRIGASC survivent trois ans après avoir été plantés.

Entreprise ou association à but non lucratif ?

Entre 1992 et 2012, IRRIGASC était une entreprise. Mais après le décès de Jacques Gasc, c'est devenue une association à but non lucratif. En 2020, suite à de gros investissements, Natacha Gasc crée une nouvelle entreprise, dont la vocation est d'approvisionner l'association en systèmes d'irrigation et de trouver des financements. Elle explique ce qui a justifié ce changement de statut pour créer cette nouvelle structure :

« Au Sénégal, le statut d'association apporte peu d'avantages. Les charges sur les salaires sont de 46 %, soit les mêmes que pour une entreprise. L'exonération de la TVA ne présente qu'un faible avantage pour nous. L'État sénégalais accorde peu de subventions et d'avantages fiscaux aux associations à finalité sociale et environnementale. Pendant l'épidémie du Covid-19, le statut d'association s'est même révélé dommageable pour nous, car il ne nous a pas permis de bénéficier d'allègement d'impôts et de charges, ni de délais de paiement, alors que cela a été proposé aux entreprises. En pratique, dans notre cas de figure, il vaut donc mieux avoir un statut d'entreprise ».

Un service complet, offert gratuitement aux paysans

« Nous offrons un service [complet] aux paysans : des arbres, un système d'irrigation et surtout une formation et un suivi sur trois à cinq ans.

Les personnes qui bénéficient de ce service ne peuvent pas payer. Donc, nous demandons à des entreprises, des associations ou des ONG de financer nos programmes.

Les paysans des zones semi-arides sont nos bénéficiaires. Nos donateurs sont le plus souvent des entreprises, auxquelles nos programmes fournissent une occasion de mettre en œuvre leurs programmes de responsabilité sociale et de développement durable ou, plus rarement, des ONG, dont les objectifs sont le développement rural et le reboisement.

Certaines associations peuvent aussi coopérer avec nous sur des projets, par exemple pour creuser un puits ou apporter des services complémentaires à un village.

Le cœur de notre métier, ce sont les arbres fruitiers. Notre système d'irrigation fonctionne particulièrement bien avec des arbres qui ont des racines pivots, comme le manguier et l'anacardier (l'arbre qui donne les noix de cajou). La vente des fruits peut de surcroît assurer un complément de revenus aux agriculteurs. Or, l'expérience montre que c'est lorsqu'un arbre a de la valeur aux yeux des paysans qu'il a le plus de chances de survie.

Il ne faut pas oublier que le principal prédateur des arbres en zone aride, c'est l'homme. Si un projet de reboisement n'apporte pas de bénéfices rapides et significatifs aux populations locales, il est voué à l'échec. Les chèvres vont manger les feuilles des jeunes pousses, l'arrosage sera négligé, on coupera le bois pour faire du feu ou construire une palissade, et il ne restera bientôt plus rien. Mon grand-père avait compris cela. Il savait que le reboisement ne pouvait réussir que s'il apportait un bénéfice direct aux habitants, et c'est pour cela qu'il a centré ses recherches sur les arbres fruitiers ».

Les limites du financement par le mécénat d'entreprise

Jusqu'en 2020, IRRIGASC a principalement financé ses activités grâce au mécénat. Les entreprises faisaient figurer leur participation aux projets de reboisement dans leur rapport de responsabilité sociale et environnementale (RSE). Les interlocuteurs de l'association étaient les directions de la communication, du mécénat, de la RSE ou des ressources humaines.

« ...Un autre cas de partenariat réussi a eu lieu avec la Compagnie sucrière sénégalaise. Nous avons été mis en contact par l'intermédiaire d'une organisation avec laquelle nous avons travaillé et qui nous a recommandés. Nous avons mis au point avec leur direction des ressources humaines un système très original : un complément de retraite pour leurs employés.

Une fois à la retraite, beaucoup d'anciens salariés reviennent dans leur village d'origine où ils possèdent une maison et un lopin de terre. Les retraites sénégalaises sont modestes et même en retournant vivre au village, il n'est pas facile de s'en sortir, d'où l'idée d'apporter un complément de revenu en permettant aux retraités de cultiver des arbres fruitiers. La Compagnie sucrière sénégalaise a donc décidé de mettre gratuitement notre programme de plantation, d'irrigation et de formation agricole à la disposition des retraités qui le souhaitaient. 51 000 arbres ont ainsi été plantés au bénéfice de plus de 500 familles de retraités. »

S'il a donné d'assez bons résultats, le financement par mécénat est trop incertain et fonctionne à trop court terme pour permettre le financement de grands projets.

« Comme on l'a constaté en 2020 avec la crise de la Covid-19, le premier budget qui saute dans les entreprises lorsque la conjoncture n'est pas bonne, c'est le budget de la RSE. L'association IRRIGASC en subit immédiatement les conséquences. »

Les entreprises ne s'engagent que pour un à trois ans, alors qu'il faut des investissements sur vingt ans avant qu'un arbre atteigne sa pleine maturité.

« Nous sommes beaucoup trop fragiles, c'est pourquoi je souhaite passer à un tout autre mode de financement, même si certains projets ont très bien fonctionné avec le mécénat et que cela reste une formule possible. Compte tenu des difficultés de financement que nous avons rencontrées au cours de ces cinq dernières années, nous avons décidé de changer de *business model*. »

Un nouveau *business model* : la vente de crédits carbone sur le marché libre

Depuis la COP 21, deux nouveaux marchés sont en train de se créer : **le marché des taxes carbone et celui des crédits carbone**. Pour les multinationales polluantes, comme les cimenteries ou l'industrie pétrolière qui se sont engagées à atteindre la neutralité carbone en 2050, il faut d'abord réduire leurs émissions de CO₂, puis compenser leurs émissions en achetant des « crédits carbone ». Le marché régulé des crédits carbone permet d'acheter des droits à polluer (actuellement à un prix de l'ordre de 20 € la tonne de CO₂), mais les entreprises polluantes peuvent aussi choisir d'acheter des crédits carbone sur le marché libre, auprès d'organismes certifiés et régulièrement audités qui offrent un bilan carbone positif. C'est ce que l'on appelle le *voluntary market*. Ce marché permet aux entreprises de combiner une opération de mécénat avec l'achat de crédits carbone, ce qui est très positif pour leur réputation.

IRRIGASC a fait les démarches et les investissements nécessaires pour obtenir sa certification. À partir de 2021, elle va donc pouvoir vendre aux entreprises des crédits carbone qui deviendront la source essentielle de son financement.

« Obtenir la certification a été pour nous un gros investissement (de l'ordre de 60 000 €) réalisé sur fonds propres et familiaux qui permettra, je l'espère, d'assurer à l'avenir un financement pérenne à IRRIGASC, afin de donner une grande ampleur à nos activités.

À partir de 2021 et sur une période de six ans, IRRIGASC réalisera un programme de reboisement de 10 000 hectares d'arbres fruitiers en zones semi-arides au Sénégal, en lien avec 10 000 familles. Ce projet ne peut être financé que par des entreprises qui investissent dans des puits de crédits carbone. »

Un puits de crédits carbone est un investissement immédiat dans la plantation et l'irrigation. S'ils survivent au-delà

de cinq ans, les arbres ainsi cultivés rapporteront des crédits carbone négociables sur le marché libre une fois tous les cinq ans, c'est-à-dire à chaque audit.

La démarche apporte des avantages équilibrés entre les trois partenaires impliqués : la multinationale récupère à terme des crédits carbone en retour de son investissement ; la société IRRIGASC se rémunère pour la gestion et l'animation du projet ; et les paysans disposent gratuitement des moyens techniques pour faire pousser des arbres fruitiers dont ils pourront revendre la production.

Ce montage fait l'objet de contrats entre les entreprises, IRRIGASC et les paysans (qui conservent l'entière propriété de leur terrain et de leurs fruits). En contrepartie de l'investissement gratuit dont ils bénéficient, les paysans s'engagent à prendre soin des arbres et renoncent à leurs droits sur les crédits carbone (qu'ils ne peuvent pas obtenir de toute façon en l'absence du lourd et complexe dispositif de certification et d'audit qui permet d'en fixer la valeur).

Au moment d'intégrer le programme, le paysan suit une formation dispensée par IRRIGASC sur la base d'un dialecte et d'images adaptés aux analphabètes, en expliquant les conditions de participation et les engagements des parties. C'est un modèle gagnant-gagnant : le paysan obtient le financement de ses arbres fruitiers qui vont lui apporter des revenus pendant quarante ans et, en contrepartie, l'entreprise obtient des crédits carbonés.

« Un arbre de vingt ans d'âge a absorbé environ une tonne de CO₂, ce qui représente un crédit carbone négociable sur le marché libre. Notre nouvel argument auprès des entreprises est donc : "Venez investir dans notre puits de crédits carbone, et vous pourrez l'exploiter ensuite". C'est un argument valable, surtout auprès de grandes entreprises comme Total, BP ou Holcim-Lafarge qui n'ont pas d'autres choix que de compenser leurs émissions de CO₂ pour atteindre leurs objectifs zéro carbone.

Ce que nous leur proposons, c'est de faire mieux que d'acheter simplement ces crédits carbone sur le marché du *trading*. Même si cela leur coûte un peu plus cher, ils auront en même temps l'occasion de contribuer à un projet socialement responsable, et dont ils pourront faire état dans leur communication. »

L'association IRRIGASC continue de co-exister avec l'entreprise et elle a pour nouvelle mission de mener à bien des projets de ramassage, de transformation, de conservation et de distribution des fruits.

Discussion et conclusion

Ce cas ne manque pas de paradoxes : temps long des investissements et financements incertains ; idéalisme écologique et logique d'entreprise ; droit à polluer et irrigation d'arbres fruitiers en zone aride ; multinationales et petits paysans. Derrière chacun de ces paradoxes se cachent des risques qu'il faut conjurer par des efforts permanents de négociation et d'innovation, et surtout par une infinie patience.

« Ce projet, ce n'est pas une course, c'est un marathon. Ici, la temporalité est très différente de ce que l'on peut

connaître en Europe. Ce qui paraît irréalisable et demanderait un temps infini en Europe peut aller très vite ici. Réciproquement, des démarches qui seraient simples et rapides à réaliser en Europe peuvent prendre ici des mois, voire des années. Il faut tenir sur la longueur. »

Ce ne sont pas seulement des différences culturelles entre l'Afrique et l'Europe qu'il faut considérer pour comprendre ce projet. La gestion du rapport entre le court terme et le long terme y est d'une difficulté particulière. À l'horizon trop court des opérations de mécénat et de communication des entreprises, le nouveau mode de financement que sont les crédits carbone apporte certes une amélioration, mais avec un horizon de retour sur investissement extrêmement long. Dans sa cinquième année, un arbre n'a absorbé que 0,1 tonne de CO₂. Il ne vaut presque rien en termes de crédits carbone. Il faut le faire vivre vingt ans pour qu'il ait une véritable valeur.

L'innovation agronomique du grand-père de Natacha Gasc était certes géniale, mais elle s'est heurtée à un difficile problème de financement qui en a limité l'extension et a menacé la survie de l'association chargée de la mettre en œuvre. Vingt ans plus tard, une seconde innovation est tentée par sa petite-fille. Il s'agit cette fois d'ingénierie

financière et de montage d'une opération sur le marché mondial des crédits carbone. L'extrême simplicité et la rusticité du procédé agronomique inventé par son grand-père contrastent avec la complexité du dispositif financier à mettre en œuvre pour que l'invention agronomique continue d'être utilisée.

Références

Site Internet de l'entreprise Irrigasc : <https://www.irrigasc.org>

Académie des sciences d'Outre-mer, notice consacrée à Jacques Gasc, <http://academieoutremer.fr/academiciens/?ald=227>

Gouvernement du Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, « Définition des critères à remplir pour la délivrance de crédits compensatoires » : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/credits-compensatoires/definitions.htm>

POMEL S. & SALOMON J. N. (1998), *La déforestation dans le monde tropical*, Bordeaux, Presses universitaires de Bordeaux.

République du Sénégal, ministère de l'Environnement et de la Protection de la nature, « Politique forestière du Sénégal 2005-2025 », <http://www.fao.org/forestry/15132-0a9d7bd3b848771f0d9522338fd799be4.pdf>

Nonionizing, electromagnetic and acoustic waves: New knowledge, new issues

Introduction

Nonionizing, electromagnetic and acoustic radiation: An underexplored, sensitive but promising, field

Dominique Dron and **Ilarion Pavel**, Conseil Général de l'Économie, de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies (CGEJET)

In nature, plants as well as animals use nonionizing, electromagnetic and acoustic waves whether by emitting, perceiving or interpreting them. However the frequency range of this sort of radiation when generated by human activities is constantly expanding. Knowledge about these waves and their uses are growing fast, along with the discovery of their unsuspected effects. Despite its recognized level of public research, France seems to underestimate the medical, industrial and agribusiness potential of these fields of radiation.

Nonionizing, electromagnetic and acoustic radiation: A subtle, multifaceted universe

A panorama of nonionizing, electromagnetic radiation and its major uses

René de Seze, doctor and researcher, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS)

Electromagnetic fields have several applications, some of them well known to the public. These applications, especially in radiocommunications, have a function of information conveyed by the waves. Other applications have a narrow scope in industry or medicine. Several forms of technology put to use the energy function (heat) of radio-frequency waves or microwaves. To bring to light some surprising phenomena, new mechanisms of interaction have to be introduced between electromagnetic fields and living organisms, thus opening new horizons for technological developments. This requires bold research and sustained support from imaginative industrialists with a long-term vision and strategy.

A panorama of nonionizing acoustics waves and their major uses

Paul Avan, Institut de l'Audition, Clermont Auvergne University

Among physical agents, waves have the capacity for being propagated while conveying information, and, sometimes too, danger due to their energy or the changes induced. Hearing, which relies on acoustic waves, is a prime sense

for intra- and interspecies communication. It is even more important for human beings since it is the very basis of speech and music. One of the major health problems in the coming decades, as the WHO has pointed out, is the nuisance or even danger of audible sound waves, when they interfere, often subtly, with the comfort or health of the people exposed to them. However acoustics is also contributing to progress in the field of health. The use of inaudible hyperfrequencies has served to develop the imaging and high-resolution techniques that, used to examine the body without danger, are not expensive and are, therefore, affordable in less developed countries.

Which biological processes are affected?

Is there a cellular biology of sounds? From plants listening to cellular acoustics

Olivier Gallet, Laboratoire ERRMECe, Cergy Paris University

What if plants could not only hear but also, and listen and even tell the difference between sounds so as to use them purposefully in their strategies of growth and adaptation to their environment? A few years ago, a set of circumstances led the author to design a group research program on this topic, which is the target of much skepticism. By examining a recent, detailed review of the literature, proposing a strict triple-blind protocol and using simple, tried and tested, biological concepts, this research showed that, indeed, plants can recognize and use sounds subtly to modulate their growth in response to environmental stresses, specifically a hydric stress related to dryness.

The cumulative effects of nonionizing, electromagnetic radiation: Coexposure and a thermal factor

Amandine Pelletier and **Jean-Pierre Libert**, Laboratoire PERITOX, Unité mixte INERIS, Amiens

The direct effects of nonionizing, electromagnetic radiation on living organisms are, often, studied alone. By using innovative materials, the authors were able to examine the effects of an exposure to this sort of radiation on an organism's reactions to variations in another environmental parameter. The effects of coexposure to both this radiation and a thermal factor were analyzed with regard to energy homeostasis. As the findings show, animals, in the presence of this radiation, react by "fighting against the cold", a sort of reaction that should be observed only at lower ambient temperatures. Furthermore, they adopt a strategy of avoidance that leads them to look for a warmer envi-

ronment. This means that a peripheral “cold” signal with an origin in the TRPM8 receptors could cause paradoxical reactions. These receptors, the main ones for coldness, might modify their conformation under the action of non-ionizing, electromagnetic radiation and emit a signal toward the central nervous system, which exercises controls over these functions.

Open questions about the effects of electromagnetic and acoustic waves on health and the environment

Olivier Merckel, Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l’Alimentation, de l’Environnement et du Travail (ANSES)

The acoustic and electromagnetic spectrums are far from similar, in terms of the interactions between waves and living beings. While some frequency ranges (e.g., the audible frequencies or those used by mobile telephones) have been the subject of research programs about their possible effects on health, others have been little explored. Even for those that have been studied the most, the knowledge accumulated till now does not point to major effects on public health, but it leaves many questions hanging. Questions can be asked about the hypotheses regarding the mechanisms of action related to: the modulation or frequency of signals, the possible effects on brain activity, or the symptoms that some people associate with their exposure to electromagnetic or sound waves. The effects of these waves on the environment have still been little explored.

Emerging uses of nonionizing, electromagnetic and acoustic radiation

In medicine

From innovation to their clinical and commercial transfer: One hundred years after their discovery, ultrasounds in medicine are undergoing a second revolution

David Attali, Alexandre Dizeux and Jean-Francois Aubry, Physics for Medicine Paris, ESPCI Paris, INSERM, CNRS, PSL University, Paris

Since the discovery of the piezoelectric effect by Pierre and Jacques Curie in 1880, France has staked out a solid position in the field of ultrasounds. This can be corroborated by the number of biomedical applications of this technology. French companies and research laboratories are on the cutting edge of major innovations in ultrasonic diagnosis (ultrarapid imaging) and therapy (the focalization of high-intensity ultrasounds). Our knowledge of the effects of these acoustic waves on biological tissues has increased considerably over the past ten years – from the pinpointed delivery of medication to immunotherapy. This field of research must be supported and reinforced in France. It might spark a revolution in neuroscience owing to the possibilities not only of imaging but also of modulating the brain’s activity with the administration of transcranial ultrasounds.

The life and prospects of a French medium-sized firm in the field of ultrasonic medical technology

David Caumartin, Theraclion

Founded in 2004, Theraclion is an innovative medium-sized French firm with the ambition of developing a scalable, efficient robotic platform for noninvasive treatments that use ultrasounds, thanks to echotherapy. Theraclion’s history is presented while insisting on the ups and downs of its development, in particular in France, and on its prospects.

Electromagnetic waves in medicine: The case of millimeter waves

Morgane Lebosq and Yves Le Dréan, Rennes University, INSERM, EHESP, IRSET (Institut de Recherche en Santé, Environnement et Travail) – UMR S 1085

The idea of using electromagnetic waves to heal is as old as their discovery. Apart from radiation therapy for treating cancer, applications of this idea have often been marginal, while Western medicine has tended to specialize on using drugs and pharmaceutical products. For a few decades now, the need to develop alternative methods has drawn attention to research in this field, and applications are now being used worldwide. After an overview of the many applications that clinics are already using, this article focuses on millimeter waves. Uses of these waves in medicine were developed empirically during the 1970s in eastern Europe. Their impact on the sensation of pain is discussed, this topic having been the subject of detailed scientific studies.

In industry

Sonochemistry, a relatively untapped source of innovation?

Grégory Chatel, chemist, EDYTEM Laboratory, Savoy Mont Blanc University/CNRS

Sonochemistry – the use of powerful ultrasounds for applications in chemistry – is based on the physical and chemical effects of acoustic cavitation in liquids. This breakthrough technology is the subject of academic research, which has explored the new properties resulting from this process and the advantages for a green chemistry with applications in organic chemistry, catalysis, polymer chemistry, extraction and even environmental remediation. Demonstrating the innovativeness of sonochemical processes on a large scale would draw attention to the relatively untapped potential of sonochemistry in industry.

Integrating microwave technology in processes of chemical synthesis on an industrial scale: Impediments and levers

Marilena Radoiu, Microwave Technologies Consulting

The transition towards more sustainable industrial chemical processes implies proposing alternative technologies to help resolving the environmental issues attributed to the industrial chemical sector. This paper presents some aspects of the microwave-assisted technology which, if correctly applied from the R&D phase and up to the industrial scale, may lead to significant savings in energy consumption, process time and environmental remediation

connected with chemical processing. The objective of the article is to provide scientists and industrials (end users) with basics elements of the microwave technology and some practical issues associated with industrial processing using microwaves as to enable a better understanding of microwave assisted processes and what it takes to scale them up.

Emerging applications of terahertz radiation

Illarion Pavel, CGE

Owing to their remarkable properties, T-rays are suitable for a wide range of applications. These properties are reviewed along with the various forms of technology necessary to fine-tuning the emitters and detectors of T-rays for the purpose of industrializing applications. A few elements about the terahertz (THz) market are presented along with a glimpse of French R&D on this topic.

In agribusiness

Nonionizing electromagnetic waves in all stages of production in agribusiness

Hervé Floch and **Patrice Gamand**, ALPHA – Route des Lasers & Hyperfréquences; and **Clément Daignan**, **Nicolas Picard** and **Laure Sandoval**, SANODEV

The agrofood domain shows a rapid evolution in order to take into account the reduction in the usage of pesticides, the end of the glyphosate, the in time agricultural follow-up and the digitization of the agriculture. Climate changes has also an impact in this evolution. In order to answer to the requirements of crop protection, food preservation, contamination, taste preservation while preserving the quality of the final product for the consumer and while taking care of the environment, technologies dealing with non-ionizing waves can help. Ultra-violet light, in particular the UVC, and the micro-waves are good candidates to provide an answer to the needs. We show in the paper the effects of the micro-waves on the plant growth providing possible solution for field weeding for instance. Also, while UV light can have negative impact on the plants, we can show that pulsed UV light provides decontamination of vegetables or fruits which improve the preservation of food in a clean and economical ways. In the paper, we describe that waves used in radio-communications and imaging systems play an important role in the modernization of agricultural techniques in view of optimizing the yield, the cost and the resources. Radio-frequency waves allow the deployment of wireless sensor networks (IoT) which are then used to in real time follow specific parameters in the field such as humidity, temperature, localization of some area or robots. Imaging technologies are also very useful to detect specific plant disease or to give information on hydric stress for instance. We show that non-ionizing waves can contribute to ecological transition either by providing solutions for weeding or decontamination of vegetables without chemicals. However, challenges remain such as the training of the people involved in the field and their acceptance as well as the economical business model in particular for the farmers.

Genodics: From the emergence of a new scientific field to its validation in the field and in academia

Pedro Ferrandiz, Genodics

This article describes the history of a discovery whose concrete effects are observable and repeated, but which has been overlooked for decades by academic circles because of its strangeness and the insufficient elucidation of the phenomena involved. At the same time, China and India, to name but two countries, are developing similar systems on a large scale, without being any further ahead in terms of in-depth understanding, perhaps even less so. This history thus raises the question of the ways in which breakthroughs in scientific knowledge are recognised. It also shows that science is above all a human adventure.

A decisive factor: The public and professional context

Health and environmental regulations about non-ionizing, electromagnetic and acoustic radiation

Natalie Commeau and **Philippe Bodénez**, Department of Risk Prevention (DGPR), Ministry of the Environmental Transition

Since noise can have a variety of sources day and night (neighbors, leisure activities, transportation, etc.), vast regulations have been made to limit exposure. Several laws, executive orders and decisions have been, in part or in full, devoted to this sort of pollution. A founding text in France on the fight against noise pollution is Act n°92-1444 of 31 December 1992. Most of its articles have been placed in the Code of the Environment and are still in force. European law followed up on this act. The regulation of noise pollution from aircraft is largely a matter of international law. The ceiling of exposure for the public to nonionizing, electromagnetic radiation dates from 2002 and is still in effect. The so-called Abeille Act (n°2015-136 of 9 February 2015) focuses on sobriety, transparency, information and consultations in matters related to the exposure to nonionizing, electromagnetic radiation. All these arrangements seek to limit as much as possible the public's exposure to these waves, which can be a cause of nuisances of variable importance.

In the United States, a strong public-private, scientific and industrial policy in favor of research on nonionizing, electromagnetic and acoustic radiation

Yves Frenot, **Xavier Bressaud** and **Kévin Kok Heang**, Science and Technology Service, Embassy of France in the United States

In the United States and elsewhere, the uses of non ionizing radiations (NIR), electromagnetic and acoustic, are thriving in very diverse domains. Research is specially dynamic on the issue of their interactions with living beings, be it for medical use or about their impact on health. The ubiquity of this topic across so many scientific fields provides us with an angle to review the whole American ecosystem: the study of NIR is promoted by federal agencies through ambitious research programs. Funded projects

are undertaken in the best universities and in deep tech companies who seize innovation opportunities flowing from research under the auspices of corporate technological groups. This thriving ecosystem is scrutinized and, somehow lightly, regulated by federal regulation agencies who seek the right balance between precaution and innovation.

Multifaceted research, innovative small and medium-sized companies, and exports: The keys to Germany's success in photonics

Julien Potier, Science and Technology Service, Embassy of France in Germany

Standing among the frontrunners of research on non ionizing radiations (NIR), Germany benefits from a polycentric research landscape, based on academic, extra-academic and industrial capabilities, and significantly supported by both public and private investments. The research on the use of NIR mainly focuses on the photonics field, from ultraviolet to terahertz radiation. The innovation dynamic in this photonic sector supports the rise of a rich production activity, in particular in the field of processes, tools and devices for industry and medical use. Small and medium enterprises play a prominent role in this sector, in which the significant share of the revenue from foreign markets tends to compensate a stagnating domestic market. Germany has also built a highly institutionalized regulation of NIR. Federal radiation protection agencies support a developing field of research of NIR potential side-effects on health and the environment, contributing to a cautious legislation.

Miscellany

Carbon credits at the service of development in Africa

Michel Villette, professor of sociology, Agro-ParisTech, and researcher, Maurice Halbwachs Center (ENS/EHESS/CNRS)

It is vital to both reforest arid zones in Senegal and provide villagers with the means for improving their crops so as to earn enough income to avoid being forced to move toward cities. These two objectives are the mission of IRRIGASC, an association and a firm with the same name. Its plans originated in an irrigation technique for growing young fruit trees in arid zones. Despite initial difficulties in obtaining corporate sponsorship, agricultural improvement programs have now become a source of carbon credits. Firms are investing in programs for planting and irrigating crops. The cultivated trees that survive for more than five years earn negotiable carbon credits after each five-year audit. This approach has advantages for the three partners. Multinational firms eventually recuperate these credits in exchange for their investments; the company IRRIGASC thus pays for its management of the program; and farmers have access for free to techniques for cultivating fruit trees, and they may sell the produce.

Issue editor: Dominique Dron and Ilarion Pavel

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

L'enseignement et la formation dans la transition écologique et sociétale

Préface

Barbara POMPILI

Introduction

Cécile RENOUARD et **Rémi BEAU**

Quelles transitions enseigner ?

Pour une histoire des symbioses énergétiques et matérielles

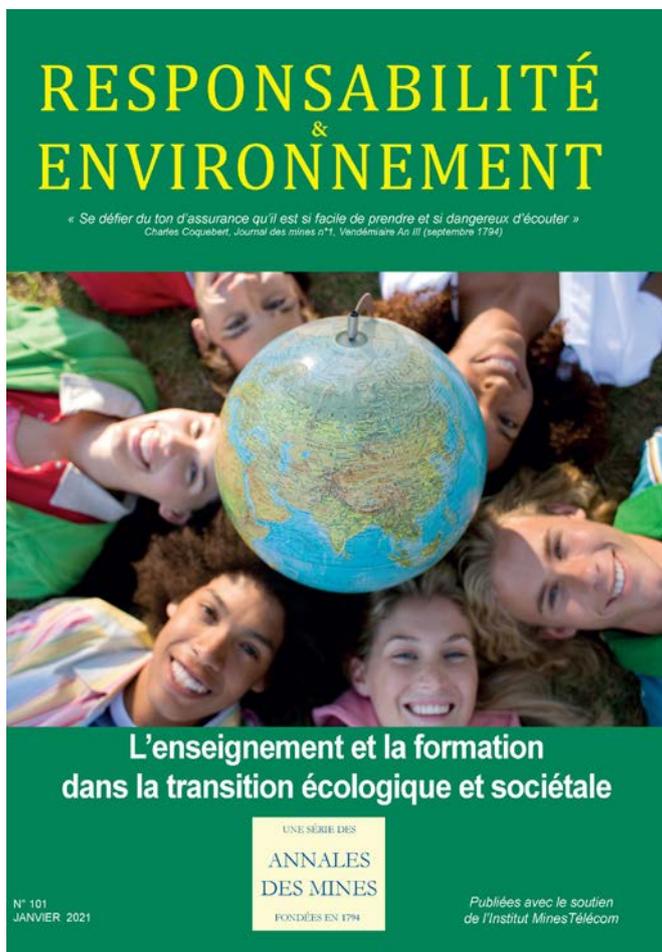
Jean-Baptiste FRESSOZ

Entre crises et transitions : quel enseignement dispenser en santé publique ?

Cyrille HARPET

À quelle transition écologique se former ?

Luc ABBADIE



Janvier 2021

La difficile conversion à l'écologie de la recherche en économie

Quentin COUIX et **Gaël GIRAUD**

Du bon usage des modèles mathématiques

Ivar EKELAND

Quelle transition enseigner ?

Entretien avec **Dominique BOURG**

Les enseignants-chercheurs face à des disciplines en transition

Transitions agricoles et alimentaires et enjeux pour la formation :

la diversité et la complexité au cœur de l'accompagnement

Patrick CARON

Une science de la rencontre

L'écologie scientifique au service de formations interdisciplinaires

Hélène BARBÉ, **Caroline VINCENT**, **Cécile BLATRIX** et

Nathalie FRASCARIA-LACOSTE

Les métamorphoses du droit face aux exigences de la transition écologique

Kathia MARTIN-CHENUT et **Camila PERRUSO**

Les enseignants-chercheurs face à des disciplines en transition

Entretien avec **Marc DUFUMIER**

Des pédagogies alternatives : exemples nationaux et internationaux

Des pédagogies pour vivre en Anthropocène

Nathanaël WALLENHORST et **Renaud HÉTIER**

Éduquer en anthropocène à l'université, une perspective norvégienne

Frédérique BROSSARD BØRHAUG

Des pédagogies alternatives

Entretien avec **Mark SWILLING**

Des connaissances aux compétences : la formation aux métiers de la transition

Du constat à l'action : quels enjeux recouvre la formation du monde professionnel aux transitions ?

Jacques-Olivier GARDA

Former des architectes pour participer à la transition écologique et sociale

Dimitri TOUBANOS et **Philippe VILLIEN**

Quatre familles de compétences pour la transformation écologique et sociale

Gérald MAJOU DE LA DEBUTRIE

Formation à la transition écologique dans les entreprises : de l'engagement à la transformation

David LAURENT et **Méliné REITA**

Des connaissances aux compétences : la formation aux métiers de la transition

Entretien avec **Alain GRANDJEAN**

Hors Dossier

Les politiques de protection de la biodiversité et l'*Ecological Redlining* en Chine : quelles implications pour la COP15 ?

Juliette LANDRY, **Aleksandar RANKOVIC** et **Lucien CHABASON**

Le dossier a été coordonné par **Cécile RENOUARD** et **Rémi BEAU**

Ce numéro peut être consulté et téléchargé gratuitement sur notre site

<http://www.annales.org>

Ont contribué à ce numéro



D.R

David ATTALI est médecin psychiatre et exerce au sein du Service hospitalo-universitaire dirigé par le Dr Marion Plaze et le Pr Raphaël Gaillard, au Centre hospitalier Sainte-Anne (GHU Paris). Il bénéficie d'un poste d'accueil ESPCI – GHU Paris pour réaliser sa thèse de sciences codirigée par Jean-François Aubry, au laboratoire Physique pour la médecine Paris. Ses travaux de recherche portent sur les techniques de stimulation cérébrale dans le traitement des pathologies psychiatriques, s'intéressant en particulier à l'étude de la stimulation ultrasonore transcrânienne dans la prise en charge des dépressions pharmacorésistantes.

©Focused Ultrasound
Fondation

Jean-François AUBRY est directeur de recherche CNRS au laboratoire Physique pour la médecine Paris depuis 2014, professeur associé invité à l'Université de Virginie depuis 2012 et directeur scientifique du Centre d'excellence de la Focused Ultrasound Foundation (Paris) depuis 2019.

Ses travaux de recherche portent sur la thérapie cérébrale transcrânienne guidée par IRM et neuronavigation, sur la thérapie hépatique transcostale guidée par ultrasons, et également sur la détection et la correction de mouvements par ultrasons et sur la cartographie de la cavitation à haute résolution. Il est co-inventeur de cinq brevets sur la focalisation adaptative et a été consultant pour les sociétés Supersonic Imagine (Aix-en-Provence, France) et FUS Mobile (Alpharetta, États-Unis). Il a donné 54 conférences invitées lors de conférences internationales et publié plus de 75 articles dans des revues scientifiques internationales. Il a été éditeur associé du journal *Medical Physics* et est actuellement éditeur associé de la revue *IEEE UFFC*. Il est membre du comité consultatif de recherche de la Focused Ultrasound Foundation. Il a été président de la Société internationale de thérapie par ultrasons (2015-2018). Il a reçu le prix Frederic Lizzi Early Career Award de la Société internationale de thérapie par ultrasons (ISTU, 2012) et la médaille de bronze du CNRS (2012).



D.R

Paul AVAN est physicien au Laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'ENS, et est en parallèle médecin diplômé et biophysicien dans le domaine de l'acoustique physiologique. Il s'est consacré à l'étude de méthodes objectives d'exploration de l'oreille interne et des voies nerveuses auditives,

appliquées à l'ORL et aux neurosciences. Leur validation sur modèles murins porteurs de mutations génétiques précises, en collaboration avec l'Institut Pasteur, lui a permis de contribuer à relier deux domaines naguère disjoints, l'audiologie clinique et la physiologie moléculaire. Cet itinéraire l'a conduit à diriger aujourd'hui le CERIAH, le Centre de recherche et innovation en audiologie humaine à l'Institut de l'audition, un centre de l'Institut Pasteur, à Paris.

Philippe BODÉNEZ a débuté sa carrière en janvier 1995 en DRIRE Picardie, où il était en charge de la réglementation sur la sécurité des équipements sous pression, des canalisations de transport et de la métrologie légale. Après avoir passé 10 ans à l'Autorité de sûreté nucléaire, où il a participé à l'élaboration de la loi de 2006 sur la gestion des déchets nucléaires et à l'élaboration du premier plan national de gestion des matières et déchets radioactifs, Philippe Bodénez devient ingénieur des mines, à l'issue d'un an de formation à l'École des mines de Paris. Philippe Bodénez a occupé plusieurs postes au sein de la Direction générale de la prévention des risques, où il a été en charge des questions de pollution des sols, d'après-mine et de risque accidentel. Il est désormais chef du Service des risques sanitaires liés à l'environnement, aux déchets et aux pollutions diffuses.

De janvier 2015 à mai 2017, il a été conseiller auprès de la ministre du Développement durable, en charge de la prévention des risques, de l'économie circulaire et de la sûreté nucléaire, où il a notamment été impliqué dans la préparation de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte.



D.R

Xavier BRESSAUD est attaché pour la science et la technologie depuis septembre 2015. Il a travaillé quatre ans à Pékin avant de rejoindre l'Ambassade de France à Washington, où il est en charge du suivi des nouvelles technologies de l'information et de la communication, ainsi que de la cybersécurité. Il est professeur des universités en mathématiques, détaché auprès du MEAE. Après un post-doc au Brésil (1996-1998) et une dizaine d'années à l'Institut de mathématiques de Luminy à Marseille, il a enseigné de 2008 à 2015 à l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, effectuant des recherches au sein de l'Institut de mathématiques de Toulouse. Il s'est intéressé à la fois aux systèmes dynamiques discrets, à la théorie des probabilités et aux statistiques. Il a réalisé des travaux sur la modélisation (abstraite) des feux de forêts ou sur la modélisation (plus opérationnelle) du trafic routier, et des travaux sur la classification des systèmes dynamiques auto-similaires, ou produit des résultats mêlant probabilités et systèmes dynamiques dans le cadre de la théorie des jeux.



D.R

David CAUMARTIN est, depuis septembre 2014, directeur général de Theraclion, société française innovante qui, cotée en bourse, est spécialisée dans l'équipement médical de haute technologie utilisant les ultrasons thérapeutiques. Auparavant, il a parfait son expérience en exerçant pendant quatorze ans au sein de GE Healthcare en EMEA

et aux États-Unis, occupant des fonctions dans la vente, le *marketing* et participant au développement de nouveaux produits, scanners et radiologie conventionnelle. Il en a notamment dirigé l'activité mammographie du Groupe au niveau mondial, de 2007 à 2011. En 2012, il a rejoint Alstom Thermal Power en qualité de vice-président Strategy-Merger & Acquisition. Il est diplômé de Télécom Paris et est titulaire d'une maîtrise de physique fondamentale de l'Université Paris Diderot. Il est certifié Six Sigma Master Black Belt. S'appuyant sur les technologies les plus avancées, Theraclion conçoit et commercialise une solution innovante d'échothérapie, l'Echopulse®, qui permet l'ablation non invasive des tumeurs par ultrasons focalisés sous guidage échographique. Outre le traitement des tumeurs bénignes que sont les adénofibromes du sein et des nodules thyroïdiens pour lequel Theraclion dispose du marquage CE, la société, en partenariat avec l'Université de Virginie (UVA, États-Unis), va évaluer le potentiel d'un traitement combinant l'échothérapie délivrée par le système Echopulse avec le pembrolizumab, une molécule d'immunothérapie utilisée dans le traitement du cancer du sein métastatique. Theraclion a également terminé récemment un essai de faisabilité et d'enregistrement d'un dispositif de traitement des varices marqué CE depuis 2019, Sonovein®, et lance actuellement un dispositif Sonovein® S de deuxième génération. Le lancement aux États-Unis d'un essai clinique portant sur les veines est prévu au cours du 1^{er} semestre 2021.



D.R

Dr. Grégory CHATEL a obtenu son doctorat à l'Université de Grenoble en 2012 pour sa thèse sur l'époxydation d'alcènes combinant l'utilisation des ultrasons et des liquides ioniques. Il a ensuite rejoint l'Université d'Alabama (États-Unis) pour un contrat post-doctoral centré sur différentes applications des liquides ioniques en chimie verte. Puis, il a été recruté en tant que maître de conférences par l'Université de Poitiers pour développer un programme de valorisation de la biomasse basé sur la sonochimie. En 2016, il a rejoint l'Université Savoie Mont Blanc pour développer ses travaux en sonochimie organique au travers de nouveaux procédés et d'applications originales en chimie fine avec pour finalité la valorisation des biomasses végétales et des déchets. Il a obtenu son Habilitation à diriger des recherches (HDR) en 2018 et a reçu la médaille d'argent

du prix européen EYCA remis par l'EuCheMS (European Chemical Society) en 2020. Depuis janvier 2021, il est responsable d'une des quatre équipes de recherche de l'UMR EDYTEM (Université Savoie Mont Blanc/CNRS), qui a pour objet l'étude de la transformation des matières d'intérêt économique et sociétal.



D.R

Natalie COMMEAU est ingénieure des Ponts, des Eaux et des Forêts. Elle a commencé sa carrière par une thèse en biostatistiques sur la modélisation de la contamination de produits alimentaires par des agents pathogènes à AgroParisTech et à l'Anses. En 2012, elle rejoint le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, pour exercer

d'abord à la Direction générale de l'enseignement et de la recherche, puis à la Direction générale de l'alimentation en tant que cheffe du Bureau de l'évaluation scientifique, de la recherche et des laboratoires. En 2018, elle occupe la fonction de cheffe de mission bruit et agents physiques à la Direction générale de la prévention des risques au ministère de la Transition écologique (MTE). Entretemps, elle a rejoint la Direction de l'eau et de la biodiversité, toujours au MTE, en tant qu'adjointe à la sous-directrice de l'animation territoriale et de l'appui aux politiques de protection et de restauration des écosystèmes.

Clément DAIGNAN est diplômé du Master Biodiversité, écologie, évolution de l'Université de Perpignan Via Domitia et est ingénieur en génie de l'aménagement et environnement de l'École polytechnique de l'Université de Tours. Après des expériences dans les secteurs public (collectivité) et privé (agences de *design*/communication/environnement), il a rejoint l'équipe de Sanodev, où il est en charge de la gestion de projet Communication – Innovation.



D.R

Alexandre DIZEUX est post-doctorant au laboratoire Physique pour la médecine Paris. Ses premiers travaux de recherche en tant qu'étudiant en thèse au sein du Laboratoire d'imagerie biomédicale ont porté sur la caractérisation de la vascularisation tumorale en pré-clinique *via* l'utilisation de l'imagerie de contraste ultrasonore.

Ses travaux ont ensuite porté sur l'imagerie fonctionnelle ultrasonore de fonctions cognitives avancées dans la prise de décision chez le primate. Ses travaux actuels portent sur la visualisation 4D (3D + temps) en réalité virtuelle des données issues des recherches du laboratoire Physique pour la médecine Paris.

Dominique DRON est ingénieure générale des mines et agrégée de sciences naturelles. Précédemment directrice générale déléguée de l'Ifremer, puis Commissaire générale



D.R

rale au Développement durable (service relevant du ministère de la Transition écologique), elle est aujourd'hui membre du Conseil général de l'Économie (CGE) au ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance.



D.R

Pedro FERRANDIZ est, depuis 2008, co-fondateur et directeur général de Genodics SAS (Paris), qui a pour objectif de montrer la réalité de la « génodique » au travers d'applications sur le terrain, en agriculture notamment. Il y anime l'équipe et les partenariats de recherche, ainsi que la distribution, les installations et le suivi des applications.

Depuis 1999, il est membre fondateur et trésorier du R.A.Ch.I (Paris), Réseau associatif de chercheurs indépendants (travaux de recherche, conférences et publications sur la « génodique »).

De 1994 à 2008, il a travaillé chez Jacquet SA (France) : il y a été successivement ingénieur de production, puis après deux ans contrôleur de gestion industrielle en charge de la refonte des standards et du tableau de bord des différentes usines. Lors de la restructuration logistique du Groupe, il met en place le service ordonnancement et planification des usines, puis crée le « service client » intégrant l'administration des ventes et le SAV et devient responsable logistique Groupe, en charge des plateformes logistiques, du service client et planification à court, moyen et long termes et du service transport (cela représente un effectif de 100 personnes, un budget annuel de 22 millions d'euros dont 18 millions consacrés au transport, et 450 000 palettes traitées par an). Il s'y occupera également de la définition et de la mise en place du premier Certificat de qualification professionnelle de l'agent logistique, avec l'Alliance 7 ; de la conduite et de la finalisation du projet Traçabilité pour le Groupe, récompensé par le trophée du *Supply Chain Magazine* ; et de l'initiation, de la mise en place et de l'obtention de la certification des standards IFS. De 1991 à 1999, il a été chercheur indépendant en « génodique » encadré par le physicien Joël Sternheimer, à l'origine des premières essais de l'utilisation de la génodique sur le végétal et en panification.

En 1993, il obtient son diplôme d'ingénieur en sciences et technologies, option industries des céréales (IST-IC), à l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC-ParisVI) et à l'École de meunerie et des industries céréalières (ENSMIC) de Paris.

Hervé G. FLOCH est le directeur général du pôle de compétitivité ALPHA – Route des Lasers & des Hyperfréquences® (ALPHA – RLH), qui a été créé en décembre 2016 ; il est le fruit de la fusion entre les ex-pôles Route



D.R

des Lasers® (Bordeaux) et Elopsys (Limoges). En qualité de président de la commission Europe de l'Association française des pôles de compétitivité (AFPC), il s'est investi dans l'European Clusters Excellence Initiative (ECEI2) lancée par la Commission européenne pour améliorer la politique d'excellence des *clusters* européens, ce

qui a conduit à la création de l'European Clusters Labeling Excellence Structure (EUCLES), dont il est le premier président, après son élection en décembre dernier. Il est également vice-président de l'European Clusters Alliance (ECA) créée en 2019. Diplômé de l'École nationale de chimie, physique et biologie de Paris et titulaire d'un MSc en chimie de la Faculté des sciences d'Orsay, il justifie de 37 années d'expérience dans le développement des technologies optiques-photoniques en France. Il est salarié du CEA depuis 1985 et détaché depuis 2011 en qualité de directeur général du pôle. Il est à l'origine de contributions importantes, de brevets et de transferts de technologies dans les domaines des couches minces optiques par voie sol-gel et des optiques de haute précision pour lasers de grande puissance (Laser Mégajoule). Son travail a été reconnu par plusieurs prix, dont le prix CEA 1994.



D.R

Yves FRENOT was appointed Counselor for Science and Technology at the Embassy of France in the United States in Washington, DC on September 1, 2018. From 2003 to 2009, he was chief scientist at the French Polar Institute Paul-Émile Victor (IPEV), the leading agency for supporting French scientific research in the Polar Regions. In early 2010, he

was appointed director of IPEV and was therefore responsible for the implementation of the French Polar Program and the management of several French research stations in the Antarctic and the Arctic. Dr. Frenot's scientific background is in terrestrial ecology and, more specifically, in the impacts of human activities and climate change on polar ecosystems. He is one of the world experts in polar and subpolar environments. He obtained his PhD in Biological Sciences at Rennes I University in 1986 and his accreditation to supervise research in 1994. He is a senior scientist at CNRS.



D.R

Olivier GALLET est professeur de biochimie, d'immunologie, de physiologie végétale et de protection des cultures à CY Cergy Paris. Directeur du laboratoire ERRMECe (Équipe de recherche sur les relations matrice extracellulaire/cellules) de 2013 à 2020, il anime des thématiques scien-

tifiques et encadre des travaux de recherche sur de nombreux axes souvent hétérogènes mais complémentaires, comme :

- les glycoprotéines des matrices extracellulaires animales et végétales et leurs rôles dans l'organisation tissulaire et dans des phénomènes physiopathologiques ;
- le comportement des cellules et du vivant en réponse aux dissymétries de l'environnement, que ce soit sur des thématiques adressant le comportement de cellules cancéreuses, et la biofonctionnalisation de matériaux et de surfaces ;
- la caractérisation de la trace biologique en sciences criminelles en partenariat avec l'Institut de recherche criminelle de la Gendarmerie nationale.

Chargé de mission de transition sociétale et environnementale pour CY Cergy Paris Université, il préside la création d'une chaire sur la biodiversité, avec CY Fondation et la Communauté d'agglomération de Cergy-Pontoise. Membre du comité transition écologique et environnementale de la CPU (Conférence des présidents d'université), il a rejoint le groupe de travail du MESRI de Jean Jouzel sur la formation à la transition et à participer à la relecture pour la CPU/CGE du dernier rapport du GIEC. Il est membre de la Société française de la matrice extracellulaire (SFBMEC), de la Société nationale horticole de France (SNHF) et du conseil d'administration de la Société française de biologie végétale (SFBV). Et, par le biais de la création avec son épouse d'une unité agricole de production de plantes à parfum aromatiques et médicinales (PPAM) dans l'Allier, il est en charge de créer une école de maraîchage et de PPAM en partenariat avec des établissements d'enseignement agricole, universitaires et les Communautés d'agglomérations de Cergy-Pontoise et de Moulins-sur-Allier.



D.R

Dr. Patrice GAMAND a obtenu en 1984 son doctorat en électronique-hyperfréquences à l'Université de Lille et une Habilitation à diriger des recherches (HDR) en 2002. Il a rejoint successivement les laboratoires de recherche de Philips, puis de Philips Semiconducteurs et de NXP Semiconducteurs, où il a occupé des postes à responsabilités

en matière d'innovation et de R&D. En 2002, il est promu ingénieur Fellow en tant qu'expert en technologies et en systèmes radiofréquences. En 2016, il rejoint le pôle de compétitivité ALPHA – RLH en région Nouvelle-Aquitaine et exerce au sein du Centre de transfert CISTEME en tant que *business developer* dans les domaines de l'électronique, des hyperfréquences et des radiocommunications. Il est un des huit directeurs de l'European Microwave Association (EuMA). Il est auteur et co-auteur de plus de 80 publications scientifiques et détient 35 brevets.

Kévin KOK HEANG est, depuis septembre 2019, attaché-adjoint pour la science et la technologie à l'Ambassade de France aux États-Unis, où il suit l'actualité de



D.R

la recherche et de la politique scientifique américaine portant sur les nouvelles technologies du numérique, comme l'intelligence artificielle (IA), le quantique, la *blockchain* ainsi que la cybersécurité. Il a été co-auteur d'un rapport publié fin 2019 par l'OCDE sur l'utilisation de l'IA au sein des administrations publiques dans le monde. Ingénieur Arts et Métiers, il est également titulaire d'un master européen en innovation dans le secteur public et e-gouvernance délivré par KU Leuven (Belgique), WWU Münster (Allemagne) et Tal-Tech (Estonie). Passionné par les questions de la ville, il a précédemment exercé dans un cabinet d'architecture en Suisse ainsi qu'au sein du Smart Grid Interoperability Lab de la Commission européenne aux Pays-Bas.



D.R

Morgane LEBOSQ est doctorante en biologie moléculaire et cellulaire chez REMEDEE LABS, qui travaille en collaboration avec le laboratoire IRSET. Son travail consiste à étudier une thérapie utilisant les ondes électromagnétiques (plus précisément, millimétriques) comme nouveau dispositif médical. Elle se concentre sur

l'analyse bénéfique/risque ainsi que sur le mécanisme précis impliqué dans les effets analgésiques. Ce sujet multidisciplinaire mêle biologie, bio-électromagnétique, bio-informatique, chimie analytique, et permet ainsi de toucher à de nombreux domaines.

Chez elle, la curiosité est un leitmotiv. Elle a toujours été intriguée par le fonctionnement du monde, c'est donc tout naturellement que la recherche s'est ouverte à elle. En plus de son goût pour la recherche, elle fait partie du club DOC'7 (club des doctorants et post-doctorants de l'IRSET), dans le cadre duquel elle organise des meetings scientifiques, ainsi que des animations de vulgarisation scientifique. Ce club lui permet de montrer une toute autre facette de sa personnalité : son intérêt pour la gestion des équipes, et surtout son engagement pour une science accessible à tous.



D.R

Yves LE DRÉAN a obtenu son doctorat en biologie à l'Université de Rennes I, en 1993. Après son doctorat, il a travaillé quatre ans au sein du Département de biochimie de l'hôpital pour les enfants malades de Toronto, au Canada. Depuis septembre 1997, il est maître de conférences à l'Université de Rennes I, où il enseigne la génétique et la biologie moléculaire. Il est également responsable du parcours de biologie cellulaire, génétique, microbiologie et physiologie dans le cadre de la licence Sciences de la vie. Son travail

de recherche au sein de l'unité mixte CNRS UMR 6026 a porté sur la régulation de l'expression génétique et sur la réponse adaptative au stress cellulaire. Ce travail lui a permis d'obtenir son habilitation à diriger des recherches en 2007. En 2012, il a rejoint un institut de l'INSERM spécialisé dans la recherche sur l'impact de l'environnement sur la santé humaine (IRSET – UMR S 1085). Ses recherches actuelles se focalisent sur les effets biologiques des ondes électromagnétiques. Depuis 2006, il a dirigé quatre projets de recherche et collaboré à onze autres projets touchant à ce domaine (des projets qui pour certains sont encore en cours). Ses travaux portent principalement sur l'analyse du risque lié à l'exposition environnementale, mais il travaille également sur la mise au point de thérapies utilisant les ondes millimétriques. Il est auteur ou co-auteur de 55 publications dans des revues internationales avec comité de lecture et de plus de 80 communications dans le cadre de congrès nationaux et internationaux. Il a également participé à la rédaction de rapports d'expertise collective pour l'Anses ou pour Bruxelles-Environnement.



D.R

Pr. Jean-Pierre LIBERT a exercé les fonctions de directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique jusqu'en 1991. Il a ensuite rejoint l'Université de Picardie Jules Verne en tant que professeur des universités de classe exceptionnelle. Il est professeur émérite depuis le 1^{er} septembre 2015.

Sa thématique de recherche concerne l'étude des interactions fonctionnelles chez l'enfant prématuré et chez l'adulte. Il est à l'origine de la création de l'unité mixte de recherche sur la périnatalité et les risques toxiques, le laboratoire PériTox UMR I 01 INERIS. Il a exercé différentes responsabilités au niveau national en tant que membre du conseil technique de l'École de cadres de santé de la Croix-Rouge, des conseils scientifiques de l'INERIS et de l'INRS et du groupe de travail radiofréquences et santé à l'Anses. Il est l'auteur de plus de 120 publications internationales.



D.R

Olivier MERCKEL justifie d'une formation universitaire en télédétection, et a consacré sa thèse à l'élaboration de méthodes de mesure de l'exposition des personnes aux rayonnements émis par les téléphones mobiles. Il a intégré le département de recherche en électromagnétisme de Supélec en 2002, en qualité d'enseignant-chercheur, pour y

poursuivre ses travaux sur l'exposition aux ondes, et y développer notamment les bases d'un système de mesure en temps réel. En 2007, il intègre l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, aujourd'hui l'Anses, et devient responsable en 2008 de l'unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques. Cette

entité réalise, en s'appuyant sur les travaux de recherche disponibles et avec le concours de nombreux chercheurs et scientifiques relevant d'organismes nationaux et internationaux, des expertises visant à évaluer les risques pour la santé humaine liés notamment à l'exposition aux champs électromagnétiques, à la lumière, aux nanomatériaux, au bruit, au changement climatique ou encore aux horaires atypiques de travail.



D.R

Ilarion PAVEL est ingénieur en chef des mines et docteur en physique. Il travaille au Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies et au Laboratoire de physique de l'École normale supérieure, dans le domaine de la physique des particules élémentaires et des interactions fondamentales.

Il a été ingénieur de recherche chez Thomson-CSF et a effectué un séjour post-doctoral à Caltech. Pendant trois ans, il a travaillé à la Délégation régionale de la recherche et de l'innovation de l'Île-de-France, dans le domaine de l'innovation et du transfert de technologie. Puis pendant cinq ans, il a été en charge du Réseau national de recherche en télécommunications, au ministère chargé de la Recherche. Par la suite, au sein de ce même ministère, il a été conseiller scientifique en nanotechnologies.



D.R

Dr. Amandine PELLETIER a d'abord effectué sa thèse sur les effets des radiofréquences sur l'homéostasie énergétique au sein du laboratoire PériTox sous la direction du Pr. Jean-Pierre Libert. Elle est ensuite recrutée par ce laboratoire en 2014 en tant que maître de conférences en physiologie pour poursuivre ses travaux. Ces derniers sont les

premiers à montrer les effets des ondes sur l'homéostasie énergétique et ont été cités dans divers rapports nationaux et internationaux (ANSES, 2013 ; OMS, 2015). Sa thématique de recherche est l'étude des fonctions physiologiques impliquées dans l'homéostasie énergétique et de leurs interactions chez le modèle animal. En parallèle, elle enseigne à l'IUT de Creil, au sein du Département hygiène, sécurité et environnement afin de former des préventeurs en milieu professionnel. Depuis 2018, elle forme des médecins du travail et des ingénieurs de prévention sur les risques des champs électromagnétiques, à l'Université de Rennes.

Nicolas PICARD est directeur général et technique de l'entreprise Sanodev. Il est ingénieur électronique et télécommunications, diplômé de l'École nationale supérieure d'ingénieurs de Limoges (ENSIL), et est également docteur en électronique des hautes fréquences de l'Université de Limoges. Ses connaissances s'étendent de l'électronique



D.R

conventionnelle à la physique des ondes dans le domaine des hyperfréquences. Ses activités, auprès de *start-ups* et d'entreprises innovantes, lui ont permis de travailler sur une multitude de projets impliquant une forte transdisciplinarité, mêlant des notions fondamentales en mécanique, thermique, radioactivité, biologie et médical. Ses fonctions de chef

de projet dans le domaine des hautes puissances électriques et de directeur technique dans l'audio radiofréquences le positionnent comme référent technique ayant une vision R&D long terme. Il est auteur ou co-auteur d'une dizaine de communications scientifiques ou de brevets dans le domaine de l'électronique.



D.R

Julien POTIER est agroéconomiste de formation. Diplômé de Sciences Po Bordeaux et d'Agrocampus Ouest, il est responsable des thèmes de l'énergie, de l'environnement, des sciences agronomiques, de la mer et des matériaux au sein du Service pour la science et la technologie près l'Ambassade de France en Allemagne. Il a travaillé précédemment au Service économique de l'Ambassade de France en Nouvelle-Zélande, ainsi qu'au Secrétariat de la Commission agriculture et développement rural du Parlement européen.

Le Service pour la science et la technologie de l'Ambassade de France en Allemagne compte une dizaine d'agents aux profils variés, basés à Berlin et à Munich. Il assure une mission de veille et d'analyse sur les politiques et le paysage de la recherche allemands. Le service réalise également un suivi des coopérations franco-allemandes et travaille à la facilitation de celles-ci, et réalise également un travail de prospective. Par ses actions de communication, d'organisation de prix et d'événements, il fait la promotion de la recherche française et de la coopération franco-allemande auprès du monde scientifique et du grand public.



D.R

Dr. Marilena RADOIU est Chartered Chemist (CChem) et membre du Royal Society of Chemistry (MRSC). Elle a obtenu son doctorat en radiochimie et chimie nucléaire en 1998, à l'Université polytechnique de Bucarest. En 2018, elle a obtenu un MBA à l'École de management de Lyon (EM Lyon).

En février 2018, elle a créé la société Microwave Technologies Consulting SAS Lyon, France, experte en micro-ondes, pour combler le fossé existant entre le monde universitaire et l'industrie dans la recherche, le développement, la démonstration et

l'extrapolation à l'échelle industrielle des technologies assistées par micro-ondes, avec des applications dans les domaines de la chimie de synthèse, de l'agroalimentaire, des semi-conducteurs, de la cosmétique, etc.

Auteure ou co-auteure de plus de 50 publications scientifiques et de 10 brevets d'invention liés aux différentes applications des micro-ondes, elle a reçu le prix Rustum Roy (2016), la médaille AMPERE (2019) et le prix Femme de R&D, Trophées des femmes de l'industrie (2019).

Pour plus de détails, se connecter à : www.linkedin.com/in/marilenaradoiu



D.R

Laure SANDOVAL est fondatrice et présidente de l'entreprise Sanodev. Elle est ingénieure en génie de l'eau et de l'environnement, diplômée de l'École nationale supérieure d'ingénieurs de Limoges (ENSIL). Elle justifie d'une maîtrise en sciences et génie de l'environnement. Elle a complété son parcours par une formation entrepreneuriale à

HEC. Son expérience en tant que présidente de la société Sanodev lui a permis d'acquérir une grande connaissance des différentes filières et des procédés de traitement de l'eau et des déchets, ainsi que du marché des machines de décontamination dans le domaine médical et industriel. Se positionnant à la fois comme commerciale et administratrice de sa propre structure, elle assure également un suivi technique des projets en conseillant sur des technologies spécifiques et sur les études préalables nécessaires à la mise en œuvre de ces technologies. Elle est auteure ou co-auteure d'une dizaine de communications scientifiques ou de brevets dans le domaine environnemental.



D.R

Dr. René de SEZE est médecin, spécialisé en radiologie (IRM). Il a suivi en parallèle des études de physique jusqu'au DEA et réalisé une thèse de biologie en sciences de la vie, portant sur le système immunitaire des micro-ondes modulées de faible puissance. Tout au long de ses études puis de son parcours professionnel, il s'est intéressé aux interactions des

champs électromagnétiques avec les organismes vivants. De 1991 à 2001, il a été assistant puis directeur de recherche au Laboratoire de biophysique de la Faculté de médecine de Nîmes, où il a conduit des recherches sur les applications thérapeutiques des rayonnements non ionisants, puis sur les effets sur la santé des champs radiofréquences utilisés en téléphonie mobile.

Depuis, il continue ce travail de recherche et d'expertise à l'INERIS, où il a été pendant sept ans chef d'unité de toxicologie expérimentale, et où il est aujourd'hui chercheur senior. Il a participé à plusieurs programmes de recherche français et européens, dont COMOBIO, RAMP2001, ADONIS et les programmes de l'Anses. Il participe également

à des mesures complexes de champs électromagnétiques avec des équipements de toute dernière génération : analyseurs de spectre, mesureurs de champs électriques et magnétiques, exposimètres sélectifs de fréquences.

Il a été président de l'Association européenne de bioélectromagnétisme, de la section Rayonnements non ionisants de la Société française de radio-protection (SFRP), vice-président du COST 281 (programme européen d'action concertée), et membre de plusieurs groupes d'experts sur la téléphonie mobile de la DGS, de l'AFSSET, de l'Office parlementaire (OPECST), de la Commission européenne (SCENIHR) et de la Commission de sécurité des consommateurs. Il a été membre du Comité d'experts spécialisés de l'Anses sur les agents physiques, et est encore membre du Comité consultatif de l'OMS, du groupe d'experts référents de l'ICNIRP, de la SFRP, de l'EBEA et de la Société de bioélectromagnétisme, dont il est le président depuis 2019.



D.R

Michel VILLETTE est professeur de sociologie à Agro-ParisTech et chercheur au Centre Maurice Halbwachs (ENS/EHESS/CNRS). Il a été cadre du groupe BSN-Danone (1974), maître de conférences à l'Université de Téhéran (Iran) (1975-76), consultant de la société Euréquip (1978-82), chercheur au Centre d'études des systèmes et technologies avancées (1982-1987), directeur d'étude à l'Institut entreprise et personnel (1987-1990) et professeur à l'École supérieure de commerce de Paris (1990-92). Il a publié aux Éditions du Seuil « L'Homme qui croyait au management », en 1988 (prix Dauphine-Entreprise), et aux Éditions la Découverte, « L'Art du stage en entreprise », 1994, 1999, 2002, 2010 ; « Le Manager jetable », en 1996 ; « Sociologie du conseil en management », 2003, 2009 ; et, avec Catherine Vuillermot, « Portrait de l'homme d'affaires en prédateur », en 2005, traduit en anglais par Cornell University Press, en 2009, sous le titre "From Predator to Icons", et en chinois par Gold Wall Press, à Pékin. Il travaille actuellement sur l'histoire de grandes entreprises locales et multinationales dans plusieurs pays d'Afrique.

ENJEUX NUMÉRIQUES

Intelligences artificielles et humaines, quelles interactions ?

Enjeux numériques



Intelligences artificielles et humaines, quelles interactions ?

1000 0000 1000
ANNALES
DES MINES
PUBLIÉES DEPUIS 1817

N° 12 - DÉCEMBRE 2020

Publiées avec le soutien
de l'Institut MinesTélécom

Décembre 2020

Introduction

Arnaud de LA FORTELLE

L'IA, un outil efficace pour maîtriser des données trop abondantes et trop complexes

L'intelligence artificielle en milieu industriel, levier de transformation et facteur d'innovation du groupe RATP

Côme BERBAIN et Yohan AMSTERDAMER

La « cobotique » et l'interaction homme-robot
Vincent WEISTROFFER

La conduite automatisée, intelligences artificielles et humaines,
quelles interactions ?

Antoine LAFAY et Guillaume DEVAUCHELLE

Stratégie et intelligence artificielle
Henri ISAAC

Les hommes face aux décisions des IA

A Note on the Interpretability of Machine Learning Algorithms

Dominique GUÉGAN

Intelligence artificielle et contrôle de gestion : un rapport aux chiffres revisité
et des enjeux organisationnels

Nicolas BERLAND et Christian MOINARD

Quelle régulation juridique pour l'intelligence artificielle ?
Alain BENSOUSSAN

Intelligence artificielle et sécurité nationale
Julien BARNU

Les mutations engendrées par les IA : puisque les IA vont nous permettre de faire plus de choses, comment allons-nous nous y adapter (et réciproquement) ?

Une IA ou des IA ? Représentations et relations avec les IA

Arnaud de LA FORTELLE

Intelligence artificielle et travail : le défi organisationnel
Salima BENHAMOU

Le futur du travail en présence de formes artificielles d'intelligence
Yves CASEAU

Algorithmes et droit pénal : quel avenir ?

Elise BERLINSKI, Imane BELLO et Arthur GAUDRON

Des interfaces traditionnelles hommes-machines aux machines empathiques :
vers une coadaptation humain-machine

Laurence DEVILLERS

Ce numéro a été coordonné par **Arnaud de LA FORTELLE**