



**CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ÉCONOMIE
DE L'INDUSTRIE, DE L'ÉNERGIE ET DES TECHNOLOGIES**

TELEDOC 792
BATIMENT NECKER
120, RUE DE BERCY
75572 PARIS CEDEX 12

08/10/2019

N° 2018/12/CGE/SR

ENJEUX DES USAGES INDUSTRIELS ET COMMERCIAUX DES ONDES NON IONISANTES ELECTROMAGNÉTIQUES ET ACOUSTIQUES

**Rapport de mission exploratoire
Thème de l'année 2018-2019**

établi par

Dominique DRON
Ingénieure générale des Mines

Yves MAGNE
Administrateur civil hors classe

Ilarion PAVEL
Ingénieur en chef des Mines

SOMMAIRE

SOMMAIRE	3
SYNTHESE	8
TABLE DES RECOMMANDATIONS.....	11
1 Introduction	12
2 Ondes magnétiques et sonores : Grandeurs physiques	13
2.1 Grandeurs physiques des RNI.....	13
2.1.1 Grandeurs à l'émission	14
2.1.1.1 Champs électriques	14
2.1.1.2 Champs magnétiques	15
2.1.1.3 Champs électromagnétiques (0 Hz à 300 GHz).....	15
2.1.2 Grandeurs à l'exposition	16
2.2 Grandeurs physiques des ondes sonores.....	25
2.2.1 Grandeurs à l'émission	25
2.2.2 Grandeurs à l'exposition.....	25
2.3 Champs et cellules vivantes.....	26
2.3.1 Le fonctionnement cellulaire	26
2.3.2 Les modes d'action des champs magnétiques et acoustiques sur une cellule vivante	28
3 Les ondes magnétiques et sonores font l'objet d'applications industrielles de plus en plus diversifiées à fort impact sur l'économie et la société.....	30
3.1 De nombreuses applications professionnelles mettent en jeu différents champs de fréquences.....	30
3.1.1 Les applications de la famille statique	30
3.1.2 Les applications de la famille très basses fréquences.....	31
3.1.3 Les applications de la famille moyennes fréquences.....	31
3.1.4 Les applications de la famille hautes fréquences	32
3.1.5 Les applications de la famille hyperfréquences.....	32
3.1.6 Les applications de la famille télécommunications	32
3.1.7 Les applications de la famille lasers.....	33
3.1.8 Les applications chimiques des fréquences visibles et infra-rouges.....	34
3.2 Avec les développements de la recherche, les applications des RNI s'élargissent et se diversifient.....	35
3.2.1 Dans le domaine de la santé	35
3.2.1.1 En oncologie, les RNI se développent en matière de diagnostic et d'aide au traitement	35
3.2.1.2 Hors oncologie, des pistes de développements à examiner pour d'autres pathologies	37
3.2.1.3 Le potentiel médical des RNI intéresse l'industrie des dispositifs médicaux et les acteurs globaux comme Alphabet.....	38

3.2.2	Le contrôle des procédés et des lieux de travail industriels	41
3.2.2.1	Les RNI et le contrôle non destructif : un outil d'amélioration de la qualité par détection de 100% des défauts sur les lignes de production.....	41
3.2.2.2	Les RNI pour le contrôle de l'environnement du lieu de travail : une application renforçant la sécurité au travail eu égard à son exposition aux nanomatériaux via les champs électromagnétiques.....	42
3.2.3	Les nouvelles applications des RNI en chimie.....	42
3.3	De nouvelles applications des ondes acoustiques se développent	43
3.3.1	Des ruptures possibles pour l'industrie, notamment en chimie et santé.....	43
3.3.1.1	Pour la chimie.....	43
3.3.1.2	Pour la santé.....	44
3.3.1.3	Autres domaines industriels et militaires : du gadget à l'équipement professionnel et aux armements	45
3.3.2	Des ruptures possibles pour l'agriculture et la bioproduction	46
3.3.2.1	Transmission et utilisation d'informations acoustiques par les organismes	46
3.3.2.2	Utilisation de séquences acoustiques spécifiques.....	46
3.3.2.3	Examiner le lien avec la biologie quantique : enzymatique et photosynthèse.....	47
4	Les impacts des champs électromagnétiques et acoustiques sur le vivant	48
4.1	La mesure des effets des champs électromagnétiques et acoustiques sur le vivant	48
4.1.1	Cas des RNI : des équipements sophistiqués et une approche transdisciplinaire permettent depuis peu de surmonter la complexité physique des champs.....	48
4.1.2	Cas des ondes acoustiques : une configuration assez similaire, mais encore plus tardive.....	49
4.2	Impacts macroscopiques : Organismes animaux et végétaux	50
4.2.1	RNI - Rats et souris : des effets sur les comportements et le métabolisme basal	50
4.2.1.1	Effets sur la thermorégulation.....	50
4.2.1.2	Effets sur le système immunitaire	50
4.2.1.3	Effet sur la perméabilité membranaire	51
4.2.2	RNI- Rats et souris : une étude importante montre une cancérogénicité possible.....	51
4.2.3	RNI – Plantes : des effets mesurés liés à la croissance et d'autres processus physiologiques .	51
4.2.4	Ondes acoustiques - Plantes : un rôle dans et sur la croissance et les communications	52
4.2.5	Ondes acoustiques – organismes marins : des perturbations importantes des organismes et des populations.....	54
4.3	Impacts macroscopiques : Organisme humain	55
4.3.1	RNI : au-delà des effets classiquement reconnus, des liens non encore stabilisés avec des cancers, des contaminations chimiques et des maladies professionnelles.....	55
4.3.1.1	Cadre des mesures	55
4.3.1.2	Résultats sur les effets non thermiques	56
4.3.2	Ondes acoustiques : une attention récente aux basses fréquences liée à la diffusion des générateurs électriques et de certaines musiques.....	58
4.3.2.1	Cadre des mesures	58
4.3.2.2	Résultats	59

4.4 Impacts cellulaires, moléculaires et sub-atomiques : quels processus cellulaires.....	59
4.4.1 Constats expérimentaux (effets non-thermiques).....	60
4.4.1.1 RNI : des effets mesurés, en cours d'élucidation et à forts enjeux.....	60
4.4.1.2 Ondes acoustiques : un domaine scientifique presque ignoré en France, alors qu'il explose internationalement depuis moins de 10 ans	61
4.4.2 Hypothèses de principes actifs	62
4.4.2.1 Pour les RNI	62
4.4.2.2 Pour les ondes acoustiques	63
4.5 Récapitulatif : en quoi les éléments scientifiques collectés sur les champs magnétiques et acoustiques rendent-ils probables des ruptures industrielles et nécessaire d'y investir ?	64
4.5.1 Au niveau atomique et moléculaire.....	64
4.5.2 Au niveau cellulaire.....	64
4.5.3 Au niveau de l'organisme végétal entier	65
4.5.4 Au niveau de l'organisme animal entier	65
4.5.5 Au niveau de l'organisme humain entier.....	65
5 Une réglementation précise et protectrice pour les types d'exposition à risque les mieux documentés mais sans véritable portée sur les risques potentiels.....	67
5.1 La réglementation de l'exposition aux ondes sonores, fondée sur la lutte contre le bruit, met l'accent sur les fréquences audibles mais concerne peu les infrasons et les basses fréquences	67
5.1.1 La réglementation de l'exposition aux ondes sonores en milieu professionnel.....	67
5.1.2 La réglementation de l'exposition aux ondes sonores dans la vie quotidienne	69
5.1.2.1 Les bruits de voisinage « ordinaires ».....	69
5.1.2.2 Les réglementations spécifiques.....	71
5.1.3 Un préalable à l'approfondissement éventuel de la réglementation : la poursuite des recherches sur les effets physiologiques potentiels de l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores.....	72
5.2 La réglementation de l'exposition aux champs électromagnétiques est précise en matière professionnelle mais se limite à des dispositions générales de précaution pour le grand public	73
5.2.1 La réglementation applicable en France en matière de réseaux de télécommunications	74
5.2.2 La réglementation de protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques.....	74
5.2.3 L'exposition du grand public aux champs électromagnétiques : un principe de sobriété posé par la loi du 9 février 2015 qui reste à préciser scientifiquement	74
6 Recommandations.....	76
ANNEXE 1 : Lettre de mission.....	81
ANNEXE 2 : Liste des personnes rencontrées	83

ANNEXE 3 : RÉGLEMENTATIONS EN VIGUEUR	85
I -Les seuils réglementaires de l'exposition aux ondes sonores en milieu professionnel.....	85
II - Terme correctif apporté pour le calcul de l'émergence globale en fonction de la durée cumulée d'apparition du bruit.	86
III – Les limites d'émergence sonore spécifiquement applicables aux installations classées.....	87
IV – Les réglementations relatives aux transports aériens et terrestres.	87
V – Les seuils réglementaires en France pour le niveau d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements des réseaux de télécommunications et par les installations radioélectriques qu'ils exploitent	88
ANNEXE 4 : LES FILIALES MÉDICALES BIOÉLECTRONIQUES D'ALPHABET.....	90
ANNEXE 5 : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	91
Effets cellulaires des ondes électromagnétiques.....	91
Effets cellulaires des ondes acoustiques.....	92
Observations et expérimentations sur les organismes (ondes électromagnétiques).....	92
Observations et expérimentations sur les organismes (ondes acoustiques).....	93
ANNEXE 6 : LISTE DES ACRONYMES.....	94

SYNTHESE

Dans le cadre de la section Sécurité et Risques, le CGE s'est donné en 2018 une mission exploratoire (Annexe 1) concernant les opportunités technico-économiques et les impacts biologiques potentiels des applications médicales, industrielles et commerciales des rayonnements non ionisants (RNI)¹, notamment pour leurs nouvelles utilisations et les basses fréquences.

Les RNI sont utilisés sous différentes gammes de fréquences dans la plupart des secteurs industriels : industrie de l'aluminium, des aimants, soudage électrique, industrie sidérurgique et du travail des métaux, industrie électronique, industrie chimique, industrie agroalimentaire, industries du textile, papetière, plastique et de fabrication de composites, etc...

Ils font également l'objet d'applications nombreuses dans le domaine de la santé, en matière aussi bien de diagnostic que de traitement. Le développement de la médecine bioélectronique suscite un intérêt croissant. Dans ce domaine, SetPoint Medical et surtout Galvani Bioelectronics², deux entreprises soutenues par des géants du secteur des appareils médicaux, du numérique et de la pharmacie, sont au premier plan de ces efforts, ainsi qu'Apple et Microsoft. D'après un rapport récent³, le marché de la médecine bioélectronique devrait dépasser les 60 milliards de dollars d'ici 2029.

Compte tenu de l'explosion des travaux scientifiques internationaux depuis huit à dix ans, la mission a étendu ses investigations aux ondes acoustiques et leurs nouveaux champs d'utilisation ; les deux types d'ondes (électromagnétique et acoustique) sont utilisés et pourraient interférer dans le cadre de certains processus du vivant et certaines réactions chimiques. Les constats décrits dans ce rapport correspondent souvent à des compréhensions encore incomplètes des processus à l'œuvre et à des hypothèses de mécanismes, même dans les cas où des résultats pratiques sont obtenus voire appliqués de façon répétée. Néanmoins, le potentiel qu'ils révèlent est considérable.

Les domaines des basses fréquences électromagnétiques et des ondes sonores, dans lesquels certains pays sont particulièrement actifs (Allemagne, Etats-Unis, Suède, Corée du sud, Chine...), ouvrent des perspectives innovantes dans les dispositifs de diagnostics et traitements médicaux (par exemple pour les RNI : bioélectronique sur supports organiques, traitement de cancers difficiles du cerveau ou des viscères), ainsi que pour les stimulations de processus chimiques et biologiques en agriculture et dans les industries chimiques et de bio-production. Les exemples les plus marquants rencontrés dans ce travail sont d'une part, le développement d'Alphabet dans le domaine de la santé, dont l'utilisation des RNI en diagnostic et traitement avec des moyens très importants et,

¹ C'est un rayonnement électromagnétique qui ne dispose pas d'énergie suffisante pour ioniser (arracher les électrons) des atomes ou des molécules. Les ondes radio, les micro-ondes, l'infrarouge, la lumière visible, l'ultraviolet proche, en font partie. Leur fréquence est inférieure à celles des rayonnements ionisants (ultraviolet lointain, rayons X, rayons gamma), bien connus pour leur risque potentiel pour la santé (brûlures, cancer, mutations génétiques).

² Galvani Bioelectronics est une société de recherche et développement en bioélectronique basée au Royaume-Uni, créée par Verily Life Sciences, filiale du groupe Alphabet Inc., et le groupe pharmaceutique britannique GlaxoSmithKline (GSK) en novembre 2016. L'investissement convenu initialement entre les deux sociétés s'élève à 610 millions € sur une période de sept ans.

³ <https://www.idtechex.com/research/reports/bioelectronic-medicine-2019-2029-000643.asp>

IDTechEx est une société de conseil internationale qui fournit des études de marché et d'intelligence économique relatives aux technologies émergentes.

d'autre part, la recherche et l'utilisation par la Chine (Qingdao) d'ondes sonores comme auxiliaires de cultures (en réacteurs et en plein champ) pour stimuler la croissance des végétaux et leurs défenses contre les ravageurs et la sécheresse, en évitant l'utilisation d'engrais et de pesticides (-25% à -50% rapportés dans les publications) ; une petite activité existe en France sur ce sujet.

Ces alternatives aux voies classiques pourraient être moins polluantes, moins énergivores, moins coûteuses, plus spécifiques et moins porteuses d'effets secondaires, et permettre pour certaines d'envisager le traitement ou le soulagement de maladies neurodégénératives, qui s'avèrent de plus en plus précoces et dont le coût annuel évoqué pour l'UE serait de 900G€. La DARPA réalise des programmes sur l'utilisation des RNI et des ondes sonores depuis au moins 2010. Certaines voies plus médiatisées doivent être éclaircies (ex : perspectives d'interfaces homme-machine généralisables couplées à l'intelligence artificielle).

La France dispose d'une recherche de qualité internationalement reconnue en matière de bioélectronique. Certaines équipes disposeraient de matériel unique au monde. Les équipements requis sont souvent coûteux. L'examen sérieux de résultats intéressants mais situés en dehors des orientations habituelles semble plus négligé que dans d'autres pays, pouvant créer un handicap économique à terme.

Or les grandes entreprises françaises, tant pour les programmes scientifiques réalisés que pour les développements techniques et la propriété intellectuelle, paraissent demeurer aujourd'hui en retrait dans ces domaines, qui mobilisent une grande interdisciplinarité (aux financements ciblés comme en Allemagne), sur base de connaissances de pointe. Dans les secteurs notamment de chimie et de santé, elles paraissent peu attentives à cette source de concurrence, en termes de coûts évités de développement, d'industrialisation voire d'environnement. Lorsqu'elles s'y intéressent, elles demandent que la recherche publique « prenne des risques » et s'aventure sur ces voies non classiques et souvent interdisciplinaires, qui constituent selon elles les véritables sources de ruptures. Mais les dispositifs les plus fréquents de financement et d'évaluation de la recherche ne favorisent pas les équipes qui voudraient emprunter ces voies, et ces entreprises pourraient elles-mêmes y consacrer davantage de moyens.

Les études sanitaires que nous avons pu consulter ne semblent pas prouver d'effets directs majeurs des radiofréquences aux puissances de la téléphonie. Plusieurs résultats récents indiquent qu'à des puissances rencontrées dans l'environnement quotidien, elles pourraient influencer la thermorégulation⁴ (prouvé chez le rat), et peut-être interagir avec l'immunité (à l'étude). Enfin, le déploiement des objets connectés et de la 5G pourrait exposer les individus de façon continue à des faisceaux éventuellement focalisés, pouvant éventuellement provoquer des interférences auxquelles les neurones sont sensibles⁵. Ce nouvel exposome qui concerne le corps entier reste à étudier⁶. Enfin, quelques travaux⁷ ont décelé une cancérogénicité possible de l'exposition à de basses fréquences de haute puissance, sans que le processus causal n'ait été identifié.

⁴ Université de Picardie/ANSES

⁵ IMT Saint-Etienne

⁶ Une lettre de mission a été adressée à l'ANSES en janvier 2019 sur ce sujet

⁷ Centre international de recherche sur le cancer (CIRC)

De façon plus générale, les protocoles de nombreuses recherches publiques et privées sur ces techniques doivent être améliorés aux plans méthodologique et statistique. Les évaluations des technologies proposées doivent se faire dans des conditions satisfaisantes de transparence et d'équilibre des compétences publiques et privées. Le numérique prenant une place de plus en plus déterminante dans le fonctionnement des économies et des sociétés, un rejet, fondé ou non, de ces techniques par le public aurait des conséquences industrielles, organisationnelles et économiques lourdes.

Enfin, l'exposition publique et surtout professionnelle aux champs électromagnétiques d'une part, acoustiques d'autre part, fait l'objet de réglementations sectorielles assez hétérogènes. Leur adaptation au progrès des connaissances est nécessaire, notamment dans la perspective d'une forte concurrence internationale dans ces secteurs, d'autant que les acteurs du numérique, plutôt familiers des modèles d'affaires des *start-ups*, peuvent manquer de culture industrielle du risque.

Les recommandations de la mission s'établissent donc sur plusieurs registres :

Faire plus entrer les industries françaises chimiques et pharmaceutiques dans la course internationale aux usages des ondes électromagnétiques et acoustiques

Ouvrir davantage le dispositif français de recherche aux voies non classiques en matière de champs électromagnétiques et ondes acoustiques

Compléter les études sur les effets des champs électromagnétiques, notamment sur la 5G et les objets connectés

Contribuer à l'encadrement normatif et juridique européen et international des usages des ondes

Contribuer à une coordination européenne et internationale de la recherche précompétitive sur les ondes électromagnétiques et les ondes acoustiques

Accompagner le développement des outils connectés par l'information des citoyens.

NB : Cette version finale du rapport a bénéficié des retours des chercheurs rencontrés (p.46, 47, 49, 51, 52, 53, 65, 73).

*

* *

TABLE DES RECOMMANDATIONS

L'ordre dans lequel sont récapitulées ci-dessous les recommandations du rapport ne correspond pas à une hiérarchie. Chaque recommandation regroupe plusieurs actions décrites en partie 6 du rapport.

Recommandation n° 1.	Faire plus entrer les industries françaises chimiques et pharmaceutiques dans la course internationale aux usages des ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques.....	76
Recommandation n° 2.	Ouvrir davantage le dispositif français de recherche aux voies moins classiques en matière de champs électromagnétiques non ionisants et acoustiques.....	77
Recommandation n° 3.	Compléter les études sur les effets des champs électromagnétiques et acoustiques, notamment sur la 5G et les objets connectés.....	78
Recommandation n° 4.	Contribuer à l'encadrement en expertise, en norme et en droit national, européen et international des usages des ondes.....	79
Recommandation n° 5.	Contribuer à une coordination européenne et internationale de la recherche précompétitive sur les ondes magnétiques et les ondes acoustiques.....	80
Recommandation n° 6.	Accompagner le développement des outils connectés par l'information des citoyens.	80

1 INTRODUCTION

Dans le cadre de sa section Sécurité et Risques, le CGE s'est donné en 2018 une mission exploratoire concernant les opportunités technico-économiques et les impacts biologiques potentiels des applications médicales, industrielles et commerciales des rayonnements non ionisants (RNI), notamment pour leurs nouvelles utilisations et les basses fréquences. Compte tenu de l'explosion de travaux scientifiques internationaux depuis huit à dix ans, la mission a étendu ses investigations aux ondes acoustiques et leurs nouveaux champs d'utilisation ; les deux types d'ondes (électromagnétique et acoustique) pourraient interférer dans le cadre de certains processus du vivant et certaines réactions chimiques⁸. Les constats décrits dans ce rapport exploratoire peuvent correspondre à des compréhensions encore incomplètes des processus à l'œuvre et à des hypothèses de mécanismes, y compris dans les cas où des résultats pratiques sont obtenus de façon répétée.

Les possibilités déjà exploitées ainsi que l'état des recherches dans les basses fréquences électromagnétiques et les ondes acoustiques (notamment Allemagne, Etats-Unis, Suède, Corée du sud, Chine...) ouvrent des perspectives innovantes dans les dispositifs et traitements médicaux, ainsi que pour les stimulations de processus biologiques recherchées aussi bien dans l'agriculture que dans les industries de bio-production. Certaines alternatives aux voies chimiques pourraient être moins polluantes, plus économes en énergie, plus spécifiques et peut-être moins susceptibles d'effets secondaires. La France, tant au plan des programmes scientifiques financés qu'à celui des développements techniques, a intérêt à mieux explorer ces domaines qui mobilisent chaque fois une grande interdisciplinarité sur base de connaissances pointues.

Par ailleurs, si les radiofréquences de la téléphonie ne semblent pas provoquer d'effets sanitaires directs majeurs, plusieurs résultats indiquent qu'à des puissances rencontrées dans l'environnement quotidien, elles pourraient influencer le métabolisme de thermorégulation (et peut-être l'immunité sous réserve de confirmation) ; certaines fréquences basses pourraient impacter le génome directement à haute puissance, ou indirectement (traduction) à des puissances plus faibles. Enfin, le déploiement de la 5G va créer un nouvel exposome très évolutif dont l'étude reste à faire (cf. chapitre 4).

Compte tenu des enjeux biologiques, sanitaires, techniques et économiques, voire militaires (DARPA) de ces nouvelles voies, la mission recommande une analyse interministérielle détaillée des développements possibles et de leurs conditions souhaitables.

⁸ La DARPA en 2010 a créé un réseau national de biophysique quantique dédié à l'information quantique appliquée aux systèmes biologiques, et lancé en 2016 un appel à information sur l'état de l'art concernant la communication entre les biosystèmes utilisant des ondes électromagnétiques.

2 ONDES MAGNETIQUES ET SONORES : GRANDEURS PHYSIQUES

2.1 Grandeurs physiques des RNI

Tout corps électriquement chargé crée un champ électrique E , mesuré en V/m , proportionnel à la charge électrique. Si le corps est en mouvement, il crée également un champ magnétique B , mesuré en Tesla (T), proportionnel au courant électrique, résultant du mouvement de la charge. Dans les milieux matériels, pour tenir compte des déplacements des charges liées "internes" du matériau⁹, il est convenable d'utiliser l'intensité du champ magnétique H , mesuré en A/m .

Dans les situations où les charges électriques sont au repos, il y a un champ électrique, mais pas de champ magnétique. Dans les situations où des charges électriques (positives et négatives) se compensent réciproquement, mais sont en mouvement et forment en conséquence un courant électrique, il y a un champ magnétique mais pas de champ électrique.

Un champ électrique interagit avec les charges électriques, en exerçant une force proportionnelle à la charge et à la valeur du champ électrique. Un champ magnétique interagit avec les charges électriques en mouvement, la force étant proportionnelle à la charge, à la vitesse et à la valeur du champ magnétique.

Les champs électrique et magnétique peuvent être statiques ou variables dans le temps.

La variation d'un champ électrique engendre un champ magnétique et réciproquement, la variation d'un champ magnétique crée un champ électrique. Il y a alors la possibilité d'avoir des champs électrique et magnétique couplés qui s'auto entretiennent, en absence de charges électriques ou de courants électriques (les sources) : ce sont les ondes électromagnétiques.

Les ondes électromagnétiques possèdent donc une composante champ électrique E et une composante intensité de champ magnétique H , souvent exprimée par l'induction magnétique B . Elles peuvent se propager dans le vide ou dans un milieu matériel, dans lequel elles peuvent être ralenties ou dispersées.

Les caractéristiques des ondes électromagnétiques sont :

- leur fréquence, mesurée en Hz (ou équivalent, en longueur d'onde¹⁰) ;
- les amplitudes des champs E et H , à partir desquels on définit le vecteur de Poynting $P=E \times H$, qui exprime l'énergie transporté par unité de temps et par unité de surface, par l'onde électromagnétique ;
- la modulation éventuelle de l'amplitude ou de la fréquence ;

⁹ Dans le vide, les champs fondamentaux sont E et B . Dans les milieux matériels, les discontinuités spatiales des charges électriques et leur déplacement rapide, dues à la structure atomique de la matière (électrons et noyaux chargés négativement et positivement) conduisent à des variations brutales de E et B , difficiles à modéliser. On doit alors moyenner ces variations, ce qui implique l'introduction de deux nouveaux champs, l'induction électrique D , et l'intensité du champ magnétique H , qui prennent en compte les déplacements des charges liées à l'intérieur du matériau : les charges de polarisation et les courants d'aimantation.

¹⁰ La longueur d'onde et la fréquence sont inversement proportionnelles. Dans le vide, à une fréquence de 1 GHz correspond une longueur d'onde de 30 cm (1 THz \rightarrow 300 μ m, 1 PHz \rightarrow 300 nm).

- la puissance cumulée, résultant de la variation de puissance dans le temps de la source considérée, et de la somme des sources s'il y en a plusieurs.

Cette description ondulatoire du rayonnement électromagnétique doit être complétée, notamment aux hautes fréquences, par un comportement corpusculaire, en introduisant la notion de photon (quantum du champ électromagnétique, dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence de l'onde¹¹), nécessaire pour expliquer divers phénomènes quantiques, comme l'effet photoélectrique, l'effet Compton (diffusion inélastique des photons sur des électrons), ou le rayonnement du corps noir (interaction rayonnement matière).

Un rayonnement non ionisant (RNI) est un rayonnement électromagnétique qui ne dispose pas d'énergie suffisante pour ioniser (arracher les électrons) des atomes ou des molécules. Les ondes radio, les micro-ondes, l'infrarouge, la lumière visible, l'ultraviolet proche, en font partie. Leur fréquence est inférieure à celles des rayonnements ionisants (ultraviolet lointain, rayons X, rayons gamma), bien connus pour leur risque potentiel pour la santé (brûlures, cancer, mutations génétiques).

Les RNI ont des fréquences comprises entre 0 et 3 PHz (100 nm), la valeur supérieure représentant le seuil de l'UV ionisant (énergie de l'électron 12eV). L'absence d'action ionisante, par exemple, sur l'ADN ne signifie pas absence d'effet, ou présence d'un pur effet thermique. En effet, les RNI peuvent¹² :

- au-dessus d'1 eV, briser certains liaisons covalentes (spectre visible : 780-400 nm/385-750 THz);
- au-dessus de 0,1 eV, perturber les forces de Van der Waals qui stabilisent la structure des macromolécules, ce qui peut induire des effets biologiques (spectre infrarouge : 1 mm-780 nm/0,3-385 THz) ;
- au-dessus de 0,001eV, créer ou interrompre des perméabilités membranaires, avec également des effets biologiques possibles (ondes millimétriques et micro-ondes : 3 cm-1mm/10-300 GHz);
- perturber des processus fondés sur la polarisation des molécules.

2.1.1 Grandeurs à l'émission

2.1.1.1 Champs électriques

Le champ électrique statique terrestre est de 100 à 150 V/m en temps normal ; par temps d'orage, il monte à 10 à 15 kV/m. A 3 000 kV/m, l'air sec devient conducteur, à 1 000kV/m s'il est humide.

Les champs électriques anthropiques rencontrés en environnement urbain sont de 0,007 à 0,7 voire 2 V/m. L'émission d'un téléphone portable est de 50 à 400V/m près de la tête¹³.

¹¹ L'énergie du photon est donc inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. À une longueur d'onde de 1 µm, correspond une énergie de 1,24 eV.

¹² Champs électromagnétiques, environnement et santé, SFRP, dirigé par Anne Perrin et Martine Souques, 2011 p9

¹³ Laboratoire de bioélectronique Intégration du Matériau au Système (IMS), Université de Bordeaux

2.1.1.2 Champs magnétiques

Les courants continus créent un champ magnétique statique. Le champ magnétique de la terre et le champ magnétique des aimants permanents au repos sont également statiques.

Les champs magnétiques variant dans le temps sont produits par des courants variables, en particulier le courant alternatif du réseau électrique, dont la fréquence est de 50 Hz en Europe (60 Hz aux Etats-Unis).

Le champ du vide interstellaire est de 10^{-6} T. Le champ magnétique terrestre en surface est de 30 à 60 μ T, selon la latitude.

Un aimant permanent engendre un champ magnétique de 0,1 à 1T, un électro-aimant à bobinage de 10 à 100T. Les champs pulsés peuvent aller jusqu'à 2 000T sans destruction de la source. Une étoile à neutrons est de l'ordre de 10^{11} T¹⁴.

Le cerveau humain émet un champ magnétique de l'ordre de 10^{-15} T. Les canaux tensio-dépendants des membranes neuronales répondent à des ondes de 1 000Hz. Les neurones réagissent aussi à des stimuli très rapides, 300 MHz voire 800 MHz, selon un mécanisme inconnu qui impacte aussi les organites cellulaires¹⁵.

2.1.1.3 Champs électromagnétiques (0 Hz à 300 GHz)

La densité de puissance délivrée ou éclairage énergétique est donnée par le vecteur de Poynting et est mesurée en W/m^2 . Une antenne-relais 4G délivre $50\mu W/m^2$ ¹⁶ (Société Française de Radioprotection - SFRP).

Classification des fréquences d'usage et des autres RNI

Dénomination	Fréquence	Longueur d'onde	Usages principaux
Très basses fréquences	3-30 kHz	100 km-1 km	Signaux horaires et militaires
Basses fréquences	30-300 kHz	10 km-1 km	Signaux horaires et militaires, radio analogique grandes ondes
Moyennes fréquences	300 kHz -3 MHz	1 km-100 m	Radio analogique ondes moyennes, aéronautique
Hautes fréquences	3-30 MHz	100 m-10 m	Signaux militaires, radio ondes courtes, navigation maritime
Très hautes fréquences	30-300 MHz	10 m-1 m	Signaux militaires et gendarmerie, radio FM, radio numérique, VHF maritime et aéronautique

¹⁴ Source Wikipédia

¹⁵ R. O'Connor, présentation au CGE, section Sécurité et Risques, du 15/01/2019

¹⁶ La pleine lune délivre $50\mu W/m^2$, le soleil $10^9\mu W/m^2$

Ultra-hautes fréquences	300 MHz-3 GHz	1 m-10 cm	TNT, 2 à 5G, RFID, meteo, Galileo, WiFi, Bluetooth, radars
Supra-hautes fréquences	3-30 GHz	10 cm-1 cm	5G, radars, satellites, TV hertzienne, radars de voiture
Extrêmement hautes fréquences (ondes millimétriques)	30-300 GHz	1 cm-1 mm	5G, radars de voiture, satellites exploration de la Terre, armes non létales
Infrarouge	300 GHz-385 THz	1 mm-780 nm	
Visible	385 THz-750 THz	780 nm-400 nm	
Ultraviolet	385 THz-3 PHz	400 nm-100 nm	

Source : ANFr

Le terme « radiofréquences » est utilisé, selon les auteurs, soit de façon générique pour l'ensemble du spectre se situant sous le rayonnement optique, soit pour un intervalle variable (entre 30MHz et 1 à 3 GHz, entre 30 MHz et 300 GHz) avec des recouvrements (exemple ci-dessous). Il sera donc utilisé ici uniquement dans une acception générique.

Exemple de classification réduite des fréquences électromagnétiques

0Hz	1-300 Hz	300 Hz-10 MHz	10 MHz- 300GHz	30-300 GHz	100GHz-10THz
Statique	Très basses fréquences	Fréquences intermédiaires	Radiofréquences	Ondes millimétriques	Ondes Téraherz

Source : IMS-Bordeaux

2.1.2 Grandeurs à l'exposition

Au niveau moléculaire, bien que non ionisants, la lumière visible et l'ultraviolet proche peuvent induire des réactions photochimiques telles que le vieillissement photochimique des vernis ou la dégradation des composés aromatiques. En particulier, l'ultraviolet proche peut toujours exciter électroniquement certaines molécules en créant des radicaux libres, même sans qu'une ionisation ne se produise.

L'infrarouge, les micro-ondes peuvent modifier les configurations vibratoires ou électroniques des molécules et des atomes, ce qui produit des effets thermiques.

Au niveau biologique, le déplacement de charges induit par le champ électrique provoque une polarisation de la cellule de part et d'autre de sa membrane. Avec une faible intensité, un champ pulsé (100 μ s) provoque une stimulation nerveuse. Avec une intensité plus élevée (400 à 1 000 V/cm), la membrane devient perméable, de façon provisoire (électro-perméabilisation), ou irréversible (électroporation), ce qui tue la cellule. Entre 20 et 200 kV/cm, les membranes des organites internes des cellules sont à leur tour affectées, procédé utilisé en oncologie pour tuer les cellules cancéreuses sans effet d'échauffement (cancers de la peau : mélanome, carcinome basocellulaire¹⁷, cf. chapitre 3).

¹⁷ Champs électromagnétiques, environnement et santé, SFRP, dirigé par Anne Perrin et Martine Souques, 2011 p34-5

Du fait de la forte permittivité diélectrique¹⁸ des tissus, un champ électrique de basse fréquence (inférieure à 100-300kHz) ne pénètre que peu le corps humain.

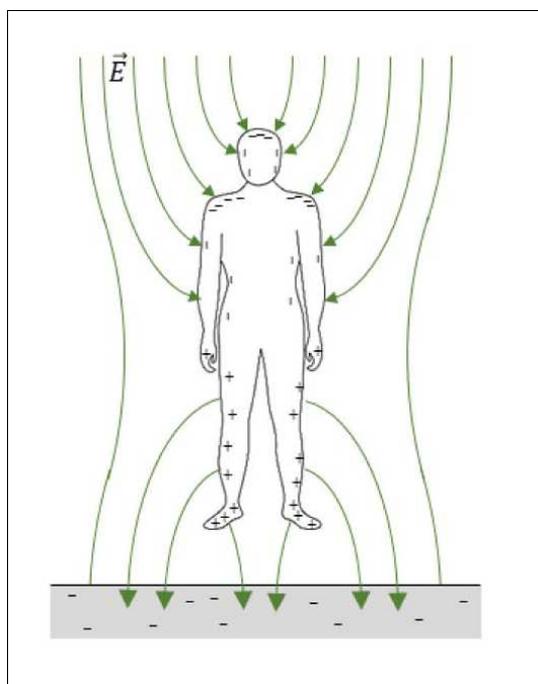


Figure 1 : Corps humain exposé à un champ électrique basse fréquence (inférieure à 100-300 kHz).

Source : *Human Exposure to Electromagnetic Fields*, Patrick Staebler, Wiley 2017

En fait, un champ électrique polarise le milieu matériel qu'il traverse, en déplaçant des charges électriques ou orientant des molécules polaires. Ces structures polarisées (cellules, macromolécules, molécules polaires) engendrent à leur tour un champ électrique qui s'oppose au champ polarisant. C'est le cas notamment du tissu musculaire et du tissu adipeux, formés de cellules dont la membrane isolante permet l'accumulation des charges électriques au voisinage des membranes, qui présentent ainsi des valeurs extrêmement élevées de permittivité diélectrique par rapport aux matériaux classiques, et dans une moindre mesure du tissu sanguin, en raison de son fort contenu en eau et en électrolytes.

¹⁸ Permittivité diélectrique (constante diélectrique) : propriété physique décrivant la réponse macroscopique d'un milieu à un champ électrique, qui augmente avec la polarisabilité des molécules composant le milieu. Ces molécules créent à leur tour un champ électrique qui s'y oppose et en conséquence atténue l'effet du champ électrique imposé.

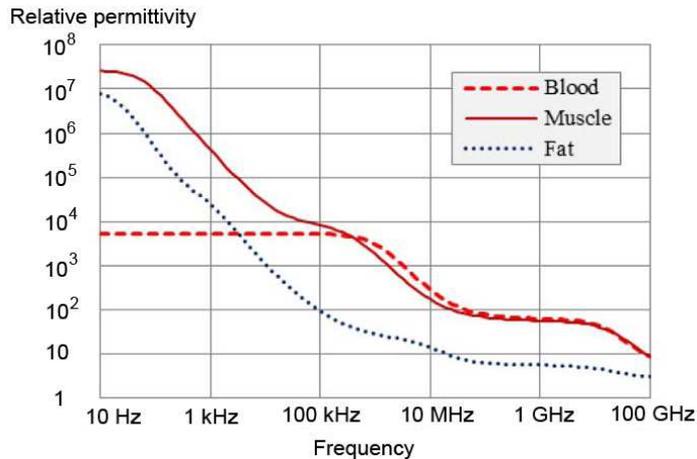


Figure 2 : Permittivité relative (par rapport à celle du vide) des tissus du corps humain

Source : *Human Exposure to Electromagnetic Fields*, Patrick Staebler, Wiley 2017

A mesure que la fréquence du champ augmente, du fait de leur inertie, les charges ont du mal à suivre le champ, les molécules peinent à s'orienter, la permittivité diminue : dans un premier temps les charges n'arrivent plus à s'accumuler au voisinage des membranes, puis les macromolécules ne peuvent plus se déplacer, enfin, les molécules polarisées n'arrivent plus à suivre le champ, ce qui explique l'allure des courbes présentées ci-dessus. Les valeurs élevées de permittivité et de conductivité des tissus résultent en une forte atténuation et une forte réflexion du champ.

En revanche, la perméabilité magnétique des tissus étant égale à celle de l'air, un champ magnétique, statique ou variable (de basse fréquence) pénètre le corps humain. Dans ce dernier cas, par induction magnétique, le champ magnétique variable induit des tensions électriques, donc des courants électriques dans le corps humain (ou plutôt des densités de courant, exprimées en A/m²).

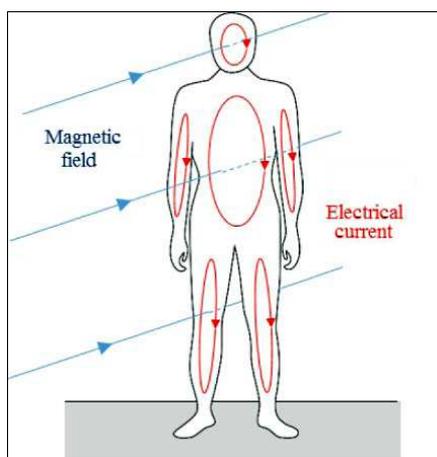


Figure 3 : Corps humain exposé à un champ magnétique basse fréquence (inférieure à 100-300 kHz).

Source : *Human Exposure to Electromagnetic Fields*, Patrick Staebler, Wiley 2017

On peut alors évaluer les effets des champs magnétiques en fonction des densités de courant qu'ils produisent dans le corps humain.

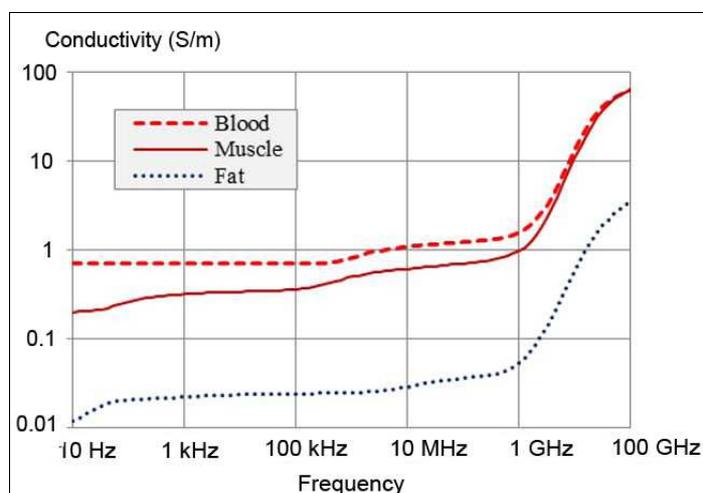


Figure 4 : Conductivité des tissus du corps humain

Source : *Human Exposure to Electromagnetic Fields*, Patrick Staebler, Wiley 2017

Il est alors utile d'examiner la conductivité électrique de divers tissus en fonction de la fréquence. Le sang possède une bonne conductivité en raison de la présence des divers ions dans le plasma sanguin. De même, le tissu musculaire dispose également d'une bonne conductivité, assurée par le liquide intracellulaire, chargé en ions, qui entoure les cellules musculaires. Ce n'est pas le cas du tissu adipeux, dont les cellules sont étroitement liées, ne permettant la libre circulation d'ions.

Au fur et à mesure que la fréquence augmente, la conductivité augmente aussi : au courant de conduction ohmique se rajoute la contribution du courant de déplacement, engendré par la variation du champ électrique.

En conclusion, l'exposition à des champs électriques ou magnétiques de basse fréquence¹⁹ peut être évaluée par les courants électriques traversant le corps humain. Entre 1Hz et 10MHz, à partir de 4V/m pour le courant interne induit, les tissus excitables sont stimulés ; à 40V/m, il y a risque vital de fibrillation cardiaque (Société Française de Radioprotection).

¹⁹ En effet, ce sont des champs observés en présence des sources qui les ont produits (charges et courants électriques), dits "champs proches". Le cas des champs qui se propagent loin de leur source, les ondes électromagnétiques, sera considéré par la suite.

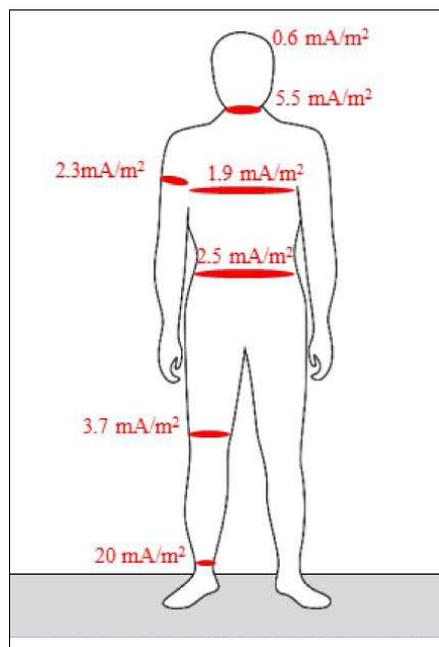


Figure 5 : Densité de courant produite dans un corps humain exposé à un champ électrique de basse fréquence (50 Hz, 10 kV/m)

Source : *Human Exposure to Electromagnetic Fields*, Patrick Staebler, Wiley 2017

Les valeurs de champs mesurées auprès d'équipements quotidiens sont variables, mais d'ordres de grandeur homogènes.

Appareil / Installation	Champ électrique (V/m)
rasoir	négligeable
ordinateur portable	négligeable
câblage électrique habitation	0,1
ampoule éclairage	5
électroménager (TV, four, réfrigérateur, sèche-cheveux (30 cm)	< 120
couverture chauffante (1 cm)	2 000
ligne de tension 230 V	9 (dans la proximité), négligeable (à 100 m)
lignes de haute tension	
20 kV	250 (proximité), négligeable (100 m)
90 kV	1 000 (proximité), 10 (100 m)
400 kV	5 000 (proximité), 200 (100 m)

Valeurs du champ électrique près de divers équipements et installations

Source : *Human Exposure to Electromagnetic Fields*, Patrick Staebler, Wiley 2017

Appareil / Installation	Champ magnétique (μT)
rasoir	négligeable (à batterie), 500 (au secteur)
ordinateur portable (à quelques cm)	1
électroménager	< 1 (sans transformateur), < 5 (avec transformateur)
TV (à 30 cm)	< 2
couverture chauffante	3,6
gros électroménager chauffage	< 10
outillage à moteur électrique (30 cm)	< 20
ligne de tension 230 V	0,4 (à proximité), négligeable (à 100 m)
lignes de haute tension	
20 kV	6 (proximité), 0,2 (100 m)
90 kV	10 (proximité), 0,3 (100 m)
400 kV	30 (proximité), 1,2 (100 m)

Valeurs du champ magnétique près de divers équipements et installations

Source : *Human Exposure to Electromagnetic Fields*, Patrick Staebler, Wiley 2017

Valeurs de champs magnétiques dans la vie quotidienne

Applications domestiques	Champ magnétique (μT)		
	3cm	30cm	1m
Télévision	30	2	0,1
Batteur électrique	50	1	0,05
Perceuse électrique	800	3	0,1
Rasoir électrique	1000	6	0,2
Couverture chauffante	10-20	3,6	
Micro-ordinateur		2	
Four micro-ondes		1,6	
Lave-vaisselle		0,8	

Source : *Champs électromagnétiques, environnement et santé*, SFRP, dirigé par Anne Perrin et Martine Souques, 2011 p44

Selon une étude de 2011 du CSTB²⁰, les équipements domestiques induisent des champs non discriminables des champs ambiants et ne dépassant pas les valeurs de référence. Pour les panneaux photovoltaïques, les valeurs plus élevées trouvées à 5cm de la cloison protégeant les câbles de descente, « 300V/m à 50hz, restent inférieures aux limites recommandées (5000V/m à 50Hz) ».

²⁰ Quantification de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à l'intérieur des bâtiments, ER-712-100003-712-QIN, François Gaudaire, Alain Monard, Christophe Martinsons, CSTB, 10 octobre 2011, résumé par : Effets sanitaires liés aux champs électromagnétiques basses fréquences, ANSES, avril 2019 <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2013SA0038Ra.pdf> (p79)

À plus haute fréquence, à partir de 10 MHz²¹, on peut considérer que les champs électriques et magnétiques variables sont couplés sous la forme d'un champ électromagnétique. Ce champ électromagnétique pénètre dans le corps humain, mais s'atténue d'un facteur 14 % pour une profondeur de pénétration dépendant de la fréquence ; il est absorbé de manière spécifique (résonances) par les divers organes, en fonction de leur taille.

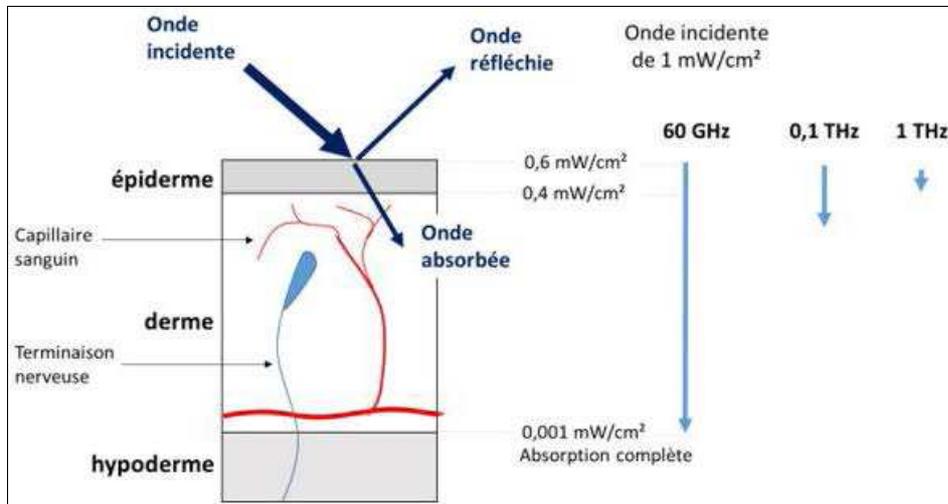


Figure 6 : Pénétration d'un rayonnement électromagnétique de type radiofréquences dans le corps humain en fonction de la fréquence

Source : I. Lagroye, présentation au CGE, section Sécurité et Risques, 13/11/2018

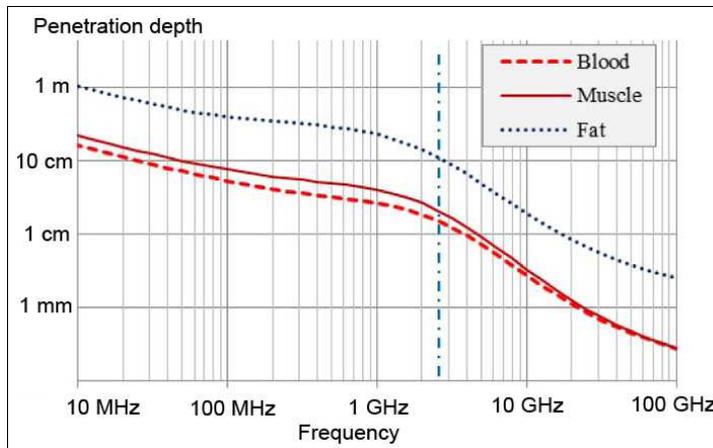


Figure 7 : Profondeur de pénétration du champ électromagnétique dans les tissus du corps humain.

Source : *Human Exposure to Electromagnetic Fields*, Patrick Staebler, Wiley 2017

La profondeur de pénétration d'un champ électromagnétique est liée à la conductivité et à la permittivité du milieu, ainsi qu'à la fréquence, par une relation mathématique plus complexe. Elle est nulle pour les conducteurs parfaits ; pour les autres matériaux, elle diminue avec la fréquence.

Aux plus basses fréquences, bien que la profondeur de pénétration ne soit pas négligeable, l'onde électromagnétique est fortement réfléchie en raison de la forte permittivité électrique des tissus.

²¹ La valeur de 10 MHz est conventionnelle. Bien entendu il y a des ondes électromagnétiques pour des fréquences inférieures, mais du fait de la permittivité du corps humain, elles sont fortement réfléchies à l'interface air peau. Au fur et à mesure que la fréquence augmente, la permittivité diminue, les ondes électromagnétiques sont moins réfléchies et leur effet doit être pris en compte.

Aux fréquences moyennes (typiquement quelques centaines de MHz), l'onde résiduelle non réfléchie pénètre davantage qu'aux basses fréquences, car la permittivité diminue du fait de la difficulté croissante des molécules à s'orienter au même rythme que le champ : c'est la zone la plus problématique en termes d'impact potentiel. L'onde est en revanche plus atténuée en surface car elle perd de l'énergie en chauffant les tissus superficiels. Enfin, aux hautes fréquences (à partir de 3GHz), l'onde est moins réfléchie mais fortement atténuée par cette perte de chaleur.²²

La profondeur de pénétration diminue rapidement avec la fréquence, elle est de l'ordre de 2 cm à 3 GHz. C'est pour cette raison qu'en dessous de 3 GHz, on exprime l'absorption spécifique d'un champ électromagnétique en W/kg (DAS, ou débit d'absorption spécifique²³), alors qu'au-dessus de 3 GHz, on l'exprime en W/m².

L'existence confirmée en 2018 d'un tissu interstitiel général appelé interstitium, entre la peau et les organes, considéré comme le 80^{ème} organe du corps humain et le plus grand, qui permet la circulation d'électrolytes et de cellules dans l'ensemble du corps²⁴, pourrait cependant conduire à reconsidérer l'idée qu'un impact direct localisé à cette profondeur ne puisse avoir que des effets locaux.

L'absorption du champ électromagnétique se caractérise par des résonances, qui dépendent de la taille de l'organe absorbeur. Le maximum d'absorption se trouve entre 60 et 100 MHz, ce qui correspond à une demi-longueur d'onde de la taille du corps humain²⁵ (longueur d'onde de 3 à 5 m). L'absorption se produit donc dans le corps entier. Pour des fréquences plus élevées, on trouve des absorptions localisées qui font résonner certaines parties du corps en fonction de leur taille (tête, bras, organes internes). Elles dépendent des propriétés diélectriques et dimensionnelles des tissus, en raison de phénomènes de réflexion multiple et de focalisation interne dans le corps. A leur échelle, les micro-organismes du microbiote auront donc leurs propres résonances.

²² C'est pour ces raisons, que traditionnellement, en dessous de 10 MHz on étudie l'exposition aux champs électriques et magnétiques variables en présence de sources (champs proches), alors qu'en dessus de 10 MHz on prend en considération les champs électromagnétiques (en propagation libre).

²³ Le DAS est calculé grâce à une simulation utilisant la permittivité et la conductivité du milieu considéré ; il peut ensuite être vérifié dans des tissus réels ou des tissus reconstitués (« fantômes ») dans lesquels on mesure l'accumulation de chaleur avec un thermocouple.

²⁴ Donc très conducteur ; il serait impliqué dans les processus inflammatoires ; <https://www.nature.com/articles/s41598-018-23062-6>: *Structure and distribution of an unrecognized interstitium in human tissues*, P. Benias et al., Nature, 10 mai 2018

²⁵ On peut utiliser la relation $f(\text{MHz})=114/\text{taille (m)}$, recommandée dans le document World Health Organization, *Environmental Health Criteria 137: Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz)*"

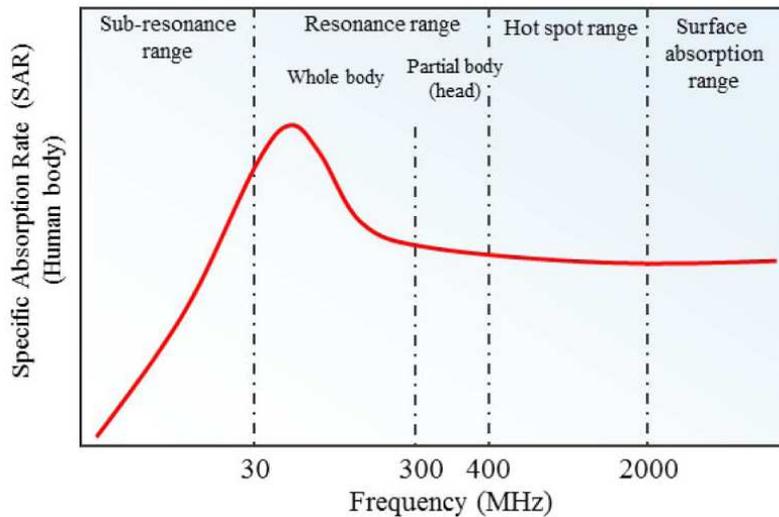


Figure 8 : DAS du corps humain en fonction de la fréquence.

Source : *Human Exposure to Electromagnetic Fields*, Patrick Staebler, Wiley 2017

Pour des fréquences situées au-dessous de quelques MHz, le corps est plutôt conducteur que diélectrique. Comme on vient de le voir, le courant induit est principalement créé par des champs électriques ou magnétiques variables, en présence des sources. L'absorption augmente fortement avec la fréquence autour de 20 MHz, les divers tissus (inhomogènes) et les petites sections traversées par les courants induits créent une absorption plus importante au niveau du cou et des chevilles, avec en plus, des courants plus concentrés en raison de la conductivité réduite des os et des cartilages. Puis, l'absorption du champ s'homogénéise dans tout le corps lorsque la fréquence augmente, à partir de 30 MHz.

L'ANFR a montré qu'un téléphone portable peut dépasser 2W/kg près du cœur (poche de poitrine), et atteindre 7 à 8W/kg en utilisation (source ANSES).

Les limites recommandées pour le grand public sont : 100µT et 5kV/m (directive 1999/519/EC), portées en 2010 par l'ICNIRP à 200µT et 10kV/m.

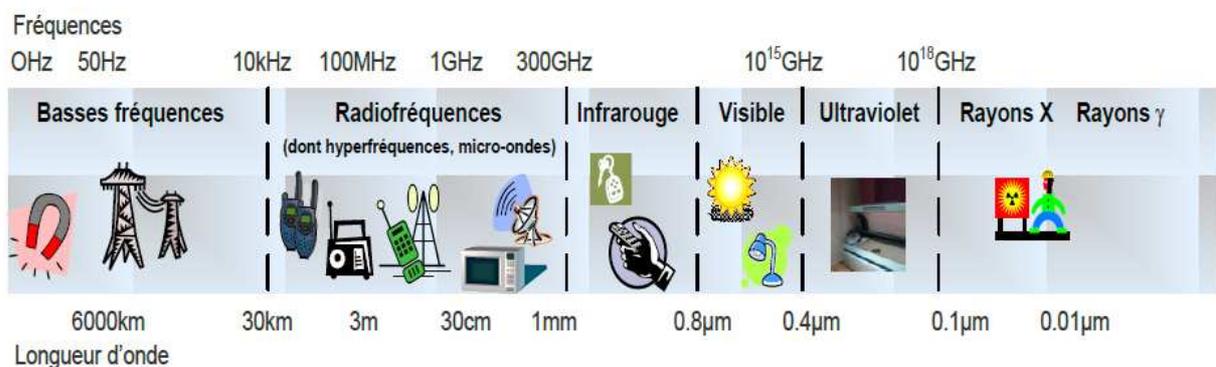


Figure 9 : échelle des ondes magnétiques

Source : *Les Cahiers de la Recherche*, mai 2017, ANSES

2.2 Grandeurs physiques des ondes sonores

Une onde sonore est une perturbation qui se propage dans un milieu matériel élastique solide, liquide ou gazeux. La présence d'un milieu matériel est indispensable, une onde sonore ne se propage pas dans le vide.

La vitesse d'une onde sonore dépend de l'élasticité et de la densité du milieu matériel, elle est par exemple de 340 m/s dans l'air, 1500 m/s dans l'eau ou les tissus organiques, 5 000 m/s dans l'acier.

Une onde sonore est caractérisée par son intensité (mesurée en W/m^2) et par sa fréquence (Hz)

2.2.1 Grandeurs à l'émission

Les ondes sonores audibles pour l'humain (les sons) s'étendent de 20 Hz à 16-20 kHz. Un doublement de la fréquence correspond à une montée d'une octave. Au-dessous de 20 Hz on trouve les infrasons, au-dessus de 20 kHz, les ultrasons.

L'intensité acoustique délivrée se mesure en W/m^2 , mais on peut l'exprimer par une grandeur équivalente, la pression acoustique (valeur efficace²⁶ de la variation de pression dans un temps donné), mesurée en Pascals (Pa). En conditions normalisées, 1 $picoW^{27}/m^2$ équivaut à 20 μPa , c'est la plus faible valeur perceptible par l'oreille humaine, notée par convention 0dB. En pratique, on la choisit comme valeur de référence, à partir de laquelle on mesure l'intensité acoustique en décibels (dB), échelle logarithmique²⁸ décimale qui exprime le rapport entre l'intensité acoustique et cette valeur de référence. La sensibilité de l'oreille humaine est relative et perçoit les écarts entre les bruits de façon proportionnelle au bruit de référence. Un doublement de puissance correspond à un ajout de 3dB, peu perceptible ; un décuplement de puissance correspond à un ajout de 10 dB, perçu par l'oreille comme un bruit deux fois plus fort²⁹.

2.2.2 Grandeurs à l'exposition

La fréquence de résonance est inversement proportionnelle à la taille de l'objet exposé ; la plus basse pour un organisme de 1,70m de haut est de 440 Hz, et 7,5 kHz pour le cœur.

L'intensité acoustique de 60 à 70dB représente le ton d'une conversation calme. Une exposition prolongée à 80dB peut endommager l'audition en saturant la capacité de défense de l'oreille moyenne. La douleur auditive apparaît autour de 120dB pour l'être humain.

Avec l'âge, ce sont les cellules de la cochlée situées au plus proche de l'oreille moyenne qui se dégradent d'abord. En fait, celles-ci sont dédiées à la détection des sons de haute fréquence, ce qui explique la diminution du seuil d'audibilité en fréquence des personnes âgées. Cette zone est sensible à la tabagie, à l'athérosclérose, aux polluants chimiques et aux chimiothérapies.

L'intensité d'un bruit diminue en fonction du carré de la distance qui sépare la source du récepteur. En champ libre, une distance double retire 6dB.

Les impacts sonores sur l'oreille humaine restent difficiles à analyser. La cochlée est physiquement inatteignable pour un examen direct et trop petite pour un examen à l'IRM. L'audiométrie est un outil très partiel : elle ne mesure que la capacité de l'oreille à percevoir des sons de faible intensité,

²⁶ Racine carrée de la moyenne de la grandeur au carré. En fait, l'intensité acoustique s'exprime comme le carré de la pression sonore divisé par l'impédance acoustique (produit de la densité du milieu par la vitesse de propagation du son dans ce milieu).

²⁷ 1 $picoW = 10^{-12} W$

²⁸ L'intensité acoustique (dB) = $10 \log_{10}(\text{intensité acoustique} / \text{intensité de référence}) = 20 \log_{10}(\text{pression acoustique} / \text{pression de référence})$

²⁹ www.bruitparif.fr

transmis par des faisceaux nerveux qui s'avèrent les plus résistants et qui sont sollicités en continu. Les sons de moyenne et forte intensité sont transmis par deux autres faisceaux de nerfs, reliés à chaque cellule ciliée de la cochlée (constaté sur rongeurs). Un examen audiométrique peut donc être satisfaisant alors que les réseaux nerveux dédiés aux intensités moyennes et fortes seraient détruits. D'ailleurs, il n'existe pas d'examen standardisé du potentiel auditif d'un individu. La base de données et de méthodes de l'audition reste donc scientifiquement pauvre.

En outre, la médecine auditive en France reste très cloisonnée entre médecins ORL et prothésistes. Il n'existe donc pas de point entre chercheurs et praticiens pour une approche globale des phénomènes auditifs ; aux Etats-Unis la profession d'audiologue³⁰ (*audiologist*), qui fait les diagnostics et établit les bilans, joue ce rôle d'interlocuteur naturel de la recherche, au bénéfice de celle-ci.

2.3 Champs et cellules vivantes

2.3.1 Le fonctionnement cellulaire

Une cellule, isolée et autonome (organisme unicellulaire) ou insérée dans un ensemble cellulaire vivant (organisme pluricellulaire), est composée d'une membrane entourant un cytoplasme qui supporte des organites: le noyau qui contient l'ADN, les ribosomes qui traduisent les ARN messagers en successions d'acides aminés pour fabriquer les protéines, les mitochondries qui produisent l'énergie, le réticulum endoplasmique qui participe à la régulation du calcium intracellulaire, la synthèse des lipides et la détoxification (réticulum lisse) ou à la synthèse des protéines (réticulum rugueux), l'appareil de Golgi qui complète les protéines (glycosylations, phosphorylations) et pour les végétaux chlorophylliens des chloroplastes contenant la chlorophylle qui permet la photosynthèse et une vacuole centrale de stockage (eau, nutriments). Des vésicules de transport se forment en continu à partir des membranes de la cellule et de ses organites. Les lysosomes sont des vésicules évacuant les déchets des processus cellulaires.

La membrane, double couche lipidique où évoluent des protéines fonctionnelles, est le lieu des interactions entre la cellule et son environnement. Elle est pourvue de centaines de récepteurs chimiques, thermiques, tactiles, acoustiques, magnétiques et optiques, ou hybrides, qui reçoivent des informations de l'environnement, et de milliers de canaux ioniques, associés ou pas aux récepteurs, qui permettent à la cellule d'équilibrer sa pression osmotique et son contenu ionique (au premier chef en Na⁺, Ca²⁺ et K⁺).

³⁰ Harvard Medical School

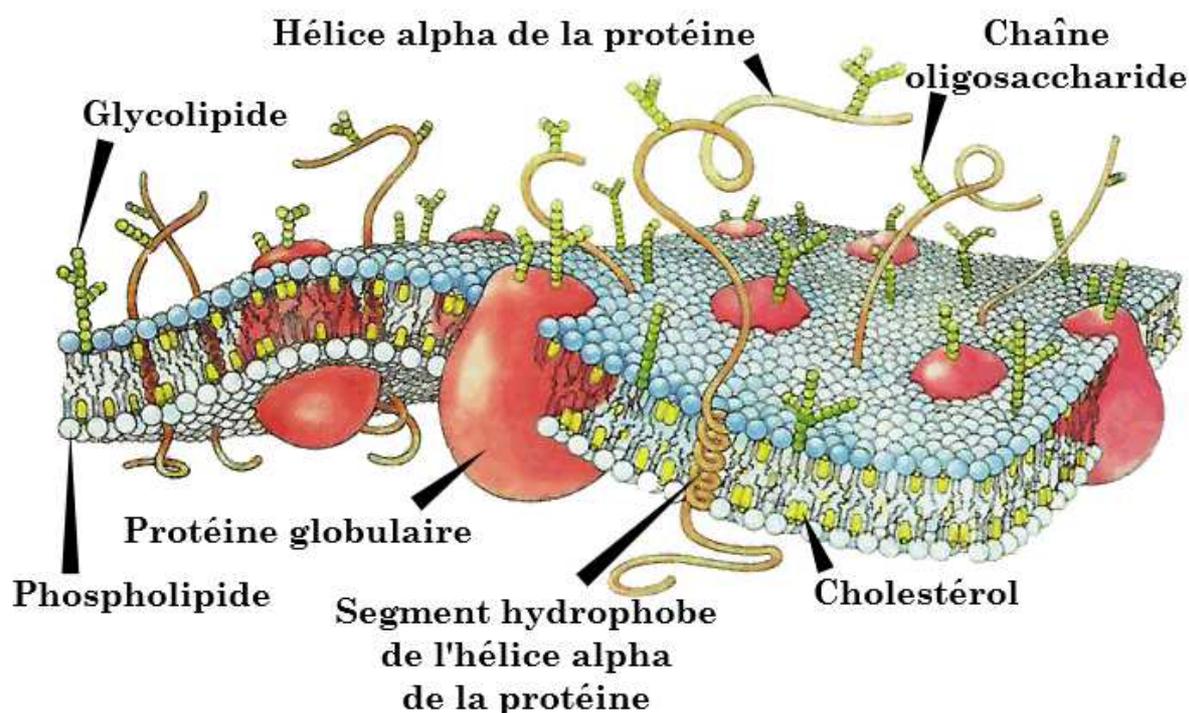


Figure 11 : Détail de la membrane d'une cellule vivante

Source : Medium69 : William Crochot — NIST, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36481221>

Les canaux membranaires sont ainsi commandés par les divers stimuli de l'environnement cellulaire, traduits par les récepteurs membranaires chimiques, électriques ou acoustiques, voire simplement mécaniques (pression). Leur ouverture et leur fermeture déclenchent des processus chimiques à l'intérieur de la cellule (notamment des flux de calcium) qui lui permettent de s'adapter aux fluctuations du milieu : agressions, opportunités (nourriture, oxygène...), communication intercellulaire. Ces flux induisent une cascade plus ou moins longue de transformations se traduisant en un « ordre » aux protéines du noyau de faciliter ou d'inhiber la synthèse de telle ou telle protéine, une indication aux mitochondries de moduler leur production d'ATP, c'est-à-dire d'énergie, une information aux ribosomes, lieu de l'accrochage des acides aminés pour fabriquer une protéine, d'accélérer ou de ralentir ces synthèses, un signal à l'ADN de se diviser selon un processus normal (mitose de croissance) ou pathologique (prolifération tumorale) etc. La concentration en ions Ca^{2+} semble jouer un rôle capital de médiateur dans ces cascades.

Certains auteurs ont ainsi pu considérer que le véritable chef d'orchestre de la cellule était la membrane, le noyau contenant simplement des plans (la partition) dont les variations de modalités d'exécution sont déterminées par les signaux induits par les canaux et récepteurs de la membrane.

Compte tenu de la différence de permittivité des tissus vivants aux champs électriques et magnétiques, qui varie aussi en fonction de la fréquence, les effets recherchés ou non des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques seront différents selon qu'il s'agit de sources et charges proches (introduites au contact des cellules, notamment en applications médicales) ou de champs lointains.

2.3.2 Les modes d'action des champs magnétiques et acoustiques sur une cellule vivante

Pour une cellule isolée, les ondes électromagnétiques ou acoustiques ambiantes sont perçues par les membranes cellulaires et activent ces dispositifs (effets biologiques), vraisemblablement pour une large gamme de fréquences, et en fonction de l'intensité du champ. La cellule dispose d'un pouvoir « tampon » pour réparer ou contrer l'initiation de processus éventuellement délétères ainsi provoquée, afin de maintenir son milieu intérieur en bon état de fonctionnement. Ce pouvoir tampon est d'autant plus fort que la cellule se trouve incluse dans un organisme capable de réguler son milieu intérieur. Cependant, une charge trop forte (nombre d'occurrences, stimulation permanente, résonances harmoniques de modulation ...) ou une vitesse trop grande (de modulation par exemple) peuvent dépasser cette capacité de réparation et enclencher des effets pouvant devenir délétères. Si cela concerne un nombre suffisant de cellules, l'effet devient sanitaire pour l'organe concerné et l'organisme.

Dans un même organisme, différents types de cellules et d'organes répondent à des fréquences différentes de bande très étroite, en fonction de leur nature (teneur en eau par exemple) ou de leur taille (résonance). Il est ainsi possible de caractériser chaque organe et composant d'organe, et de différencier dans chaque organe les cellules tumorales des cellules saines ainsi que les cellules tumorales entre divers organes³¹.

En outre, les champs magnétiques ou acoustiques ne sont jamais les seules caractéristiques de l'environnement cellulaire ; la cellule perçoit en même temps d'autres signaux tels que des produits chimiques émis par l'organisme, ou les polluants environnants, et interprète en continu cet ensemble d'informations.

³¹ Source : entretien IMT

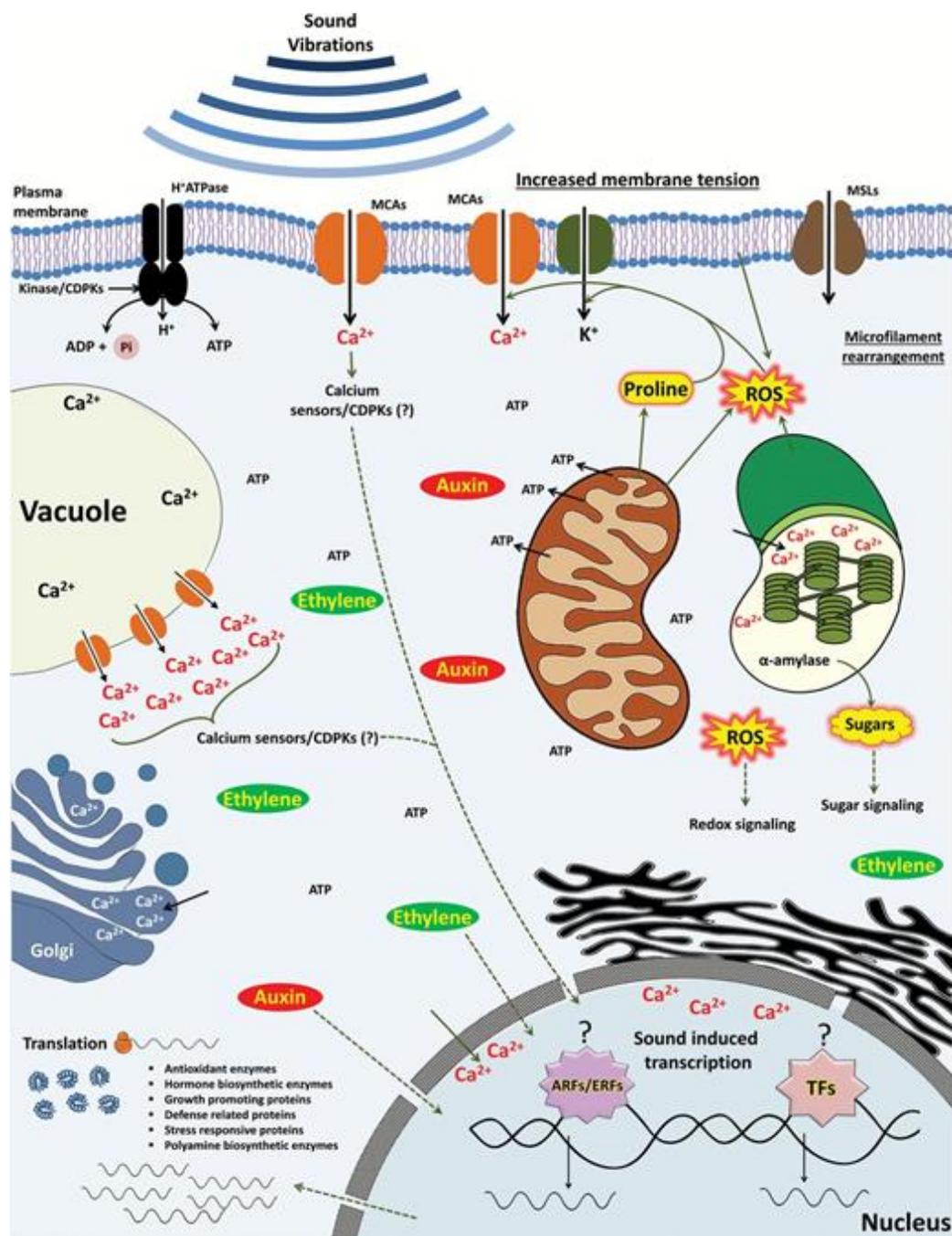


Figure 12 : Modèle résumé des événements moléculaires déclenchés dans une cellule par des ondes acoustiques en tant que tension membranaire.

Source : Ratnesh Chandra Mishra, Ritesh Ghosh and Hanhong Bae, Plant acoustics: in the search of a sound mechanism for sound signaling in plants, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 67, No. 15 pp. 4483–4494, 2016 doi:10.1093/jxb/erw235)

3 LES ONDES MAGNETIQUES ET SONORES FONT L'OBJET D'APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE PLUS EN PLUS DIVERSIFIEES A FORT IMPACT SUR L'ECONOMIE ET LA SOCIETE

De nombreuses applications utilisant les propriétés des RNI font l'objet d'un développement industriel (3.1). Avec les développements de la recherche, ces applications s'élargissent et se diversifient (3.2).

3.1 *De nombreuses applications professionnelles mettent en jeu différents champs de fréquences*

Dans un document publié en 2010³², l'INRS recense les sources de champs électromagnétiques ou rayonnements non-ionisants (RNI) présentes dans l'industrie. L'INRS propose une classification (hors lasers) en six familles en fonction de la gamme de fréquences mise en œuvre par les machines.

Le tableau ci-dessous présente cette classification.

Classification des usages des familles de fréquences

famille	applications	gamme de fréquences
statique	électrolyse, aimant	0Hz
ELF (TBF : très basses fréquences)	distribution électrique, soudage	50-60Hz
moyennes fréquences	induction	50Hz à plusieurs MHz
hautes fréquences	effet diélectrique	qq MHz
hyperfréquences	micro-ondes	2,45GHz
télécommunications	téléphonie, radiodiffusion, TV	très variable

Source : Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)

3.1.1 Les applications de la famille statique

Les applications industrielles et commerciales de cette famille sont nombreuses :

- **l'industrie de l'aluminium** utilise des cuves d'électrolyse alimentées par de forts courants électriques dont l'intensité peut atteindre 400 kA. Des cuves d'électrolyse sont aussi employées pour l'étamage des tôles, par exemple pour la fabrication de boîtes de conserve ;
- dans les laboratoires de recherche et les hôpitaux, les appareils à RMN (résonance magnétique nucléaire) aussi appelés IRM (imagerie par résonance magnétique) mettent en œuvre un électro-aimant à supraconducteur qui génère une induction magnétique statique maximale de 15T au cœur du système ;
- **l'industrie de fabrication des aimants** est un domaine d'application industriel majeur des champs statiques. Les moteurs linéaires installés dans les centres d'usinage à grande vitesse (CUGV) sont composés d'aimants puissants qui produisent dans leur voisinage immédiat une induction magnétique statique.

³² <http://www.inrs.fr/dms/inrs/CataloguePapier/ED/TI-ED-4202/ed4202.pdf>

3.1.2 Les applications de la famille très basses fréquences

De nombreuses applications industrielles et commerciales résultent de l'exploitation des propriétés de cette famille de champ comme la distribution de l'électricité ou le soudage électrique :

- **le transport et la distribution de l'électricité** sont réalisés via des lignes à haute tension, des transformateurs et des lignes basse tension. Sous une ligne à haute tension de 400 kV, les mesures de valeurs de champ électrique peuvent atteindre jusqu'à 11 kV/m (en moyenne 5 kV/m). Le champ électrique augmente avec la tension mais décroît rapidement avec la distance par rapport à la source. Par ailleurs, l'induction magnétique en dessous d'une ligne à haute tension est variable mais faible (environ 30 μ T, c'est-à-dire la valeur du champ magnétique terrestre à l'équateur) ;
- **le soudage électrique** : la plupart des équipements de soudage (soudage à l'arc et soudage par résistance en particulier) fonctionnent à la fréquence de 50 Hz. Cependant, dans le secteur de l'automobile en particulier, certaines techniques de soudage par résistance fonctionnent à la fréquence de quelques kHz (famille des moyennes fréquences). Autour d'un pistolet de soudage à l'arc et de ses câbles de liaison, le champ magnétique est peu élevé car une faible intensité de courant est utilisée. Le soudage par résistance ou par point nécessite quant à lui des courants très élevés, donc l'induction magnétique relevée à proximité est très forte, en particulier sur le côté de la boucle de courant (en général sur le côté de la machine). Ainsi, concernant les presses de soudage par point, le champ magnétique peut dépasser 500 μ T (soit 10 fois le champ magnétique terrestre aux latitudes tempérées) au poste de travail très proche de l'électrode. Les pinces de soudage par point à transformateur intégré exposent moins l'opérateur si l'utilisation est effectuée en position normale (derrière le transformateur). Enfin, les pinces à transformateur déporté provoquent un champ important le long du câble et peuvent donc exposer fortement l'opérateur.

3.1.3 Les applications de la famille moyennes fréquences

Cette famille regroupe toutes les machines mettant en œuvre le procédé d'électrothermie par induction. Le principe est le suivant : tout corps conducteur placé dans un champ magnétique variable est le siège d'une tension électrique induite à l'origine d'un courant électrique produisant de la chaleur par effet Joule. Ce procédé est très employé dans l'industrie, pour des secteurs d'activité éclectiques. Les machines utilisent des fréquences de quelques centaines de Hz à quelques MHz, ainsi qu'une puissance allant jusqu'au MW.

De nombreuses applications résultent de l'exploitation de ces champs :

- **l'industrie sidérurgique et le travail des métaux** via la fusion dans des fours à creuset, le traitement (recuit, trempe) et formage, le préchauffage avant emboutissage ou peinture, le soudage et le brasage de précision en orfèvrerie ;
- **l'industrie électronique** exploite également ces RNI via le dégazage de certaines pièces (électrodes des tubes électroniques), la génération de plasma pour le travail de certaines pièces ou le perçage de céramiques et la fusion pour l'affinage des microcristaux tels le germanium ou le silicium ;

- **l'industrie chimique** avec la fabrication de fibres (de verre, de roche, optiques), la fusion en creuset pour les matériaux sensibles (verres, oxydes, isolants réfractaires) et le séchage de produits pulvérulents par vis chauffante (farines, carbonate de calcium) ;
- **l'industrie agroalimentaire** pour la cuisson et le dorage de produits alimentaires, le séchage ou la stérilisation de produits en poudre, et le thermo-scellage ;
- **les détecteurs de métaux** dans les aéroports et portiques antivol exploitent également les propriétés des champs électromagnétiques de moyennes fréquences.

3.1.4 Les applications de la famille hautes fréquences

Cette famille regroupe les machines travaillant avec des fréquences de quelques MHz telle que les presses HF et utilisant le procédé d'électrothermie par effet diélectrique. Le principe est le suivant : tout matériau diélectrique (isolant) placé dans un champ électrique se charge électriquement. Si le champ est alternatif, les inversions répétées de charge s'accompagnent de pertes qui se transforment en chaleur. Ce phénomène requiert des fréquences élevées (3MHz à 3GHz).

Les applications industrielles et commerciales sont diverses :

- **l'industrie du bois** exploite les hautes fréquences pour le séchage et le formage de pièces, ainsi que le collage pour la fabrication de contreplaqués, agglomérés et panneaux laminés ;
- **les industries du textile, papetière, plastique et de fabrication de composites** les exploitent quant à elles pour le séchage, le découpage, le formage et le soudage des matières plastiques (bâches, liners de piscine, blister).

3.1.5 Les applications de la famille hyperfréquences

Le chauffage par micro-ondes est obtenu via l'émission d'un champ électromagnétique à la fréquence de 2,45GHz produit par un tube (magnétron) qui fait vibrer les molécules du matériau à chauffer. Les fours industriels à micro-ondes en enceinte fermée ou à tunnel sont utilisés dans la plupart des industries notamment pour :

- la décongélation des aliments, déparasitage des céréales et autres produits agricoles ;
- la vulcanisation du caoutchouc (joints de portières de voiture, balais d'essuie-glace) ;
- la préparation de teintures dans l'industrie textile ;
- la vitrification de déchets radioactifs.

Ce type d'émission est facile à confiner même si des fuites peuvent exister au niveau des entrées/sorties du tunnel ou des joints de portes des suites d'un mauvais entretien de la machine.

3.1.6 Les applications de la famille télécommunications

Cette famille regroupe tous les moyens de télécommunication à savoir les émissions de radiodiffusion, de télédiffusion, téléphonie mobile, télémessure, radiobalisage, systèmes RFID, transmissions satellitaires, radars (civils et militaires). Le tableau ci-dessous présente les fréquences (« ondes radio ») utilisées pour chaque usage.

Types d'émissions de télécommunications et fréquences correspondantes

type d'émission	Fréquences
radiodiffusion	bande FM de 88 à 104MHz
télévision	VHF de 30 à 300MHz et UHF de 300MHz à 3GHz
CB talkie-walkie	27 et 400MHz
téléphonie mobile	300, 1800 et 2400 MHz
satellitaire et radars	qq GHz
Wifi, Bluetooth	qq GHz
RFID	125kHz à qq GHz

Source : INRS

La 5G utilisera dans un premier temps les bandes 3,4 - 3,8 GHz, ainsi que 26/28, éventuellement la bande 700 MHz déjà attribuée à la 4G, puis dans un second temps, les bandes de 38 et 60GHz (à l'intérieur des bâtiments). Une des nouveautés de la 5G est le multiplexage possible (*Multiple In Multiple Out* : MIMO) au niveau des antennes, qui pourront suivre plusieurs utilisateurs avec un rayon focalisé et sur des distances plus courtes. Les antennes seront donc plus nombreuses. Le cumul induit des expositions (2G+, 3G, 4G, 5G, IoT), leur caractère continu à terme, ainsi que les effets éventuels des émissions millimétriques de la couverture satellitaire associée (a priori peu sensibles, mais à vérifier) n'ont pas fait l'objet d'étude d'impact sanitaire et environnemental (ANSES, cf. chapitre 4).

Selon l'OCDE (OECD digital economy papers, oct 2018), les principales caractéristiques de la 5G seront (3GLTEinfo 2015) : une vitesse de connexion allant jusque 20Gbps (maximum 1Gbps aujourd'hui), des vitesses de couverture allant de 100 à 1000Mbps contre 10Mbps pour la 4G, une latence de 1ms, contre 4ms en 4G, une densité d'équipements de connexion de l'ordre de 200000/km². La voiture autonome de niveau 5, qui porte au moins 33 capteurs et doit télécharger des cartes instantanément, requiert la 5G dès 2020 selon BMW.

3.1.7 Les applications de la famille lasers

Le terme « laser » est un acronyme issu de l'expression « *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* » (amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement). Le laser produit et amplifie une onde lumineuse. La lumière produite par le laser est monochromatique, c'est-à-dire d'une couleur correspondant à une seule longueur d'onde définie, qui peut être dans l'infrarouge, le visible ou l'ultraviolet.

Les lasers sont utilisés dans des secteurs d'activité aussi variés que l'industrie, les arts du spectacle, le domaine médical, dans le domaine de la recherche, l'enseignement ou la défense nationale.

Dans l'industrie, on utilise les lasers pour leur puissance et leur précision dans des opérations de traitement des matériaux comme le marquage, le soudage, la découpe, le perçage ou le décapage. En informatique et dans le domaine audiovisuel, les diodes laser permettent la lecture et l'enregistrement des données sur des supports optiques numériques comme les DVD et les CD. Les lasers sont également employés dans le domaine des télécommunications via les réseaux de fibre optique et dans l'imprimerie ou encore pour les lecteurs de codes-barres, les pointeurs ou les télémètres laser utilisés par les géomètres.

Dans le domaine médical, les applications du laser sont nombreuses notamment pour la chirurgie esthétique (élimination des tatouages, des cicatrices, des vergetures, des taches solaires, des rides, des taches de naissance et des poils), la chirurgie oculaire, la chirurgie réfractive et la chirurgie des tissus mous, les bistouris laser (chirurgie générale, gynécologique, urologie...), pour le traitement du cancer en particulier l'élimination "sans contact" des tumeurs du cerveau et de la moelle épinière, et, en dentisterie, pour le traitement des caries, le blanchiment des dents et la chirurgie buccale.

Dans le domaine de la défense, les utilisations militaires des lasers comprennent des applications telles que la désignation et le ciblage, les contre-mesures défensives, les communications et les armes à énergie dirigée³³. Des entreprises majeures comme Lockheed Martin, Northrop Grumman ou Boeing travaillent activement au développement de ce type d'applications.

Des armes anti-émeutes combinent laser et ondes sonores pour créer à distance des déflagrations violentes accompagnées éventuellement de lumière aveuglante³⁴.

Dans le domaine du divertissement et des loisirs, des éclairages laser accompagnent de nombreux concerts et le laser est utilisé en tant que source de lumière pour les projecteurs de cinéma numérique.

Dans le domaine scientifique, le laser est utilisé pour la spectroscopie, le traitement thermique et en métrologie.

L'œil est l'organe le plus susceptible de subir des lésions causées par un faisceau laser. Le risque de lésion dépend de la puissance et de la longueur d'onde du faisceau laser. La fermeture réflexe des paupières offre un certain degré de protection. Cependant, la lumière laser visible peut être assez intense pour causer des dommages en un temps plus court qu'un clignement des yeux. Le risque de dommage à la peau dépend du type de laser, de la puissance du faisceau laser et de la durée de l'exposition. Les dommages provoqués peuvent aller de la brûlure localisée à la lésion profonde.

3.1.8 Les applications chimiques des fréquences visibles et infra-rouges

Solvay est le premier fabricant mondial de terres rares à capacités optiques (luminophores). Le secteur est plutôt en décroissance, car les lampes fluo contenaient 1g de terres rares par ampoule, alors que les LED, qui les remplaceront progressivement n'en contiennent qu'1 pg (transformation de la lumière bleue en verte).

Ces terres rares servent encore à produire des effets d'iridescence et d'opalescence, utilisables en marquage ou en décoration. En outre, elles sont utilisées pour transformer l'infra-rouge en lumière visible dans des applications anti-contrefaçons.

³³ Active Denial System utilise le 94 GHz pour provoquer un échauffement de la peau à 50°C en 2 secondes. A basse puissance, cette même fréquence est utilisée comme antalgique.

J.-C. Debouzy , D. Crouzier, V. Dabouis R. Malabiau, C. Bachelet, A. Perrin, *Biologic effects of millimetric waves (94 GHz). Are there long term consequences?* Pathologie Biologie 24 février 2006

³⁴ http://www.thelivingmoon.com/45jack_files/03files/Sonic_Projection.html: Plasma Acoustic Shield System, Wattre's Corp,

3.2 Avec les développements de la recherche, les applications des RNI s'élargissent et se diversifient

3.2.1 Dans le domaine de la santé

3.2.1.1 En oncologie, les RNI se développent en matière de diagnostic et d'aide au traitement

3.2.1.1.1 Les usages en matière de diagnostic

Les RNI permettent d'optimiser les méthodes de diagnostic médical. Ils sont complémentaires des méthodes d'imageries médicales et améliorent la précision du diagnostic. La magnétoencéphalographie a ainsi été développée comme modalité non-invasive pour différencier les tissus cérébraux néoplasiques, en combinaison avec les technologies de RMN/IRM ou de Computed Tomography. Les différences de réponse entre les tissus néoplasiques et les tissus normaux mettent en évidence la présence de tumeurs (bénignes ou malignes)³⁵. Elles donnent lieu à la fabrication et mise sur le marché de dispositifs de diagnostic portatifs.

Par exemple, des laboratoires développent des simulations numériques des interactions du champ électromagnétique avec la matière, en particulier pour la conception des antennes, de méta-matériaux, de circuits micro-ondes, mais aussi dans le biomédical³⁶ (neuro-imagerie pour développement des électroencéphalographies de haute résolution pour le diagnostic d'épilepsie³⁷).

Ainsi, Micrima Ltd., société britannique, a développé une technologie de mammographie à micro-ondes, initialement mise au point à l'Université de Bristol. Cette technologie est actuellement déployée dans des essais cliniques dans plusieurs centres d'imagerie du cancer du sein au Royaume-Uni. Contrairement aux ultrasons, les micro-ondes ont la capacité de pénétrer profondément dans le corps et ne sont pas arrêtés par des os ou d'autres obstacles tels que des poches d'air.

Cela évite l'exposition aux rayons X et est plus facile à utiliser : la patiente est confortablement allongée sur une table, le processus prend moins d'une minute. Le système utilise une soixantaine d'antennes, qui balayent à des fréquences entre 4 - 10 GHz et mesurent les variations d'impédance, de permittivité et de conductance des tissus afin de différencier les tissus malades des tissus sains, selon le principe suivant : à tour de rôle, une antenne émet, les autres enregistrent. L'image résultante est tridimensionnelle, similaire à une tomographie actuelle et relève des détails permettant la détection de tumeurs de 5 mm.

³⁵ Ex : *Non invasive radiofrequency diagnostics of cancer. The Bioscanner —Trimprob technology and clinical applications*, Clarbruno Vedruccio, Carla Ricci Vedruccio, Journal of Physics: Conference Series 329 (2011) 012038 ; *Innovative non-linear radiofrequency oscillator working on 462-465 MHz plus the harmonics* ; Concetta De Cicco, Luigi Mariani, Clarbruno Vedruccio, Carla Ricci, Clinical Application of Spectral Electromagnetic Interaction in Breast Cancer, Tumori 92(3):207-12, May 2006

³⁶ <https://ursifr-2019.sciencesconf.org/>

³⁷ Francesco Andriulli : <http://recherche.telecom-bretagne.eu/cerl/research.html>

3.2.1.1.2 Des applications thérapeutiques directes ou complémentaires de thérapies existantes

En oncologie, certaines expérimentations utilisent des rayonnements non ionisants pulsés puissants sur des cellules (électrochimiothérapie par électroporation : 1kV/cm, pendant une microseconde)³⁸, d'autres font l'objet d'essais cliniques avec des champs de faible intensité³⁹ modulés selon des fréquences des tumeurs, spécifiques des organes et des types de cancer⁴⁰. Ces principes donnent lieu à la fabrication et mise sur le marché de dispositifs de diagnostic et traitement portatifs.

Les principes actifs évoqués par les auteurs consultés seraient, pour les diagnostics, la teneur en eau et la polarisabilité différentes des cellules tumorales (canaux sodium plus nombreux⁴¹), et pour les traitements, la désorganisation des microtubules lors de la division cellulaire. Des nanotubes de carbone jouant le rôle d'amplificateurs peuvent aussi être utilisés ; en effet, l'effet toxique de ces particules est accentué par un signal carré à 100 kHz et 10 V/m (expérimentation sur des cellules gliales en division)⁴².

A titre d'exemples :

- La PME *Panaxium*⁴³, issue des laboratoires de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, semble la seule entreprise française à avoir investi le domaine de la bioélectronique médicale, sous l'angle de l'équipement électronique pour dispositifs médicaux. Ce secteur ne semble pas investigué par d'autres entreprises françaises, y compris SANOFI.
- L'entreprise américaine *Medtronic* vient d'obtenir l'inscription française⁴⁴ d'un système d'ablation par radiofréquence de l'endobrachyoesophage.
- L'entreprise allemande *Therabionic* a développé un dispositif (OncoBionicP1) pour le traitement du carcinome hépatocellulaire non-résectable avancé, sur le second principe. Les avantages seraient l'absence d'effets secondaires notables et son utilisation possible chez les patients dont les fonctions hépatiques sont particulièrement endommagées et qui ne tolèrent donc pas de traitement chimique. Des études menées sur les cancers du sein métastasés suggèrent que ce type de dispositif pourrait être utilisé dans le traitement de différentes formes de cancers.

³⁸ Ex : Carr et O'Connor 2016 : onde porteuse de champ à 44kV/cm pulsés à 10Hz pour désorganiser les microtubules des cellules de glioblastome et bloquer la multiplication cellulaire –

³⁹ Zimmermann et al. 2012 : 100-200 V/m, 100-300Hz, 0,3 à 1W/kg, 3 à 7 heures par jour pendant 7 jours : désorganisation des microtubules pendant la mitose

⁴⁰ Costa, Barbault et al. 2011 : onde porteuse à 27,12MHz, modulée selon une succession de fréquences caractéristiques de la tumeur (ex : hépatocarcinome : 194 fréquences allant de 410,2Hz à 20365,3Hz, 3 secondes par fréquence (total une heure), trois fois par jour.

⁴¹ Source : IMT

⁴² Debouzy JC, Crouzier D, Ballester B and Foerster M, *Active Probe Emitting HF Electromagnetic Fields and Piezoelectric Emissions in Association with Local Carbon Nanotubes : Preliminary Tests in C6 Glioma Cell Death Induction: A Possible Application in Glioblastoma Therapeutics ?* Biomedical, ISSN: 2574 -1241 DOI: 10.26717.BJSTR.2019.14.002563

La PME française *Nanobiotix* utilise cette capacité d'amplification en utilisant des nanocristaux d'oxydes d'hafnium pour amplifier les effets des radiations (ionisantes)

⁴³ <http://www.panaxium.com>

⁴⁴ Société installée à Dublin (medtronic.com) ; arrêté du 9 mai 2019 SSAS1913566A
https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000038465635

- L'entreprise américaine *NovoTTF*⁴⁵-100A développe des dispositifs à destination des patients souffrant de glioblastome multiforme récurrent, traité normalement par chimiothérapie. L'ablation par radiofréquences est également utilisée mais elle induit une hyperthermie. NovoTTF-100A applique un champ électrique alternatif 100-300 kHz grâce à des électrodes placées sur la peau à la verticale de la zone touchée par le cancer. Le dispositif, sans hyperthermie induite, serait le premier de ce type à avoir été approuvé par la FDA (USA). Il reste controversé, notamment du fait du coût annoncé⁴⁶.

Le traitement des tumeurs peut également être amélioré via des champs électriques pulsés. Des pulsations électriques courtes induisant des changements réversibles ou non dans la porosité/imperméabilité de la membrane cellulaire sont utilisées selon deux techniques :

- l'électrochimiothérapie fondée sur des champs électriques relativement élevés (1 kV/cm) appliqués pendant plusieurs microsecondes, avec un effet irréversible d'électroporation ;
- des champs plus forts (40 kV/cm) pendant des durées plus courtes (dizaines ou centaines de nanosecondes), ce qui pourrait conduire à l'ouverture des canaux TRP comme conséquence indirecte du pulse, par libération d'ATP ; ce second mécanisme, réversible, demande des travaux de confirmation (IMT Saint-Etienne à Gardanne).

Le principe actif, électroporation ou stimulation des canaux membranaires, permet d'accélérer la pénétration des molécules chimiques dans les cellules (ex : bléomycine, médicament anticancéreux, ou électrophorèse d'ADN, Laboratoire de vectorologie et thérapeutiques anticancéreuses, Institut Gustave Roussy, Villejuif⁴⁷). Des travaux de vérification sont en cours (IMT Saint-Etienne, laboratoire de bioélectronique).

En radiothérapie dynamique, les cellules cancéreuses sont préalablement ciblées avec un pigment rouge, puis l'organe est chauffé aux infrarouges, ce qui détruit sélectivement les cellules cancéreuses, plus sensibles à la température d'environ un degré car teintées en rouge et plus riches en eau⁴⁸.

3.2.1.2 Hors oncologie, des pistes de développements à examiner pour d'autres pathologies

Des applications thérapeutiques en dehors du domaine de l'oncologie sont également développées⁴⁹.

- De nombreuses thérapies à base de RNI reposent sur les effets thermiques des ondes. L'interaction la plus immédiatement reconnue de la matière vivante avec des RNI est l'absorption d'énergie, qui se traduit par l'agitation des molécules polaires de l'eau et des tissus (effet Joule, application du four à micro-ondes). Comme protection, l'organisme dispose de mécanismes de régulation⁵⁰ pour compenser cette augmentation de température (thermorégulation). Si la température de l'organisme augmente trop néanmoins, des effets biologiques se produisent.

⁴⁵ « Tumor Treating Fields »

⁴⁶ Wikipedia

⁴⁷ <https://www.gustaveroussy.fr/fr/laboratoire-vectorologie-et-therapeutiques-anticancereuses>

⁴⁸ IMT

⁴⁹ Zimmerman et al. 2012

⁵⁰ *Effet des ondes millimétriques au niveau cellulaire*, Maxime Zhadobov, 2006, thèse Université Rennes 1 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00121677/document>

- Les champs électriques alternatifs peuvent être utilisés dans le traitement des fractures sans consolidation et de la spondylodèse (fusion des vertèbres) et auraient une efficacité comparable à une greffe osseuse dans ces traitements (ex : dispositifs proposés par l'entreprise Biomag). Les effets curatifs restent cependant controversés (cochrane.org).
- Les champs électromagnétiques peuvent également être utilisés dans le traitement de l'ostéoarthrose et de l'arthrite (usure des articulations) par de la magnétothérapie pulsée à basse fréquence (analgésique à 4-6Hz, traitement des lésions à 25-50Hz). L'avantage de cette technique réside dans ses effets anti-œdémateux, analgésiques, anti-inflammatoires et curatifs.
- Les RNI peuvent être utilisés dans le traitement de l'insomnie physiologique. En effet, des études montrent que ces derniers peuvent diminuer le temps d'endormissement et augmenter la durée du sommeil⁵¹, ce qui serait cohérent avec les effets mesurés sur la thermorégulation des rats. Selon une étude, une combinaison de 4 fréquences serait efficace en cas d'insomnie chronique sur l'allongement de la durée du sommeil et la diminution du temps d'endormissement⁵².

3.2.1.3 *Le potentiel médical des RNI intéresse l'industrie des dispositifs médicaux et les acteurs globaux comme Alphabet*

Les générateurs de champs électromagnétiques, aux puissances et fréquences concernées, sont aisément hébergés dans des dispositifs portables voire miniaturisés.

3.2.1.3.1 Dispositifs de contrôle de la douleur

Les RNI sont utilisés comme alternative non médicamenteuse au traitement de la douleur en exploitant la théorie dite du portillon⁵³ : le long des voies ascendantes de la douleur sont distribuées des « portes » pouvant se fermer pour rendre plus difficile le passage de l'influx nociceptif. L'utilisation de RNI permet de contrôler l'ouverture/fermeture de ces portes (inhibition des connexions nerveuses) et donc d'empêcher la transmission du message de douleur au cerveau. Ainsi, la *start-up* REMEDEE LABS propose une stimulation électronique de la production d'endorphines pour combattre la douleur (Service de Santé des Armées, grand public)⁵⁴.

Le marché pour ces produits se distribue entre des grands groupes de commercialisation de solutions médicales (ex : URGO, patchs à impulsions électriques) et des *start-ups* comme Livia⁵⁵, solution non-médicamenteuse pour le soulagement des règles douloureuses. Toutefois, considérant le fait que le marché est distribué entre ces catégories d'acteurs très hétérogènes et le caractère foisonnant des produits développés, il serait souhaitable de recenser les dispositifs médicaux utilisant les RNI à des fins thérapeutiques et d'établir une normalisation et régulation des recommandations d'utilisation établies de ces dispositifs.

⁵¹ Expérience sur patients, double aveugle, traitement par LEET (low energy emission therapy)

⁵² 2,7 Hz; 21,9Hz; 42,7 Hz; 48,9Hz (TBF)

⁵³ McGill University, Canada, http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d_03/d_03_cl/d_03_cl_dou/d_03_cl_dou.html

⁵⁴ [Grenoble, David Crouzier, https://www.inovallee.com/13999/](https://www.inovallee.com/13999/)

⁵⁵ Deux électrodes à placer sur la zone douloureuse (ventre, bas du dos) dont on peut régler l'intensité des pulsations pour un soulagement instantané de la douleur.

3.2.1.3.2 Dispositifs fréquentiels de diagnostic et thérapie

Wegamed est un fabricant allemand de machines de diagnostic et soin par spectrométrie RNI⁵⁶. Il s'agit d'un outil de diagnostic (porteuse 13Hz) et de thérapie (porteuse 10Hz ; allergies, problèmes circulatoires, soulagement de la fatigue et de la douleur) fondé sur les fréquences propres des organes, maladies et micro-organismes. D'autres entreprises existent en Allemagne dans ce secteur : Regumed, Rayonex, Med-tronik, BIT, Prognos...

Le fonctionnement exploite le principe fortement controversé de bio-impédance⁵⁷. Ces méthodes ont été utilisées dans un programme officiel⁵⁸, sont présentes dans les cabinets médicaux en Allemagne où certaines ont été labellisées par le TÜV⁵⁹. Elles s'y inscrivent dans une recherche de prévention des pathologies chroniques, qui sont en augmentation. Elles ne semblent pas reconnues par la Food and Drug Administration (FDA).

3.2.1.3.3 Alphabet : le prochain géant mondial de la santé ?

L'ampleur des plans d'investissement d'Alphabet⁶⁰ pourrait permettre à la holding de Google de définir le cadre de la santé de demain. Le groupe pharmaceutique britannique GlaxoSmithKline (GSK) a été en 2012 le premier à faire des traitements bioélectroniques son secteur d'investissements stratégiques à long terme. Il a créé en 2016 une coentreprise avec une filiale d'Alphabet en bioélectronique, Verily Life Sciences⁶¹, pour créer Galvani Bioelectronics, dotée de 540 M€ (soit 640 M€) sur 7 ans. Galvani Bioelectronics, détenue à 55% par GSK et 45% par Verily, se positionne dans la miniaturisation d'appareils électroniques et les logiciels pour traiter des maladies chroniques comme l'arthrose, le diabète et l'asthme grâce à des implants miniatures qui corrigent le signal électrique transmis le long des fibres nerveuses systématisant ainsi une approche alternative aux méthodes chimiques.

Ces thérapies étendent considérablement le « marché de la maladie ». Par ailleurs, les coûts de la R&D pharmaceutique⁶² ainsi que les limites des thérapies chimiques actuelles⁶³ sont des opportunités pour les grandes entreprises du numérique. Ainsi, les entreprises pharmaceutiques

⁵⁶ Voir également : https://en.wikipedia.org/wiki/Vega_machine ; www.psiram.com/fr/index.php/Vega_Test

⁵⁷ <https://www.wegamed.de>

⁵⁸ Programme Global GS1 One

⁵⁹ <https://www.wegamed.de/about-us/> : « *Our diagnostic devices for medical purposes, authorized for the German market (DIMDI) and many other countries, open up a whole new diagnostic dimension and go far beyond the possibilities offered by orthodox examination methods: Electrography and bioimpedance readings according to the Vegatest method give an indication of possible disorders, organ stress, chronic illness and focal inflammation points within the body – and do so quickly, effectively and reliably within only a few minutes. In this manner you can begin an intensive dialogue with the patient's organism – while your professional knowledge as a doctor or therapist is still demanded.* »

<https://www.wegamed.de/2018/08/16/27937-2/>

Norme ISO relative au système de management de la qualité des dispositifs médicaux, TÜV :

« *Wir freuen uns bekannt geben zu dürfen, dass wir, nach erfolgreicher TÜV-Zertifizierung, EN ISO 13485:2016 konform arbeiten. Diese Zertifizierung ist für alle Medizinprodukthersteller ab dem 31.03. 2019 Pflicht! Da wir schon jetzt diesen hohen Qualitätsstandard erfüllen steht für uns das nächste internationale Qualitätsziel „Medical Device Single Audit Program“ (MDSAP) an oberster Stelle.* »

⁶⁰ GSK (GlaxoSmithKline) joins Alphabet (Google's holding company) to develop "third way" of bioelectronic disease control - Financial Times 02/08/2016

⁶¹ ex-Google Life Sciences

⁶² processus très long, avec moins d'une molécule retenue sur 10 000 molécules testées en moyenne

⁶³ dont l'exemple le plus flagrant est l'antibio-résistance

devraient diversifier leur portefeuille de produits afin de garantir l'équilibre du système de régulation régissant le commerce des dispositifs médicaux et éviter que seuls les GAFKA détiennent et développent ces technologies.

Des essais sur les animaux ont été menés, ces derniers concluent que les implants miniaturisés électroniques peuvent avoir des effets bénéfiques sur les troubles inflammatoires, métaboliques et hormonaux. La stimulation du système nerveux périphérique pourrait même constituer un traitement efficace pour le cerveau en réduisant la surproduction de molécules inflammatoires qui sont impliquées dans certains troubles neurologiques.

La holding Alphabet dispose d'autres entreprises de « santé technologique » au travers de son fond de placement GV⁶⁴, de ses filiales dédiées à la santé comme Adimad, Verily ou Calico et de sa filiale d'innovations de rupture X (voir Annexe 4). Enfin, Alphabet devient un acteur majeur de la recherche théorique au travers de sa filiale Google X⁶⁵, menant des travaux non communiqués sur des innovations de rupture en lien avec la robotique et l'intelligence artificielle comme les voitures autonomes, objets connectés, ascenseur spatial ou robots.

Apple et Microsoft investissent de même massivement dans la santé du fait de la croissance exponentielle de ce marché⁶⁶.

La bioélectronique représente une nouvelle manière de traiter les maladies, à côté ou en complément des médicaments et des vaccins. Aujourd'hui, le secteur de la bioélectronique est occupé principalement par de petites entreprises qui investissent massivement dans la R&D et l'expertise technologique. Hormis GSK, la plupart des industries du médicament ne semblent cependant pas avoir intégré la bioélectronique dans leurs orientations stratégiques et poursuivent leur modèle fondé sur la production de médicaments chimiques et de dispositifs médicaux.

Ces technologies ne sont ni marginales ni théoriques : elles constituent une alternative crédible au moins partielle à certains traitements médicamenteux à l'avenir et certaines pourraient atteindre le marché d'ici 2026⁶⁷. C'est pourquoi la mobilisation des industries pharmaceutiques dans le domaine de la bioélectronique est fondamentale afin d'éviter l'émergence d'un système de santé dont les produits seraient développés essentiellement par des groupes numériques. En outre, les pouvoirs publics doivent là aussi pouvoir rassembler les compétences scientifiques et techniques nécessaires au contrôle de ce développement du point de vue de la santé et des finances publiques (sécurité sociale).

3.2.1.3.4 Le modèle d'affaires des RNI thérapeutiques interroge les pouvoirs publics sur l'évaluation du risque et l'orientation des travaux de recherche du secteur.

Du point de vue des Etats et des citoyens, ces innovations posent des questions réglementaires et d'orientation des savoirs, avec l'introduction sur le marché de dispositifs innovants développés hors du cadre de R&D conventionnel des laboratoires pharmaceutiques, par de (très) petites entreprises associées aux géants du numérique : quelles directions de recherche seront privilégiées, quelles responsabilités incombent à quels acteurs, dans un domaine où l'expertise médicale relève du groupe pharmaceutique et l'expertise technique du groupe numérique, quelles études d'impact sanitaire et économique possibles avant mise sur le marché pour ces types de dispositifs médicaux ?

⁶⁴ ex Google Ventures (GV) a été fondée en 2009

⁶⁵ [https://fr.wikipedia.org/wiki/X_\(entreprise\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/X_(entreprise))

⁶⁶ <https://hitinfrastructure.com/news/google-microsoft-apple-invest-in-health-network-infrastructure>

⁶⁷ cf <https://www.panmure.com/search/healthcare>

En effet, GV soutient financièrement considérablement les startups dont l'objet correspond à ses objectifs : la réduction de la douleur et l'accroissement de l'espérance de vie. Comme 90% des *start-ups* ne passent pas le stade de la « vallée de la mort », elles sont fortement incitées à travailler dans ces directions, orientant ainsi la recherche mondiale.

Par ailleurs, le modèle de croissance des startups est peu compatible avec la mise en place d'un processus d'évaluation des risques issus de l'utilisation sur le long terme du dispositif développé. Ainsi, les risques associés à des technologies recourant aux RNI ne peuvent pas être identifiés, ni les études épidémiologiques et d'impact menées suffisamment tôt. Or, les lacunes sur certains produits de santé ont été récemment fortement médiatisées. Enfin, le modèle *start-up* nécessite de se focaliser sur un produit du point de vue technique et financier, et par conséquent accentue la parcellisation des savoirs en négligeant les autres dimensions (sociologiques, éthiques, économiques, sanitaires le cas échéant).

Pour le labiotech.eu (principal média numérique couvrant l'industrie biotechnologique européenne), les technologies portables utilisées à des fins médicales font l'objet de développements continus et pourraient finir par s'imposer sur le marché des dispositifs médicaux. Les situations peuvent donc évoluer rapidement produit par produit. D'où l'intérêt d'investir dans la connaissance fondamentale des principes actifs de ces méthodes dans les organismes de recherches publics, et d'entretenir au sein des pouvoirs publics un large spectre d'approches avec les compétences techniques afférentes.

3.2.2 Le contrôle des procédés et des lieux de travail industriels

3.2.2.1 Les RNI et le contrôle non destructif : un outil d'amélioration de la qualité par détection de 100% des défauts sur les lignes de production

Les RNI trouvent depuis longtemps une application industrielle dans la réalisation pratique du contrôle non-destructif (CND) au sein des lignes de production par spectrométrie UV ou IR, et techniques dérivées de la santé (radio, échographie...). L'intérêt réside dans la possibilité de contrôler l'intégralité des pièces produites ainsi qu'une meilleure traçabilité des contrôles effectués par stockage des images obtenues⁶⁸.

Les RNI ont ainsi permis une amélioration de la qualité et de l'efficacité du CND. En dehors de l'examen visuel, tout CND repose sur une source d'excitation (IR, Ultrasons, RX, liquide fluorescent...) révélant un défaut ou une discontinuité de surface⁶⁹. Les techniques de CND avancées suppriment le contact entre la source d'excitation et la surface à contrôler, ce qui permet de ne pas arrêter la production. En outre, les RNI suppriment les risques liés à l'utilisation alternative des rayons X.

Le CETIM étudie trois technologies de CND avancé : la thermographie infrarouge active (en phase d'industrialisation), la tomographie à rayons X (reconstruction d'images en coupe) pour la détection de discontinuités, porosités et fissures, ainsi que les ultrasons sans contact (phase d'étude de faisabilité).

⁶⁸ Exemple : entreprise *NTN Transmissions*, Crézancy (Aisne), qui fabrique des pièces pour l'industrie automobile et qui, avant l'introduction de cette technique, faisait vérifier ses pièces une à une par un opérateur

⁶⁹ Comme la vérification de l'absence de replis, défauts provenant du fluage du métal lors du forgeage à 950°C

3.2.2.2 Les RNI pour le contrôle de l'environnement du lieu de travail : une application renforçant la sécurité au travail eu égard à son exposition aux nanomatériaux via les champs électromagnétiques

Nanodetector développe une application commerciale innovante des RNI consistant à détecter en temps réel des concentrations très faibles de nanoparticules (moins de 1000 nanoparticules par microlitre) présentes dans l'environnement (air, eau), dans divers liquides (jus de fruits, vin) ou dans d'autres milieux complexes⁷⁰. La technologie est fondée sur la résonance plasmonique de surface (RPS), qui est extrêmement sensible et permet la détection d'objets de taille inférieure à la longueur d'onde du rayonnement utilisé.

3.2.3 Les nouvelles applications des RNI en chimie

Les RNI sont utilisés⁷¹ comme agents accélérateurs de réticulation, comme agents chauffants (IR) et comme facilitateurs de réactions chimiques en assistant ces dernières par micro-ondes ou plasmas froids (ou ultrasons). Le niveau de développement est considéré comme TRL 2-3. L'accès à ces RNI devient de plus en plus industrialisable en processus continu, et porte de nombreux projets, notamment la fabrication de pièces de grande taille (traitements de surface). Les travaux de sécurité sanitaire portent sur des blindages électromagnétiques.

L'utilisation de champs électromagnétiques millimétriques (ex : 2,45GHz entre 0,6 et 6kW) en chimie se développe rapidement, du fait de sa capacité à faciliter la synthèse de composés organiques (hétérocycles...), polymères, matériaux inorganiques, nanomatériaux et nanocatalyseurs en trois dimensions (oxydes métalliques 3D en milieu aqueux...), mono- et multifonctionnels. Les réactions rapides et en masse observées permettent entre autres de fabriquer des composés dotés d'un cœur et d'une coquille, capables de favoriser des réactions complexes et rapides à pressions et températures faciles à atteindre, avec des rendements très améliorés (beaucoup moins de co-produits). Cette efficacité est liée à l'association d'effets thermiques (chauffe rapide, locale et intense) et non-thermiques (absorption sélective par des molécules polaires) des ondes millimétriques dans ces réactions⁷².

L'extraction par RNI n'aurait, elle, de sens économique que pour des molécules à haute valeur ajoutée (enzymes, vaccins, arômes).

En photo-électrochimie, la lumière visible est utilisée dans la conversion de l'énergie solaire pour rendre réactif le CO₂ (travaux de Solvay avec le Collège de France). Les rendements obtenus aujourd'hui étant trop bas (Japon, Suisse), des ruptures sont nécessaires.

Pour le stockage d'énergie solaire thermique, des travaux portent sur des changements de phase de matériaux passant du liquide au solide (Espagne). Là encore, des ruptures techniques sont nécessaires, et les industriels soulignent la nécessité d'avoir des chercheurs qui « osent sortir des sentiers battus »⁷³, ce qui suppose que la structure de leur parcours et des critères sur lesquels ils sont jugés les y poussent.

⁷⁰ Service communautaire d'info sur la recherche et le développement (CORDIS)

⁷¹ Source : Solvay

⁷² *Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave Effects*, Antonio de la Hoz,* Angel Diaz-Ortiz and Andre's Moreno, 12th January 2005, DOI: 10.1039/b411438h

⁷³ Source : Solvay

3.3 De nouvelles applications des ondes acoustiques se développent

3.3.1 Des ruptures possibles pour l'industrie, notamment en chimie et santé

3.3.1.1 Pour la chimie

TRL 2-3, exploration : ces usages sont considérés comme importants pour les procédés chimiques à horizon 10-20 ans.

- Pour l'atténuation phonique, la chimie fabrique des matériaux fonctionnels atténuateurs, de faible épaisseur, pour le bâtiment.
- Les ondes acoustiques, en apportant de l'énergie, permettent d'accélérer des réactions chimiques. Si les ultrasons entre 20 et 200MHz sont utilisés en diagnostic médical, ceux situés entre 20kHz et 20MHz sont utilisés pour apporter de l'énergie à des réactions chimiques (sonochimie), et permettent des progrès considérables dans l'efficacité de ces réactions. Par le phénomène de cavitation (création de bulles qui explosent), ils peuvent provoquer une chaleur locale intense (5000K), un choc de pression (jusque 1000bar) et des micro-jets de l'ordre de 100m/s. Dans l'eau, les basses fréquences (20-80kHz) génèrent des phénomènes physiques, les fréquences plus élevées (80-2000kHz) des réactions chimiques (radicaux HO[•]), ce qui permet d'accroître les cinétiques, de modifier le cours d'une réaction ou de créer des changements de phase.
- En nanochimie, les ultrasons permettent de préparer des nanocatalyseurs et de diriger des réactions organiques en leur présence, par exemple pour produire de l'hydrogène à partir de méthane (bimétalliques Ni-Co/Al₂O₃-MgO et Ni-Co/Al₂O₃-ZrO₂). Les réactions ainsi obtenues sont très courtes (10 à 30 mn) et consomment peu d'énergie. Elles bénéficient de meilleurs rendements, de meilleures sélectivités, et permettent d'utiliser de l'eau comme solvant, ce qui les rend d'autant plus intéressants pour réduire la pollution liée à la fabrication, l'utilisation et le recyclage des solvants habituels⁷⁴. Leur utilisation est donc en pleine expansion.

L'Argonne National Laboratory travaille sur la lévitation acoustique⁷⁵ de petits objets (2012). Deux haut-parleurs émettent en regard l'un de l'autre à une fréquence de 22kHz. Quand les deux haut-parleurs sont précisément alignés, les ondes sonores donnent naissance à une onde stationnaire. Aux nœuds d'interférences de cette onde stationnaire, la pression acoustique est suffisante pour annuler les effets de la gravité. Ainsi, les petits objets (suffisamment légers, comme des principes actifs pharmaceutiques) placés au niveau de ces nœuds sont alors en lévitation, ce qui permet de réaliser des réactions sans la pollution associée à un contenant matériel. De nombreuses utilisations industrielles peuvent être faites de cette propriété, en particulier l'amélioration du processus de développement de médicaments, peut-être plus efficaces avec moins d'effets secondaires.

⁷⁴ G. Chatel, *How Sonochemistry Contributes to Green Chemistry ?*, Ultrasonics Sonochemistry (2017), doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.029>

⁷⁵ <http://www.anl.gov/articles/no-magic-show-real-world-levitation-inspire-better-pharmaceuticals>

3.3.1.2 Pour la santé

En matière de diagnostic, la société Medielma (Milan) a mis au point un système d'imagerie électromagnétique, qui diagnostique les cancers de la prostate de manière extracorporelle, le patient étant simplement allongé sur un canapé pendant l'examen.

Une technologie prometteuse est l'imagerie acoustique électromagnétique (EMAI), qui utilise les ondes électromagnétiques pour induire l'émission d'ultrasons. L'intensité du signal et le contraste de l'image dépendent de la conductivité électrique du milieu et de ses propriétés acoustiques. Cette technologie permet d'améliorer les performances en diagnostic des ultrasons médicaux dans le cancer et les applications cardiovasculaires en raison des modifications connues de la conductivité des tumeurs malignes et des cavités remplies de sang.

Cette technologie pourrait déboucher sur la mise au point d'appareils à ultrasons portables qui fourniraient des images proches de la qualité de l'IRM (détection de tumeurs de 2 mm), pour un coût bien moins important.

En matière de chirurgie ont été développés des outils de microchirurgie, qui permettraient la réparation d'anévrismes cérébraux, l'anastomose de vaisseaux sanguins ou de nerfs, la résection d'une tumeur cérébrale et l'élimination du neurinome acoustique. Ils sont conçus pour être sélectifs en fonction de la nature du tissu, en ciblant par exemple un tissu cancéreux, vasculaire ou nerveux.

Ces dispositifs utilisent des rayonnements ionisants, des micro-ondes ou des ondes acoustiques et mettent en œuvre diverses technologies d'imagerie, comme la spectroscopie, l'IRM, et l'échographie.

Ainsi, la Focused Ultrasound Foundation⁷⁶⁷⁷ a récemment financé un travail conjoint de l'INSERM (INSERM, ESPCI, CNRS, PSL) et de l'Université d'Oxford sur l'impact d'ultrasons focalisés sur la mémoire de singes macaques⁷⁸.

La société BioLuminate (San José) a développé en collaboration avec les laboratoires Livermore une sonde intelligente qui, guidée vers la région où se trouve la tumeur, permet de la visualiser en temps réel, en mesurant la différence ses propriétés optiques, électriques et chimiques par rapport au tissu sain.

Les laboratoires Sandia ont mis au point un laser à microcavité qui, couplé à un système d'imagerie par balayage à base de spectroscopie par réflectance, permet d'identifier et de cibler sélectivement les excroissances malignes tout en minimisant la quantité de tissu sain prélevée. Le même dispositif peut être utilisé pour identifier des lésions vasculaires en vue d'un traitement thermique avec un faisceau laser focalisé.

Autre exemple, Allyane propose l'utilisation d'infrasons (150-400Hz) en kinésithérapie pour améliorer ou accélérer la récupération d'une motricité⁷⁹.

⁷⁶ <https://www.fusfoundation.org/the-foundation/partner-organizations> : notamment BIRD foundation, Cancer research institute...

⁷⁷ <https://www.fusfoundation.org/the-technology/mechanisms-of-action>

⁷⁸ <https://www.fusfoundation.org/news-all>

⁷⁹ <https://allyane.com/troubles-moteurs/>

3.3.1.3 Autres domaines industriels et militaires : du gadget à l'équipement professionnel et aux armements

L'ostéophonie, ou conduction osseuse, permet d'entendre un son grâce à la vibration des os du crâne. Les ondes sonores stimulent alors directement l'oreille interne (l'oreille externe et l'oreille moyenne se trouvant alors « court-circuitées »).

L'ostéophonie permet l'ouverture de nombreux marchés. De manière générale, on distingue trois typologies différentes de produits exploitant le principe de la conduction osseuse : les produits ordinaires (casques, écouteurs, kits mains libres), les appareils d'aide auditive et les produits de communication spécialisés destinés à une utilisation sous-marine ou en environnement bruyant par exemple.

Des applications commerciales sont aujourd'hui sur le marché. A titre d'exemple amusant, le *FootballPen*, développé par l'entreprise allemande éponyme, est connecté en Bluetooth à une application retransmettant des chaînes radio (pendant le Mondial de football), l'utilisateur peut écouter les radios par conduction osseuse en mordant l'extrémité du stylo. Il est alors seul à entendre. Cet exemple montre le potentiel d'ouverture de nouveaux marchés d'une telle technologie, en dehors de cet exemple gadget.

Le domaine militaire exploite cette propriété physique dans l'équipement du soldat à liaisons intégrées, qui inclut des dispositifs fonctionnant par ostéophonie comme le bandeau de communication (indépendant du casque). Ce dispositif peut être utilisé comme écouteur (fonction réceptrice du signal) et comme microphone (fonction émettrice du signal) permettant ainsi au soldat de communiquer lors d'opérations sur le terrain.

En outre, ondes acoustiques et magnétiques sont utilisées comme instruments de dispersion des manifestations. Ainsi le bouclier anti-émeute breveté en 2011 par Raytheon (US 0235467A1, 29 septembre 2011) utilise des basses fréquences sonores pulsées (5 à 500 Hz, entre 3 et 400 ms) utilisables à plus de 100 mètres, qui provoquent à 30 mètres la rupture des tympanes avec 185 dB, l'endommagement des poumons entre 194 et 205 dB selon la durée de l'émission. (<https://publicintelligence.net/raytheon-non-lethal-acoustic-pressure-riot-shield-patent/>). Le brevet précise : [0036] : « A repetition rate of 5ms produce a center frequency positioned to couple to the resonance mode of the human target (typically 200 Hz) ». [0042] : « resonance has been observed from 5Hz up to approximately 500 Hz » ; [0043] : 172 dB « discomfort » ; 176 dB « stun/disoriented » ; 182 : « incapacitate » : « the acoustic pulses couple to human pulmonary system ». Un canon acoustique (SHOPHAR) utilise des basses fréquences sonores comprises entre 1,2 et 3 kHz, modulables en fréquence et intensité, avec une puissance de 128dB à 50m.

Les infrasons sont peu travaillés en tant qu'armes notamment parce que les faisceaux se dispersent trop, donc restent difficiles à contrôler, et il existe le risque que l'utilisateur soit atteint.

Le programme 2017 AMBIENT (Atomic Magnetometer for Biological Imaging in Earth's Native Terrain)⁸⁰ de la DARPA vise à utiliser les champs très faibles (10pT à 10fT) émis par l'activité cérébrale pour poser des diagnostics de terrain à distance, commander une interface cerveau-machine, des prothèses et des équipements extérieurs au corps, en masquant le champ terrestre

⁸⁰ <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4332848/DARPA-reveals-animal-magnetism-breakthrough.html>

(50 μ T). Il pourrait s'agir de mesures laser des changements dus au champ faible dans des molécules de gaz.

En utilisant l'interaction entre un femtolaser et un nanolaser⁸¹, la DARPA travaille aussi à produire des voix humaines artificielles audibles seulement à des distances de plusieurs kilomètres (jusqu'à 30 kilomètres), comme outils de communication, mais aussi arme de combat ou arme psychologique^{82,83}. Les équipements utilisables ont été annoncés pour 2021-2022.

3.3.2 Des ruptures possibles pour l'agriculture et la bioproduction

3.3.2.1 Transmission et utilisation d'informations acoustiques par les organismes

Une exposition à des sons de 1000 Hz et à 100 dB joue positivement sur la croissance, la résistance aux ravageurs et à la sécheresse, la division cellulaire, ainsi que la communication entre les plantes, avec des processus cellulaires observés et mesurés⁸⁴. Les économies d'intrants (engrais et pesticides) rapportées vont de 25 à 50%. Des puissances plus importantes jouent négativement sur ces mêmes processus. (Cf. chapitre 4)

Le principe actif est constitué par les tensions membranaires induites par l'onde acoustique, qui stimulent les canaux calciques, puis la production de kinase et d'ATP, et la production de protéines⁸⁵.

Un brevet⁸⁶ très large, déposé en 2011, couvre tous les dispositifs utilisant des phénomènes cellulaires induits par une tension mécanique de la membrane, quelle que soit la cause de cette dernière (champs magnétiques, acoustiques, pression de liquide, pression mécanique...). Il recouvre donc potentiellement tous les bioréacteurs de synthèse stimulés par champs magnétiques ou acoustiques, toutes les réactions chimiques catalysées par champs magnétiques ou acoustiques, les réacteurs à micro-algues stimulées par le vortex du liquide etc. Ce brevet pourrait donc handicaper l'innovation.

3.3.2.2 Utilisation de séquences acoustiques spécifiques

L'exposition de cultures à des séquences acoustiques caractéristiques semble activer la production et les fonctions de certaines protéines⁸⁷. Les brevets correspondants sont français, le dispositif a été testé récemment par l'université de Cergy-Pontoise. L'entreprise Genodics travaille depuis 10 ans pour des agriculteurs dans l'ensemble de la France (maraîchage et vigne essentiellement) en améliorant le rendement et la résistance à des maladies virales, bactériennes et cryptogamiques et à la sécheresse des végétaux par la diffusion quelques minutes par jour de telles séquences à basse puissance (65 à 80dB), avec des résultats concrets (ex : entre 50 et 70% de réduction de la mortalité due à l'esca de la vigne rapporté en France sur plus d'une centaine de vignobles).

⁸¹ Le premier produit un plasma que le second module, les deux premières fréquences sont inaudibles mais leur différence peut être audible.

⁸² <https://www.ultra-hyperspike.com/>; « Sonic Projector »

⁸³ <https://idstch.com/home5/international-defence-security-and-technology/technology/biosciences/psychological-warfare-becoming-sophisticated-development-new-tools-technologies/>; <https://www.defenseone.com/technology/2018/03/us-military-making-lasers-create-voices-out-thin-air/146824/>

⁸⁴ Ratnesh Chandra Mishra, Ritesh Ghosh and Hanhong Bae, *Plant acoustics: in the search of a sound mechanism for sound signaling in plants*, Journal of Experimental Botany, Vol. 67, No. 15 pp. 4483–4494, 2016 doi:10.1093/jxb/erw235

⁸⁵ idem

⁸⁶ « *Enhancement of cellular production through mechanotransduction* », Abbott laboratories, Worcester, USA : US 2011/0117603 A1, 19 mai 2011 ; WO2 011008959A1, <https://patents.google.com/patent/WO2011008959A1/es>

⁸⁷ laboratoire ERRMEce (Université Cergy-Pontoise)

Malgré la spécificité démontrée des séquences de sons utilisées par rapport aux protéines concernées, le principe actif qui explique ces observations n'est pas encore élucidé.

3.3.2.3 Examiner le lien avec la biologie quantique : enzymatique et photosynthèse

La compréhension de certains mécanismes biologiques ferait appel aux lois de la physique quantique : la photosynthèse^{88 89}, la catalyse enzymatique, l'olfaction⁹⁰ et l'orientation des oiseaux migrants.

L'Allemagne est particulièrement présente dans ce domaine en Europe, et dans une moindre mesure les Pays-Bas, le Royaume-Uni, la Slovaquie. En outre, pour dynamiser le développement conjoint des connaissances et de son marché équipementier national et international, le matériel de mesure et d'expérimentation utilisé dans les laboratoires est aussi fabriqué en Allemagne, grâce aux soutiens et appels d'offres publics.

Au plan international, les équipes reconnues se trouveraient surtout aux Etats-Unis, en Israël, au Japon, en Chine, et peut-être en Russie. La France héberge une seule équipe de biologie quantique (CEA⁹¹) qui, sur des crédits européens exceptionnels (bourse ERC de plusieurs millions d'euros), a pu s'équiper en matériel de mesure performant : spectroscopie Raman et IR. D'autres équipements requis par cette discipline se trouvent à quelques exemplaires dans le monde, comme la spectroscopie électronique bidimensionnelle (une en IR à Polytechnique, 5 dans le monde en lumière visible). Selon le CEA, il n'existerait que trois bancs de mesure de quantité accessibles aux chercheurs dans le monde occidental : Pays-Bas (Amsterdam), Lituanie, Etats-Unis.

Dans ces domaines novateurs, on observe un manque fréquent d'interdisciplinarité (ce qui influence les questions posées, la conception d'hypothèses, la conception de matériel et de débouchés...) et de capacité à explorer les domaines considérés comme périphériques ou risqués. Outre un aspect culturel souvent souligné (cloisonnement, focalisation conservatrice), d'un point de vue pratique, lorsque les dispositifs de financement de la recherche jugent les projets entre autres sur la probabilité de trouver un résultat positif (matériel cher, financement par projets, « *publish or perish* », retour à assez court terme sur les fonds publics, intérêts immédiats des entreprises...), ils handicapent les programmes longs et risqués qui forment souvent le terreau des vraies ruptures⁹².

Pour mettre à niveau la France dans ce domaine clef à l'interface de la physique et de la biologie, il serait fructueux, à l'instar de nos voisins, de dédier des crédits de recherche exploratoire à cette interface à l'intérieur des instituts de recherche. Un panel spécifique de l'ANR semble en constitution sur le sujet (AVIESAN via l'Institut Thématique Multi-Organismes « Bases moléculaires et structurales

⁸⁸ European Science Foundation, rapport FARQBIO, 2015

⁸⁹ JC. Brookes (2017) Quantum effects in biology : golden rule in enzymes, olfaction, photosynthesis and magnetodetection, Proc.R.Soc. A473 : 20160822

⁹⁰ DARPA 2010- programme *Quantum effects in Biological Environments* (QuBE) : « *Odor recognition is postulated to utilize phonon assisted tunneling in the receptor protein binding site :*

- *molecules with the same shape but different vibrations have different odors*
- *differently shaped molecules have same odor »*

⁹¹ Source : CEA

⁹² Il a été rapporté à la mission que des établissements de recherche américains renommés (MIT, Harvard) participaient à la remise en cause aux Etats-Unis de la focalisation sur le nombre de publications, du fait de sa propension à favoriser les recherches incrémentales, donnant des résultats peu risqués et de court terme.

du vivant »⁹³). Ce panel pourrait prendre comme exemple les rayonnements non ionisants et les ondes acoustiques.

Concernant plus généralement les champs électromagnétiques et acoustiques, il est nécessaire, à l'instar de l'Allemagne et des Pays-Bas, d'instaurer en France des soutiens spécifiques pour construire des consortia biologie-physique – ENS, Orsay ...

4 LES IMPACTS DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES ET ACOUSTIQUES SUR LE VIVANT

4.1 *La mesure des effets des champs électromagnétiques et acoustiques sur le vivant*

4.1.1 Cas des RNI : des équipements sophistiqués et une approche transdisciplinaire permettent depuis peu de surmonter la complexité physique des champs

Les travaux sur les impacts des RNI ont été nombreux dans le spectre des radiofréquences de téléphonie depuis les années 2000. Les effets biologiques classiquement mesurés sont l'échauffement des tissus à moyenne et haute fréquence et la stimulation des tissus excitables à moyenne et basse fréquence. La Société française de radioprotection a publié un état détaillé des connaissances acquises concernant les effets sanitaires et environnementaux des champs électromagnétiques⁹⁴. Ce rapport et ce chapitre se concentrent donc sur **les effets biologiques non-thermiques plus récemment identifiés**, dont certains font déjà l'objet d'applications notamment médicales (diagnostic et traitement).

Les effets sanitaires des radiofréquences sont difficiles à caractériser, pour des raisons à la fois intrinsèques (phénomènes dépendants de la taille, de la masse, de la partie du corps, champs électromagnétiques hétérogènes en forme et intensité...) et extrinsèques (pas de population témoin exempte, nombreux facteurs d'exposition simultanés, obsolescence rapide des matériels dont les spécifications ont souvent changé depuis l'arrivée des techniques numériques, historique inconnu de l'exposition à d'autres polluants des personnes testées...). Les résultats de ces études sont donc souvent non reproductibles et les séries épidémiologiques sans recul suffisant.

Cependant, les chercheurs soulignent que si les méthodologies progressent et doivent encore progresser en rigueur, la non-reproductibilité d'un résultat concernant un impact sanitaire ne vaut pas preuve d'absence d'effet. En effet, des effets biologiques à l'échelle cellulaire ou d'un organisme sont couramment mesurés et non controversés (effets sur des récepteurs membranaires notamment, parfois sur des comportements). En outre, si l'impact sanitaire direct d'un champ électromagnétique sur un organisme a été rarement prouvé à l'échelle macroscopique (cas de la perte d'orientation chez certains animaux : oiseaux, abeilles⁹⁵), les résultats semblent plus clairs lorsqu'on associe à l'imposition d'un champ électromagnétique la mesure de la réaction de

⁹³ SNR-propositions-BMSV_Mai2013.pdf : le programme évoque la recherche de nouvelles fonctionnalités et le développement de la biologie synthétique, mais pas du tout les ondes électromagnétiques ni acoustiques.

⁹⁴ *Champs électromagnétiques, environnement et santé*, sous la direction d'Anne Perrin et Martine Souques, 2011, ed. Springer

⁹⁵ « The orientation of migratory birds is disrupted when very weak high-frequency fields (broad-band field of 0.1–10 MHz of 85 nT or a 1.315 MHz field of 480 nT", (Balmori 2015).

l'organisme à un autre paramètre environnemental tel qu'une température extérieure⁹⁶ ou une concentration en polluants⁹⁷, cf. infra.

Les processus concernés sont souvent subtils et en cascade ; leur appréhension, tant pour les utilisations que pour les impacts, bénéficie des progrès de l'épigénétique, de la compréhension des processus membranaires et cytoplasmiques. Il serait intéressant d'investiguer l'interface avec la biologie quantique⁹⁸. Ce dernier secteur est en plein développement et la France compte parmi les meilleures équipes mondiales en bioélectronique.

Pour ce qui concerne la biologie quantique, la bibliographie montre que les Français y sont beaucoup moins impliqués que l'Allemagne, la Grande-Bretagne, la Suède, la Slovénie, les Etats-Unis, la Chine, la Corée du sud ou la Russie.

Ces expérimentations exigent des protocoles rigoureux, un matériel particulier (parfois coûteux) et une approche systématiquement pluridisciplinaire, encore trop rare dans les institutions de recherche et toujours trop peu admise dans les procédures de financement et de reconnaissance académique. Il est d'autant plus important de réaliser au niveau international une coordination de la recherche pluridisciplinaire sur tout le spectre des RNI et les processus cellulaires et physiologiques possiblement concernés.

4.1.2 Cas des ondes acoustiques : une configuration assez similaire, mais encore plus tardive

Compte tenu de l'explosion de travaux scientifiques internationaux depuis huit à dix ans, la mission a étendu ses investigations aux ondes acoustiques et leurs nouveaux champs d'utilisation ; les deux types d'ondes (électromagnétique et acoustique) pourraient interférer dans le cadre de certains processus du vivant et certaines réactions chimiques.

Les difficultés expérimentales y sont similaires, avec un obstacle complémentaire tenant au fait que le son est moins bien appréhendé que la lumière et les radiofréquences en termes de métrologie. Ces lacunes proviennent d'abord d'un manque d'intérêt pour le sujet, puis de ce que se sont superposées plusieurs échelles de quantification (de A à G) liées à l'historique de la normalisation (chapitre 3 b i), avec le développement des procédés et moteurs utilisant ou émettant des ultrasons puis des infrasons. En outre, le son se propage sur de grandes distances et est peu directionnel. Enfin, sa perception est relative et non absolue.

Néanmoins, les publications internationales sur le sujet se sont multipliées depuis dix ans, dans une perspective majoritairement agronomique. Là encore, la pluridisciplinarité s'avère déterminante, et la France est peu présente institutionnellement au regard des travaux publiés dans divers autres pays.

⁹⁶ Travaux de JP Libert, A. Pelletier et al. (cahiers de recherche 2017 ANSES). L'Université de Picardie bénéficie d'un équipement unique au monde permettant de contrôler plusieurs paramètres environnementaux simultanément. Voir plus loin

⁹⁷ Hardell L. et al., Increased concentrations of certain POPs in subjects with self-reported electromagnetic hypersensitivity – A pilot study, *Electromagnetic Biology and Medicine*, 27: 197–203, 2008. Un éventuel effet croisé de la résonance aux ondes millimétriques et des polluants pourrait être testé sur des insectes.

⁹⁸ JC. Brookes (2017) Quantum effects in biology : golden rule in enzymes, olfaction, photosynthesis and magnetodetection, *Proc.R.Soc. A473* : 20160822

4.2 Impacts macroscopiques : Organismes animaux et végétaux

La littérature scientifique concernant les effets des ondes électromagnétiques sur le vivant est abondante. Nous présentons ci-dessous quelques résultats récents peu ou non controversés qui nous paraissent structurants.

4.2.1 RNI - Rats et souris : des effets sur les comportements et le métabolisme basal

4.2.1.1 Effets sur la thermorégulation

La thermorégulation est fondamentale pour les organismes homéothermes comme les mammifères ou les oiseaux. Elle a des conséquences notamment sur la croissance, l'alimentation, le sommeil etc. Grâce à un équipement expérimental unique au monde et à une collaboration transdisciplinaire qui a permis de poser les questions de façon différente⁹⁹, le laboratoire de l'Université Jules Verne de Picardie a pu tester l'effet de radiofréquences de téléphonie (900MHz), en mesurant et pilotant rigoureusement plusieurs paramètres, dont la température extérieure où évoluaient les rats. Les résultats sont les suivants :

- la certitude de la perception des radiofréquences par les rats¹⁰⁰ ;
- à 900MHz et 1V/m, le constat d'effets sur le sommeil et le métabolisme énergétique de base¹⁰¹, induisant l'évitement nocturne par les rats des zones exposées aux radiofréquences, un accroissement du nourrissage et la recherche de zones plus chaudes¹⁰², une fragmentation du sommeil paradoxal et une prise de poids¹⁰³. Ces comportements sont la réponse à une sensation de froid, c'est-à-dire une perte de thermorégulation.

4.2.1.2 Effets sur le système immunitaire¹⁰⁴

- Un rat adolescent qui a été exposé aux radiofréquences pendant la gestation réduit son activité exploratoire ; le seuil de nociception (sensation douloureuse due à une surpression sanguine provoquée par l'échauffement) est modifié ; il n'est pas constaté de plus grande vulnérabilité cérébrale aux radiofréquences chez les rats en état inflammatoire (chimie, pharmacie)¹⁰⁵.

⁹⁹ Seul laboratoire au niveau international à avoir fédéré des spécialistes de la thermorégulation et de la régulation du bilan thermique avec des spécialistes des radiofréquences. Il est en effet très difficile de contrôler correctement les contraintes thermiques et les expositions aux RF car cela nécessite des connaissances de physique dans ces deux domaines surtout en analysant les co-expositions. (Université de Picardie)

¹⁰⁰ J.P. Libert et al.

¹⁰¹ JS'12, Cnam Paris, 3-4 Avril 2012 Effets sur les flux d'énergie impliqués dans l'homéostasie lors d'une exposition chronique à un champ radiofréquence chez le rat juvénile, *Amandine Pelletier**, *René de Seze***, *Stéphane Delanaud**, *Gyorgy Thuroczy***, *Véronique Bach**, *Jean-Pierre Libert**, *Nathalie Loos** : augmentation de la fréquence des épisodes de sommeil paradoxal à 24°C et 31°C. Les autres effets sur le sommeil dépendent de l'environnement thermique. A 31°C, la température caudale des animaux exposés est moindre que celle des contrôles suggérant une vasoconstriction exacerbée. De plus, la prise alimentaire est plus élevée chez les animaux exposés. La plupart des effets de l'exposition chronique aux radiofréquences sur le sommeil dépendent de l'environnement thermique et les animaux exposés semblent mettre en place des processus d'économie d'énergie.

¹⁰² A. Pelletier et al. (2014) Does exposure to a radiofrequency electromagnetic field modify thermal preference in juvenile rats ? PLOS One June 2014 :9:6 e99007

¹⁰³ INERIS, Les cahiers de la recherche Santé Environnement Travail mai 2017 p36

¹⁰⁴ Olle Johansson, Disturbance of the immune system by electromagnetic fields, Pathophysiology 16(2009) 157-177

¹⁰⁵ Anne-Sophie Villégier, Effets des champs électromagnétiques GSM sur des modèles de vulnérabilité cérébrale : inflammation et gestation, ANSES, cahiers de la recherche mai 2017 p34

- L'exposition aux radiofréquences (1800MHz, 2,9W/kg) réduit l'expression de gènes codant pour des médiateurs pro-inflammatoires dans le cortex dorso-médian des rats, avec modification de la phosphorylation des récepteurs glutaminergiques et de la morphologie des cellules microgliales (adaptation fonctionnelle et remodelage des réseaux neuronaux au cours de la maturation cérébrale, production de médiateurs de contrôle neuro-inflammatoire). L'hypothèse d'un niveau de risque différent chez l'enfant ou l'adolescent ne peut être écartée. Les effets neuronaux (prolongements de la microglie accrue) n'apparaissent pas en l'absence d'inflammation préalable du système nerveux central, et disparaissent 72h après exposition¹⁰⁶.

Il serait possible que l'exposition simultanée au bruit puisse accentuer cet effet ; les expérimentations restent néanmoins à faire¹⁰⁷.

4.2.1.3 Effet sur la perméabilité membranaire

A 900MHz, 0,1-0,4W/kg, en ondes pulsées, la barrière hémato-encéphalique pourrait être rendue perméable chez le rat ¹⁰⁸ (ce qui peut être utilisé à des fins thérapeutiques, en oncologie, cf. chapitre 3). La non-reproductibilité du résultat par la même équipe ainsi que l'examen d'autres études ont néanmoins conduit à conclure à l'absence d'effet direct in vivo à des niveaux environnementaux d'exposition (ANSES 2013)¹⁰⁹, y compris chez les enfants (ANSES 2016 p123). L'ANSES souligne l'intérêt d'étudier d'éventuelles synergies entre les radiofréquences et d'autres facteurs altérant la BHE (ANSES 2013 p156).

4.2.2 RNI- Rats et souris : une étude importante montre une cancérogénicité possible

Le National Toxicology Program¹¹⁰ montre l'induction du Schwannome malin (cancer de la myéline des fibres nerveuses) du cœur ainsi que du gliome du cerveau et d'un cancer des surrénales chez le rat¹¹¹ par une exposition aux radiofréquences (900MHz à 1,5 3 ou 6W/kg) 9h/jour toutes les 10 minutes pendant 2 ans, en commençant in utero (180 rats).

D'autres études établissent un lien entre exposition à des radiofréquences et cancers induits ; elles ont en général été critiquées d'un point de vue méthodologique (cf. 4.1.1 ci-dessus).

4.2.3 RNI – Plantes : des effets mesurés liés à la croissance et d'autres processus physiologiques

Les plantes réagissent aux champs électromagnétiques de faible puissance (ex : les 300MHz à 3GHz, qui ne se trouvent pas dans la nature) en modifiant leurs processus physiologiques : respiration,

¹⁰⁶ Effet des ondes GSM 1800Mhz sur les cellules microgliales et la neurotransmission dans un contexte neuroinflammatoire ; Michel Mallat, ANSES, cahiers de la recherche mai 2017 p27

¹⁰⁷ Source : Université de Picardie

¹⁰⁸ *Non-thermal GSM RF and ELF EMF effects upon rat BBB permeability*, Henrietta Nittby et al., *Environmentalist* (2011) 31:140–148 DOI 10.1007/s10669-011-9307-z

¹⁰⁹ Radiofréquences et santé, ANSES avril 2016, p156

¹¹⁰ NTP technical report on the toxicology and carcinogenesis studies in Hsd: Sprague-Dawley rats exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (900MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones, nov. 2018

¹¹¹ « clear evidence of carcinogenic activity » pour les mâles (cœur, cerveau et surrénales) et « equivocal evidence of carcinogenic activity » pour les femelles (p12-3)

expression de protéines, contenu en chlorophylle, émission de terpènes, réduction de croissance... aussi bien dans les tissus exposés que dans des tissus non exposés¹¹².

La photosynthèse est perturbée chez des cyanophycées par un champ électromagnétique à 1,8GHz, 40V/m, en réduisant la synthèse de certaines protéines du système membranaire de la photosynthèse (cytochrome, système II...) ¹¹³.

Certains travaux ont associé l'exposition à un rayonnement de 900 MHz et 5 V/m de plants de tomates avec une augmentation de la quantité de trois ARN messagers fréquents dans les réponses à un stress, vraisemblablement médiée par les ions Ca²⁺¹¹⁴.

Certains travaux spéculent que l'ADN pourrait se comporter comme une antenne fractale, capable de capter les ondes électromagnétiques sur de larges bandes de fréquence¹¹⁵.

4.2.4 Ondes acoustiques - Plantes : un rôle dans et sur la croissance et les communications

Les relations acoustiques entre plantes et entre plantes et animaux, ainsi que les effets physiologiques des sons sur les êtres vivants, ont été sous-estimés et négligés, peut-être par anthropomorphisme (absence d'organe auditif visible chez les plantes) ou par rejet culturel. Les signaux sonores, plus économes en énergie et beaucoup plus rapides qu'un signal chimique, sont pourtant très utilisés par les plantes, organismes immobiles utilisant comme atouts évolutifs tous les supports qui peuvent véhiculer de l'information sur et à propos de leur environnement. Ils font l'objet d'une littérature scientifique internationale en augmentation surtout depuis 2012, notamment venant de laboratoires australiens¹¹⁶, chinois, américains, indiens, allemands et coréens. Par exemple :

- L'exposition de plantes à des ondes acoustiques entre 50 et 1000Hz, entre 60 et 100dB¹¹⁷, stimule la germination, la croissance (8% à plus de 30%), la résistance à la sécheresse et la capacité de défense vis-à-vis de pathogènes et prédateurs¹¹⁸. La littérature relève une réduction consécutive du besoin en intrants (-25%) et en pesticides (-50% d'attaques), toutes choses égales par ailleurs¹¹⁹. Changer de fréquence peut inverser le signal ; par exemple, des germinations de riz sont stimulées à 400Hz et inhibées à 4Hz¹²⁰. Les racines de maïs poussent vers la source d'un son d'environ 200Hz¹²¹.

¹¹² « Numerous metabolic activities (reactive oxygen species metabolism, α - and β -amylase, Krebs cycle, pentose phosphate pathway, chlorophyll content, terpene emission, etc.) are modified, gene expression altered (calmodulin, calcium-dependent protein kinase, and proteinase inhibitor), and growth reduced (stem elongation and dryweight) after low power (i.e., nonthermal) HF-EMF exposure. » ; Vian et al., 2016, Plant responses to HF electric fields, Biomed research international

¹¹³ Tang et al. (2018) Electromagnetic Radiation Disturbed the Photosynthesis of *Microcystis aeruginosa* at the Proteomics Level. Scientific Reports. Vol. 8, Article number: 479

¹¹⁴ Planta (2008) 227:883–891, DOI 10.1007/s00425-007-0664-2, High frequency (900 MHz) low amplitude (5 V m⁻¹) electromagnetic field: a genuine environmental stimulus that affects transcription, translation, calcium and energy charge in tomato
David Roux · Alain Vian · Sébastien Girard · Pierre Bonnet · Françoise Paladian · Eric Davies · Gérard Ledoigt

¹¹⁵ DNA is a fractal antenna in electromagnetic fields, Blank M¹, Goodman R., *Int J Radiat Biol.* 2011 Apr;87(4):409-15. doi: 10.3109/09553002.2011.538130. Epub 2011 Feb 28

¹¹⁶ Monica Gagliano, 2012, *Green symphonies : a call for studies on acoustic communication in plants*, Behavioral Ecology, doi :10.1093/beheco/ars206, 25 novembre 2012

¹¹⁷ A 1000Hz, par stress de la membrane mitochondriale accroissant la production d'ATP : Fernandez-Jaramillo et al., 2018, *Effects of acoustic waves on plants : an agricultural, ecological, molecular and biochemical perspective*, Scientae Horticulturae 235 (218) 340-348

¹¹⁸ Ratnesh Chandra Mishra, Ritesh Ghosh and Hanhong Bae, *Plant acoustics: in the search of a sound mechanism for sound signaling in plants*, Journal of Experimental Botany, Vol. 67, No. 15 pp. 4483–4494, 2016 doi:10.1093/jxb/erw235

¹¹⁹ Hassanien et al. 2014, *Advances in effets of sound waves on plants*, Journal of Integrative Agriculture 13, 335-348 ; Da Silva et Dobranszki, 2014, *Sonication and ultrasound : impact on plant growth and development*, Plant Cell Tissue and Organ Culture 117 131-143; 20kHz à 75dB

¹²⁰ Fernandez-Jaramillo et al., 2018

- Plus généralement, les modifications de l'environnement (grêle, stress hydrique, ravageurs...) accroissent la production de certaines protéines : catalases, dismutases, phénols... (ERRMEce) ; à l'inverse, des plantes cultivées en agriculture conventionnelle voient l'amplitude de leurs systèmes de défense et d'adaptation (variété et nombre des molécules produites) réduite par rapport aux mêmes plantes cultivées en biodynamie (INRA 2018)¹²².
- En matière de communications entre individus ou entre espèces¹²³ : des plantes excrètent plus de nectar en percevant le son spécifique du battement des ailes de leurs pollinisateurs ; le bourdonnement des abeilles comme le chant des oiseaux accélèrent la germination des graines ; la réflexion par certaines plantes du sonar des chauve-souris pollinisatrices attire ces dernières et fait bénéficier les plantes à la fois de la pollinisation et des déjections (couvrent 35% des besoins des plantes en azote) ; le bruit spécifique de mâchoires de chenilles déclenche la production de défenses chimiques¹²⁴. La sécheresse entraîne des émissions d'ultrasons chez les plantes (26 à 48dB) à côté des bruits de cavitation souvent évoqués (50-250Hz, à 65-70dB)¹²⁵ dans le xylème des premiers arbres touchés ; ces bruits induisent chez les plantes proches (plutôt par les racines) la production de défenses anti-sécheresse (médiateurs liés à la conductance des stomates par exemple).
- L'exposition en France (plusieurs séquences de quelques minutes par jour, 65 à 80dB) de cultures maraîchères ou de vignes à des séquences acoustiques composées à partir de la séquence primaire d'acides aminés d'une protéine donnée semble moduler spécifiquement les processus liés aux fonctions de cette protéine (croissance, résistance à la sécheresse, à un champignon) ainsi que sa production intracellulaire, en positif ou en négatif, selon que la succession des fréquences acoustiques reflète l'ordre des acides aminés de la séquence primaire de la protéine visée, ou un ordre inverse ou aléatoire. Le résultat vérifié récemment en laboratoire est une stimulation de la germination et de la croissance (15 à 20%, présence de la protéine stimulée accrue de 40% environ entre l'exposition aux séquences stimulatrice et inhibitrice)¹²⁶. **L'hypothèse avancée est l'existence de phénomènes ondulatoires au niveau de la synthèse des protéines in-vivo.** Sur le terrain, en exploitations agricoles réelles, la méthode permet de stimuler la résistance à la sécheresse et la défense vis-à-vis de certains prédateurs (ex : entre 50 et 70% de réduction de la mortalité due à l'esca de la vigne observés sur plusieurs vignobles en France¹²⁷).

¹²¹ Monica Gagliano, 2012 : stimulation de la production d'acide indolacétique

¹²² I. Soustre-Gacougnolle et al., Responses to climatic and pathogen threats differ in biodynamic and conventional vines. Nature Scientific Reports, oct 2018 : « Responses to climatic and pathogen threats differ in biodynamic and conventional vines », I. Souste et al., « L'amplitude des réponses des systèmes de défenses, est quant à elle, plus élevée dans les vignes cultivées en biodynamie, que ce soit face aux stress liés au dérèglement climatique, au changement de saisons, ou aux attaques de maladies fongiques. Les niveaux d'expression de gènes d'immunité et de silencing sont plus élevés, tout comme les teneurs en métabolites secondaires. Ces résultats suggèrent que la durabilité des pratiques biodynamiques repose sur des régulations moléculaires fines, distinctes de celles observées en viticulture conventionnelle. »

¹²³ Mishra et al. 2016 op.cit.

¹²⁴ Appel and Cocroft, 2014, Plants respond to leaf vibrations caused by insect herbivore chewing, Oecologia, 1-10

¹²⁵ Fernandez-Jaramillo et al., 2018

¹²⁶ laboratoire ERRMEce (U. Cergy-Pontoise) et entreprise Genodics. Le premier brevet français date de 1984, le deuxième de 1992 ; il n'a pas été exploité en France, sauf par la TPE issue en 2008 de l'équipe de recherche. Le brevet européen date de 2007 et couvre 15 pays (non validé aux USA). **Les séquences de fréquences reproduites par ce procédé, à partir de séquences d'acides aminés, sont protégées par le droit d'auteur.**

¹²⁷ genodics.net/Genodics_Synthese-Esca-2012.pdf

Les ondes acoustiques font l'objet d'applications en santé, biotechnologie et agriculture, très peu en France sauf pour les ultrasons en médecine (auxiliaires de traitement oncologique : cf. chapitre 3) et les fréquences audibles basses en traitement antalgique. Par exemple, le Centre de recherche en ingénierie et physique agricole de Qingdao¹²⁸ en Chine a développé sur ces bases (1000Hz, 100dB) un générateur de fréquences acoustiques pour les plantes (PAFT) ; c'est aussi le cas en Inde.

Alors que de nouvelles bio-productions figurent dans tous les programmes d'atténuation du changement climatique, concomitamment avec la montée des aléas climatiques et la nécessité de maintenir la qualité des sols et de la biodiversité en réduisant les intrants, ces techniques économes en énergie et en matière ne peuvent que se développer.

4.2.5 Ondes acoustiques – organismes marins : des perturbations importantes des organismes et des populations

Les activités humaines en mer (transports, forages, activités militaires...) émettent des ondes sonores dont le niveau est proche de celui des plus puissantes manifestations naturelles (sonar versus séismes sous-marins ou éruptions volcaniques), et/ou situées dans les bandes de fréquence utilisées par les poissons et mammifères marins pour leurs communications, écholocations et repérages. En outre, les puissances utilisées peuvent provoquer des lésions organiques (tympan des cétacés, vessies natatoires des poissons) importantes, voire mortelles (éclatements, échouages). Certains de ces dommages sont évitables par une évolution des techniques utilisées.

¹²⁸ Qingdao agricultural university, Physical Agriculture Engineering Research Center : « in emphasizing agricultural science as her advantage and distinctive feature, and in the harmonious development of diverse branches including agriculture, sciences, engineering, economics, arts and management (...) In addition, the university has also 4 provincial key labs such as Lab of Preventive Veterinary Medicine, Lab of Dryland Cultivation Technology, and one Research Center of Shandong Agricultural Bionics Applied Technology, and 22 research centers » https://www.cucas.edu.cn/studyinchina/admission/Qingdao_Agricultural_University_70_492.html

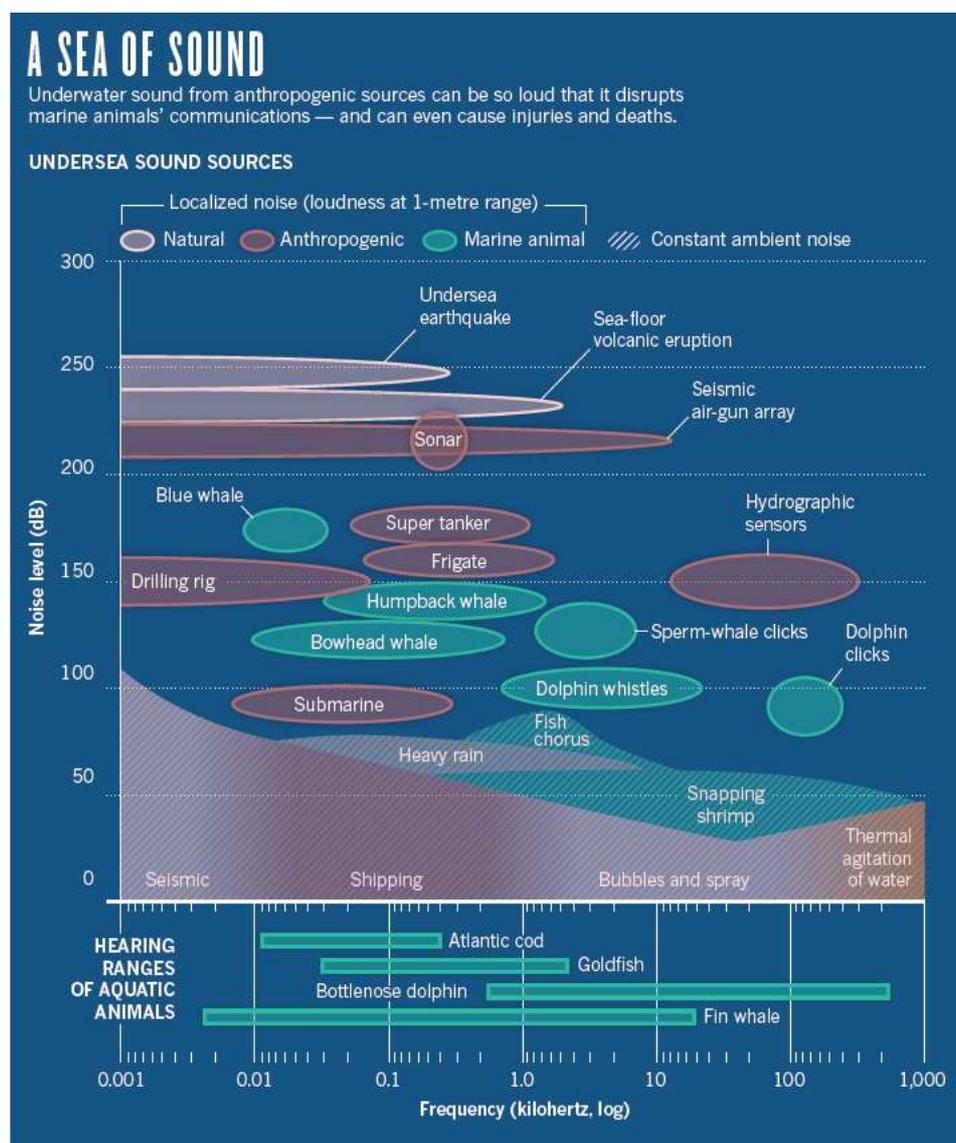


Figure 13 : Dégradation des conditions de communication des vertébrés marins par les activités humaines

Source : Nicolas Jones, *The quest for quieter seas*, Nature vol 568, 11 avril 2019, 158-161

4.3 Impacts macroscopiques : Organisme humain

4.3.1 RNI : au-delà des effets classiquement reconnus, des liens non encore stabilisés avec des cancers, des contaminations chimiques et des maladies professionnelles

4.3.1.1 Cadre des mesures

Les effets macroscopiques mesurés de façon classique sont :

- *Les courants induits*, pour les ondes de fréquence inférieure à 10MHz. Leur effet sanitaire, qui va des phosphènes (typiquement 20Hz, à 0,05-0,1V/m ; 10 à 100mA/m²) à la stimulation et la tétanie musculaires et nerveuses, dépend de la densité de courant interne, du fait que la boucle passe ou non par le cœur, de la fréquence et de l'intensité du flux magnétique (T). Il est considéré qu'atteindre 4V/m à l'intérieur du corps provoque une excitation musculaire (courant interne supérieur à 100mA/m²), et 40V/m un risque cardiaque vital (courant interne de 1A/m²) (ICNIRP). En découlent les dispositions de sécurité concernant les objets usuels.

- *Les échauffements de tissus*, pour les ondes de fréquence comprise entre 10MHz et 300GHz. Ils sont mesurés en énergie absorbée (W/kg). Il est considéré qu'atteindre 4W/kg corps entier ou 100W/kg en atteinte ponctuelle dépasse les possibilités de régulation de la température corporelle. Cet échauffement peut alors avoir des conséquences tératologiques, sur la barrière hémato-encéphalique, sur la reproduction, sur le comportement...

L'effet dépend de la taille de l'organisme exposé. Pour un être humain de 1,70m et 80kg, un effet de résonance pour le corps entier a lieu autour de 100MHz (flux de 1mW/cm²), aboutissant à une densité d'absorption spécifique (DAS) maximale de 0,3 à 0,5W/kg.

Dans cette gamme d'ondes, plus la fréquence augmente et moins le champ pénètre profondément : entre 100 et 300GHz (cf. Chapitre 2), l'échauffement reste épidermique, mais peut entraîner des brûlures si le champ dépasse 250 V/m². Ainsi, les ondes millimétriques radar (30-300GHz) semblent être utilisées comme arme de dispersion de manifestations aux Etats-Unis¹²⁹.

4.3.1.2 Résultats sur les effets non thermiques

Les études ont été nombreuses dans les années 2000 à 2015, en rapport avec le développement des antennes radio et de la téléphonie mobile¹³⁰.

- Sur l'utilisation des téléphones mobiles:
 - o Association du gliome cérébral et du neurinome acoustique avec un usage du téléphone portable de plus de 1640 heures (soit 30 minutes par jour pendant 10 ans), ou avec une utilisation de plus de 5 ans (Etudes 2011, programme UE Interphone) : classement en 2B par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC).
 - o Les études d'incidence sur la population ne reflètent pas ce résultat.
 - o Pas d'autre résultat incontestable sur l'induction directe de tumeurs chez l'humain.
- Plus que les gammes de fréquences, la configuration de l'exposition humaine issue de la 5G est nouvelle. Les antennes directives 5G (si le standard MIMO –*multiple input multiple output*- est retenu) pourront servir du débit multiplexé focalisé qui suivra les équipements des utilisateurs ; les stations de base seront en 700MHz, et en intérieur (objets connectés) la fréquence sera plus élevée (GHz) et le faisceau plus directif. Les objets connectés pourront accroître la durée d'exposition du corps entier, et les résonances éventuelles entre fréquences hautes, intermédiaires et basses ne sont pas connues. Ce nouvel exposome n'a pas été étudié d'un point de vue sanitaire et environnemental (ANSES). Il pourrait faire l'objet d'un programme dans le cadre Horizon Europe¹³¹.

¹²⁹ Source: laboratoire IMS, Université de Bordeaux

¹³⁰ Ex: Electromagnetic Biology and Medicine

¹³¹ https://ec.europa.eu/commission/publications/research-and-innovation-including-horizon-europe-iter-and-euratom-legal-texts-and-factsheets_en

• Le **pilier Science ouverte** (25,8 milliards d'euros) soutient des projets de recherche exploratoire définis et menés par les chercheurs eux-mêmes à travers le **Conseil européen de la recherche** (16,6 milliards d'euros), finance des bourses et échanges de chercheurs au moyen d'**actions Marie Skłodowska-Curie** (6,8 milliards d'euros) et investit dans des infrastructures de recherche d'envergure mondiale.

• Le **pilier Problématiques mondiales et compétitivité industrielle** (52,7 milliards d'euros) soutient directement des travaux de recherche liés aux problématiques sociétales, renforce les capacités technologiques et industrielles et fixe des missions à l'échelle de l'UE, assorties

Enfin, la couverture satellitaire dense associée produira des ondes millimétriques en continu au-dessus d'une grande partie du globe.

- Hypersensibilité électromagnétique : une concentration élevée de polluants chimiques (notamment retardateurs de flamme) a été constatée dans le sang de personnes déclarant une hypersensibilité électromagnétique¹³². Or les symptômes des personnes qui se déclarent hypersensibles aux ondes sont les mêmes que ceux des hypersensibles aux produits chimiques (constat 2017 de l'ANSES dans le cadre du groupe d'experts sur les champs électromagnétiques). L'hypothèse, qui demande examen, serait que les effets directs d'ampleur des champs électromagnétiques sur les macro-organismes seraient rares (ex : cytochrome/orientation), mais que :
 - o soit les radiofréquences pourraient perturber le fonctionnement de base du système immunitaire, accroissant la vulnérabilité des organismes à d'autres aléas physiques ou chimiques,
 - o soit, lorsque l'immunité est perturbée par certains polluants, les radiofréquences potentialiseraient les symptômes liés à ces polluants.

Ces hypothèses pourraient expliquer pourquoi les personnes se déclarant électrohypersensibles, lors des tests effectués en aveugle, ne détectent pas si elles sont exposées ou non à un champ électromagnétique, alors que leurs symptômes sont considérés comme réels (ANSES 2017). Elles pourraient être compatibles avec le ralentissement des médiateurs d'inflammation observé chez les rats (point 4.2.1.2). Selon certains travaux, les organismes en état d'inflammation (pollutions) seraient plus sensibles aux effets des champs électromagnétiques (INERIS 2018), impact croisé qui n'est cependant pas observé dans ce sens par d'autres études (ANSES 2017).

Ces hypothèses demanderaient donc approfondissement¹³³ ; elles poseraient la question des effets d'une exposition permanente des humains aux RNI et des effets cocktail.

- Effets possibles des lignes 400 kV (5kV/m et 30μT sous les lignes, 50V/m et 1μT à 100m de la ligne) :
 - o CIRC et autres études 2006 et 2009 : la proximité de lignes HT à 50Hz est associée à un excès de leucémies de l'enfant, sans que des mécanismes biologiques ne soient proposés avec des champs aussi faibles¹³⁴

d'objectifs ambitieux sur certains des grands défis qui se posent à nos sociétés. Ce pilier comprend également les activités menées par le **Centre commun de recherche** (JRC - 2,2 milliards d'euros), dont l'appui technique et l'expertise scientifique indépendante aident les décideurs politiques de l'UE et nationaux.

• Le **pilier Innovation ouverte** (13,5 milliards d'euros) vise à faire de l'Europe un précurseur en matière d'innovation créatrice de marchés grâce au **Conseil européen de l'innovation** (10 milliards d'euros). Celui-ci contribuera à développer l'ensemble du paysage européen de l'innovation, notamment en renforçant l'**Institut européen d'innovation et de technologie (EIT)** pour favoriser l'intégration des entreprises, de la recherche, de l'enseignement supérieur et de l'entrepreneuriat (3 milliards d'euros).

¹³² Hardell L. et al., Increased concentrations of certain POPs in subjects with self-reported electromagnetic hypersensitivity – A pilot study, *Electromagnetic Biology and Medicine*, 27: 197–203, 2008

¹³³ Investissement de recherche total nécessaire sur ce point pour les ondes électromagnétiques : 0,9 M€ (estimation : Université de Picardie)

¹³⁴ CIRC, Volume 80, Non-ionizing radiation, part 1: *Static and extremely low-frequency electric and magnetic fields*, 2002

En relation avec la leucémie de l'enfant et des expositions $\geq 0,3-0,4 \mu\text{T}$. Sur la base d'une association épidémiologique et de l'absence de support expérimental (biologie et mécanismes)

• Ahlbom 2000; Greenland 2000, Etudes poolées (mesure ou calcul de champs magnétiques) : Association (RR: 1,4) entre exposition à plus de 0,3- 0,4 μT et la leucémie de l'enfant

- étude 2018 Geocap : un excès de leucémies sur des enfants de moins de 5 ans est observé à moins de 50m des lignes (moins de 10 cas selon l'ANSES)
- Des études surtout allemandes montrent un lien entre des expositions professionnelles et la sclérose en plaques latérale amyotrophique (SLA) (ANSES 2017)
- Sous exposition à des radiofréquences de type GSM se produit une altération de l'encéphalogramme tendant à induire un fonctionnement en ondes alpha du cerveau. (Usages thérapeutiques, cf. chapitre 3).
- Une étude épidémiologique a été réalisée sur près de 50 000 soldats de la Marine française par rapport à leur exposition radar. De par le faible nombre de personnes touchées identifiées parmi ces soldats, la non-connaissance du facteur tabac et la durée relativement courte (26 ans), l'étude ne permet pas de conclure sur les causes d'excès de mortalité liée à des cancers des tissus lymphatiques ou hématopoïétiques, ou à des perturbations du système nerveux et organes des sens¹³⁵.

4.3.2 Ondes acoustiques : une attention récente aux basses fréquences liée à la diffusion des générateurs électriques et de certaines musiques

4.3.2.1 Cadre des mesures

La réglementation professionnelle a successivement utilisé plusieurs courbes d'exposition. La plus ancienne, dite en « dB A » (pour « décibel du rapport pondéré en fréquence suivant la courbe A »), fut conçue pour les installations industrielles du XIXème siècle, à bruits essentiellement métalliques (1000 à 5000Hz) autour de 40 dB SPL et dépourvus de fréquences basses¹³⁶.

Son usage est obligatoire pour certaines mesures légales du bruit¹³⁷. Mais elle compte très peu les émissions acoustiques non audibles par l'oreille humaine : par exemple 50dB en infrasons y sont comptés en-dessous de 10. La norme est constituée d'un niveau et d'un temps d'exposition. La surdité est un phénomène long, puisqu'elle peut s'installer en 30-40 ans.

Les courbes réglementaires diff rent selon les usages :

- dB B « décibel du rapport pondéré en fréquence suivant la courbe B ». Cette courbe a peu d'utilisation actuellement, mais elle est une composante de celle qui sert à l'analyse de la sonie des programmes de télévision.
- dB C « décibel du rapport pondéré en fréquence suivant la courbe C ». C'est une courbe de pondération adaptée à la réponse de l'oreille à des niveaux élevés de pression acoustique, supérieurs à 70 dB SPL. Elle prend en compte les hautes et basses fréquences associées au développement des aéroports (années 70).
- dB HL Hearing Level (*Niveau d'audition*), « décibel du rapport pondéré par une courbe normalisée pour les audiogrammes ».

• Kheifets L. et al, 2006, *Etude d'impact : hypothèse d'une relation causale* ; « Dans les petits pays avec des expositions faibles, le nombre de cas attribuables est inférieur à un extra-cas par an ». En France, plus de 400 nouveaux cas/an

¹³⁵ Vincent Dabouis, Philippe Arvers, Jean-Claude Debouzy, Charles Sebbah, David Crouzier et Anne Perrin, *First epidemiological study on occupational radar exposure in the French Navy: a 26-year cohort study*, International Journal of Environmental Health Research, 2015
<http://dx.doi.org/10.1080/09603123.2015.1061112>

¹³⁶ Source : Université d'Auvergne

¹³⁷ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Decibel>

- dB G : les infrasons n'ont été normés que tardivement, suite à l'apparition de moteurs électriques générateurs de basses fréquences. La courbe G compte les émissions de basses et hautes fréquences avec la même pondération que les émissions du spectre audible jusque quelques Hz. Son utilisation en matière de normalisation à la place de la courbe A est chaque fois discutée¹³⁸.

4.3.2.2 Résultats

Selon l'OMS, plus d'un milliard d'humains sont exposés à des niveaux de bruit préoccupants pour la santé.

Plus particulièrement, l'exposition à de basses fréquences acoustiques et à leurs modulations est perceptible en aveugle par l'être humain. Comme toute perception, elle varie selon les individus. Les basses fréquences (prisées en discothèques et répandues avec les transformateurs, compresseurs, réfrigérateurs, moteurs électriques en général ...) sont considérées comme potentiellement préoccupantes d'un point de vue sanitaire, au même titre que les fréquences audibles. Ainsi, les basses fréquences à haute puissance induiraient une dépendance. En outre, la sur-stimulation de l'oreille en basses fréquences peut conduire à des dommages irréversibles, comme des ruptures mécaniques de membranes dans l'oreille interne ou l'éclatement osmotique de synapses nerveuses. C'est donc un sujet « aussi pertinent que les RNI »¹³⁹. Des études sont en cours sur ce sujet en France.

4.4 Impacts cellulaires, moléculaires et sub-atomiques : quels processus cellulaires

Des processus de niveaux cellulaire, moléculaire et infra-moléculaire sous-tendent les effets macroscopiques observés. Effectivement, les RNI comme les ondes acoustiques ont des effets biologiques avérés au niveau cellulaire, sans que l'on puisse forcément les relier à des effets sanitaires positifs ou négatifs.

En effet, les signaux électromagnétiques sont utilisés par les organismes vivants. De l'ordre de 300000km/sec dans le vide, même ralentis dans les milieux matériels, ils y sont beaucoup plus rapides que les signaux chimiques, eux de l'ordre du cm/sec, et beaucoup plus économes : ils ne supposent pas de consommation d'énergie due aux transformations des liaisons chimiques, avec les pertes de chaleur associées.

La DARPA a créé en 2010 un réseau national de biophysique quantique dédié à l'information quantique appliquée aux systèmes biologiques, puis lancé en 2016 un appel à information sur l'état de l'art concernant « l'observation, la modélisation et la compréhension de la communication entre les biosystèmes utilisant des ondes électromagnétiques depuis les basses fréquences (kHz) jusqu'aux hautes fréquences (THz) » avec les questions suivantes : « *Quels sont les rôles des ondes électromagnétiques pour les biosystèmes ? Quelle information est transportée entre les cellules par les ondes électromagnétiques ? Comment les faibles champs influencent-ils les cellules ?* »

De même, aucun organisme ne vit dans une niche écologique dépourvue de sons ; au cours de l'évolution, ce vecteur a donc aussi été utilisé par les êtres vivants. La recherche civile française est

¹³⁸ Source : Université d'Auvergne

¹³⁹ id

peu présente sur ce champ, contrairement à d'autres pays. L'étude des interactions sons/cellules est très peu développée, sauf sur la cochlée des mammifères.

4.4.1 Constats expérimentaux (effets non-thermiques)

4.4.1.1 RNI : des effets mesurés, en cours d'élucidation et à forts enjeux

- *Impact de champs magnétiques faibles et basses fréquences (10Hz, 2mT) pulsés sur l'équilibre acido-basique de la cellule*¹⁴⁰ : le champ influence une protéine appelée cryptochrome, qui joue un rôle dans l'orientation des oiseaux migrateurs et est présente dans les cellules animales et humaines. Son activation par le champ magnétique accroît la production de dérivés réactifs de l'oxygène dans la cellule, caractéristiques de situations de stress et dont l'accumulation peut l'endommager. Les cellules mobiles ont donc tendance à s'écarter du champ magnétique, et leur croissance est réduite sous exposition aux radiofréquences.¹⁴¹
- Sur neurones in vitro, ni les canaux spécifiques de nociception ni le métabolisme de la dopamine ne sont affectés par une exposition de 24h à 60Hz¹⁴².
- Exposés à deux ondes simultanées cohérentes de fréquence 2000Hz +/-10, à très faible puissance, c'est l'interférence entre les ondes qui excite les neurones¹⁴³.
- Les radiofréquences pourraient entrer en synergie avec de nombreux polluants mutagènes¹⁴⁴.
- Les champs modulés ont en général un impact plus fort que les champs non modulés : par exemple un champ de 900MHz modulé à 50Hz crée plus de radicaux oxydants et de dommages à l'ADN qu'un champ stable à 900MHz ; de même pour un champ de 217Hz modulé ou non à 1,8GHz¹⁴⁵
- Différents types cellulaires semblent avoir une sensibilité différente aux champs.
- *Impacts de champs de fréquences moyennes et au-delà : réduction de l'activité électrique spontanée en bouffées* de cellules neuronales in vitro (**première mondiale, réalisée en France**)¹⁴⁶, sans échauffement, effet reproductible et dépendant de la dose. Les expériences

¹⁴⁰ Sherrard RM, Morellini N, Jourdan N, El-Esawi M, Arthaut L-D, Niessner C, et al. (2018) Low-intensity electromagnetic fields induce human cryptochrome to modulate intracellular reactive oxygen species. PLoS Biol 16(10): e2006229. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2006229>

¹⁴¹ Voir paragraphe suivant : les rats ont aussi expérimentalement tendance à fuir le champ magnétique d'un téléphone portable pour dormir la nuit, et y sont indifférents pendant leur activité diurne. (ANSES cahiers de recherche 2017)

¹⁴² Ondes millimétriques et cellules nerveuses, Yves Le Dréan, Anses cahiers de la recherche mai 2017 p25

¹⁴³ IMT Saint-Etienne, laboratoire de bioélectronique

¹⁴⁴ Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields, Henry Lai, Bioinitiative 2012 section 6, supplément 2014 (department of Bioengineering, Univ. of Washington, Seattle) , mars 2014, preparation for the Bioinitiative Working Group

¹⁴⁵ idem

¹⁴⁶ Site : <https://www.ims-bordeaux.fr/fr/recherche/groupe-recherche/35-bioelectronique/bioem/18-BIOEM>

ANSES : *RadioBret*, FP7 : Le projet européen GERONIMO met en oeuvre deux méthodes *in vitro* pour déceler des effets des champs électromagnétiques RF et de fréquence intermédiaire (FI), en temps réel et sans marqueurs, sur des cellules en culture.

La première de ces techniques est l'impédance-métrie qui permet une mesure physique du phénotype des cellules, de leur morphologie et de leur propriété d'adhésion. Elle vient d'être utilisée en bioélectromagnétisme (*Etude en temps réel des effets cellulaires et moléculaires des champs électromagnétiques radiofréquences environnementaux*, Ruigrok H., thèse 2017, Université de Bordeaux, Biochimie).

La technique de Transfert d'Énergie en Résonance de Bioluminescence (BRET) est une deuxième approche biophysique qui met en évidence les changements de conformation de composants cellulaires grâce à la mesure du transfert d'énergie non radiatif entre un donneur d'énergie bioluminescent et un accepteur fluorescent compatible, fusionnés ou liés aux molécules d'intérêt. Il s'agit d'abord d'obtenir et de caractériser plusieurs sondes de BRET basées sur la structure des protéines de choc thermique, de l'activité de protéines PKA, PKC, RAS et JNK et de récepteurs à la température et à la pression de la famille TRPV. Les effets de plusieurs signaux RF sont examinés à différents niveaux de puissance jusqu'à 4 W/kg.

sur les neurones utilisent la bioimpédance-métrie, car « étant donnée la complexité du vivant, l'étude des effets des RF à l'aide d'un test unique ne permettrait de voir, au mieux, que l'un des aspects des effets potentiellement complexes des champs sur les cellules ». La méthode choisie permet « d'utiliser une technique label-free afin d'étudier le comportement cellulaire global sous exposition aux différents signaux RF sans se concentrer sur un mécanisme moléculaire précis, ce qui permettrait de cribler les paramètres des champs efficaces »¹⁴⁷. Un impact sur le sommeil pourrait y être associé¹⁴⁸.

- Les canaux tensio-dépendants des membranes neuronales répondent à des chocs de 1kHz en 1 à 3ms¹⁴⁹. Les neurones réagissent aussi à des stimuli très rapides, 300MHz voire 800MHz, selon un mécanisme inconnu qui impacte aussi les organites cellulaires¹⁵⁰; cette capacité à rectifier une modulation est saturée entre 1 et 10 GHz (1 à 0,1ns)¹⁵¹.
- Les récepteurs membranaires aux opiacés semblent stimulés par des radiofréquences de téléphonie et des basses fréquences¹⁵².
- Absence d'impact non thermique sur les récepteurs thermo-sensibles¹⁵³ (TRPV1) des membranes cellulaires à 1800Mhz¹⁵⁴; en revanche, l'impact thermique est observé (augmentation de la température).
- Un champ électromagnétique à 300MHz endommage la membrane et la photosynthèse dans les cellules de tabac.

4.4.1.2 Ondes acoustiques : un domaine scientifique presque ignoré en France, alors qu'il explose internationalement depuis moins de 10 ans

Les membranes cellulaires animales et végétales disposent de milliers de capteurs aux substances chimiques, au contact physique, mais aussi aux photons (lumière et autres RNI) et aux sons.

Université Bordeaux 1 : ERNAM, Industrie: TEMCER : Depuis 2009, des chercheurs des équipes BIOEM et ELIBIO étudient conjointement les effets d'exposition de réseaux de neurones *in vitro* à des signaux de téléphonie mobile en collaboration avec une équipe de neurosciences de l'Institut des Maladies Neurodégénératives (IMN).

Plusieurs résultats publiés ayant mentionné une altération de l'électroencéphalogramme de personnes exposées à des signaux de type GSM, des cultures de neurones primaires ont été réalisées à partir de cellules corticales d'embryons de rats et déposées sur un MEA (Multi-Electrode-Array), permettant de recueillir l'activité électrique extracellulaire du réseau de neurones sous exposition à un signal de téléphonie mobile de type GSM, parfaitement caractérisé quant à son absorption par les cellules neuronales. **L'analyse de ces enregistrements a permis de conclure à une diminution significative de l'activité électrique en bouffées (bursts) sous exposition RF [Moretti et al. 2013]. Cette expérience est une première mondiale.**

Voir aussi IMT Saint-Etienne, El Khoueiry, Moretti, Lagroye, Veyret, and Lewis, Neurophysiology 2018

¹⁴⁷ Etude en temps réel des effets cellulaires et moléculaires des champs électromagnétiques radiofréquences environnementaux, Ruigrok Hermanus, thèse 2017, Université de Bordeaux, Biochimie.

¹⁴⁸ Résultat suisse rapporté par IMT Saint-Etienne

¹⁴⁹ département de bioélectronique, IMT Saint-Etienne

¹⁵⁰ Kohler, S., et al, *Experimental microdosimetry techniques for biological cells exposed to nanosecond pulsed electric fields using microfluorimetry*. Microwave Transactions and Theory, IEEE, 61(5), 2015-2022, 2013. Moreau, D, Lefort, C, Burke, RC, Leveque, P, O'Connor, RP. *Rhodamine B as an optical thermometer in cells focally exposed to infrared laser light or nanosecond pulsed electric fields*. Biomedical Optics Express, 6(10), 4105-4117, 2015.

¹⁵¹ *Radio-frequency rectification on membrane bound pores* Ramachandran et al, 2018; PACS: 87.16.Uv, 87.16.Dg, Arxiv/0709.1896.pdf

¹⁵² Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields, Henry Lai, Bioinitiative 2012 ibidem

¹⁵³ L'existence de récepteurs purement thermiques est discutée (Université de Picardie)

¹⁵⁴ Ruigrok et al., *Activation of the TRPV1 Thermoreceptor Induced by Modulated or Unmodulated 1800 MHz Radiofrequency Field Exposure*, Radiation Research, 189(1):95-103.

Le cas des cellules végétales fait l'objet d'une littérature en augmentation forte depuis 2002 et surtout 2010, dans une perspective essentiellement agronomique. Les premiers brevets ont été déposés aux Etats-Unis en 1971 et 1977, puis en France en 1992.

A des fréquences variant de 50 à 1400Hz et des puissances variant entre 65 et 106 dB selon les cas, les vibrations acoustiques provoquent notamment l'augmentation des teneurs du cytoplasme cellulaire en calcium, potassium, kinases et diverses enzymes et protéines, avec des effets biologiques sur la plante entière¹⁵⁵ (cf. supra).

Par exemple, l'exposition de micro-algues à des sons de 1000Hz et à 100dB joue positivement sur la croissance et la division cellulaire.

Les phénomènes cellulaires ont été observés et mesurés¹⁵⁶. L'utilisation de puissances supérieures à 100dB influence négativement ces processus.

L'utilisation des ondes acoustiques pour stimuler ou orienter des réactions de bioproduction notamment en milieu confiné est donc prometteuse, et peu explorée.

4.4.2 Hypothèses de principes actifs

4.4.2.1 Pour les RNI

Outre les perturbations des canaux membranaires par des hautes puissances et hautes fréquences pulsées, à puissances et fréquences plus basses sont observés ou testés aujourd'hui :

- la perturbation des flux de calcium intracellulaires modifiant certains processus intracellulaires¹⁵⁷, ou la taille des particules magnétiques¹⁵⁸ (oiseaux), par sollicitation des canaux calciques de la membrane ;
- la perturbation endothéliale par les radiofréquences de téléphonie des facteurs de vasodilatation¹⁵⁹ (mammifères) : hypothèse également de perturbation de canaux calciques modifiant la réception de la température extérieure¹⁶⁰ ;
- la perturbation à basses fréquences de canaux voltage-dépendants¹⁶¹ ;
- la production intracellulaire de radicaux oxydants (ROS) intervenant dans la transcription des gènes, les processus de défense, le vieillissement et la mort cellulaires, le dommage aux gènes¹⁶² ;

¹⁵⁵ Ratnesh Chandra Mishra, Ritesh Ghosh and Hanhong Bae, Plant acoustics: in the search of a sound mechanism for sound signaling in plants, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 67, No. 15 pp. 4483–4494, 2016 doi:10.1093/jxb/erw235 : « Studies have suggested that SVs increase the transcription of certain genes, soluble protein content, and support enhanced growth and development in plants. At the cellular level, SVs can change the secondary structure of plasma membrane proteins, affect microfilament rearrangements, produce Ca²⁺ signatures, cause increases in protein kinases, protective enzymes, peroxidases, antioxidant enzymes, amylase, H⁺-ATPase / K⁺ channel activities, and enhance levels of polyamines, soluble sugars and auxin. » (Mishra et al. 2016)

¹⁵⁶ Effect of sound stimulation on *Dendranthema morifolium* callus growth, Zhao et al., Beijing, 2002 *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 29 (2003) 143_ 147

¹⁵⁷ Entre autres, IMT Saint-Etienne

¹⁵⁸ Balmori 2015 : « Electromagnetic fields act via activation of voltage-gated calcium channels (Pall, 2013). Changes in the size of the magnetic granules upon applying additional magnetic field to the cells of *Apis mellifera* were observed, and this size fluctuation triggered the increase of calcium intracellular (Hsu et al., 2007). Therefore, we may hypothesize that some of the disruptive effects of radio frequency fields on the orientation of animals may be related to the interference with calcium channels. »

¹⁵⁹ N. Loos, JP Libert et al. (2013), Is the effect of mobile phone radiofrequency waves on human skin perfusion non-thermal ?, *Microcirculation* 20 : 629-636

¹⁶⁰ Tests en cours (U. de Picardie/INERIS)

¹⁶¹ IMT Saint-Etienne, travaux en cours

- la modification induite de l'expression de certains gènes¹⁶³.

Les interactions avec les complexes protéiques sièges des processus quantiques (effet tunnel, effet de superposition, effet d'enchevêtrement, effet Zénon...) restent peu explorées et sujettes à débats¹⁶⁴.

4.4.2.2 Pour les ondes acoustiques

Une grande diversité de mécanismes est mise en œuvre par le vivant pour percevoir et convertir les informations acoustiques¹⁶⁵.

- Dans le cas d'une oreille interne (ex : mammifères) : amplification d'un facteur 30 000 par la cochlée qui permet de percevoir des déplacements linéaires de l'air de 1µm à 0,1nm, puis conduction de l'influx électrique transcodé ;
- dans le cas des plantes et bactéries : pression mécanique sur la membrane cellulaire entraînant plusieurs processus : ouverture de canaux calcium et potassium, production de composés dérivés oxydants (ROS), stimulation de production de kinases qui phosphorylent /déphosphorylent les protéines des réactions cellulaires, augmentation de la densité protéique et enzymatique du cytoplasme, augmentation du taux de sucre et d'auxine dans le cytoplasme, modification de l'expression de certains gènes¹⁶⁶ ;
- facilitation ou ralentissement de l'assemblage des acides aminés au niveau du ribosome en fonction de la séquence sonore : à l'état d'hypothèse¹⁶⁷ ;
- résonance/reconnaissance vibratoire moléculaire sur le modèle de l'olfaction : à l'état d'hypothèse (cf. point 3 c)¹⁶⁸ ;
- stimulation des récepteurs opiacés membranaires par les basses fréquences : à l'état d'hypothèse, déduite de l'addiction qu'elles provoquent, du mécanisme constaté pour les basses et radiofréquences, et de la synergie suspectée entre bruit et champ magnétique pour les effets sur l'immunité¹⁶⁹.

¹⁶² abondante bibliographie

¹⁶³ Tang et al. 2018

¹⁶⁴ JC. Brookes (2017), op.cit.

¹⁶⁵ Ratnesh Chandra Mishra, Ritesh Ghosh and Hanhong Bae, Plant acoustics: in the search of a sound mechanism for sound signaling in plants, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 67, No. 15 pp. 4483–4494, 2016 doi:10.1093/jxb/erw235

¹⁶⁶ Un brevet américain de 2011 a l'ambition de couvrir tous les agents pouvant exercer une tension sur des membranes cellulaires, notamment en milieu confiné (y compris la culture en bioréacteurs des micro-algues) : « Enhancement of cellular production through mechanotransduction », Abbott laboratories, Worcester, USA : US 2011/0117603 A1, 19 mai 2011 ; WO2 011008959A1

¹⁶⁷ ERRMce / Université de Cergy-Pontoise

¹⁶⁸ Le même quintuplet de protéines sert à ouvrir des canaux membranaires sous l'effet du son et à débarrasser la rétine des débris de transduction dans la perception de la lumière ; il y a donc multifonctionnalité (Université d'Auvergne)

¹⁶⁹ Université d'Auvergne

4.5 Récapitulatif : en quoi les éléments scientifiques collectés sur les champs magnétiques et acoustiques rendent-ils probables des ruptures industrielles et nécessaire d'y investir ?

Les effets jusqu'ici retenus pour les champs électromagnétiques sont la stimulation de tissus excitables à basses fréquences, et l'échauffement aux fréquences moyennes et au-delà. Des travaux récents venant de diverses sources permettent d'enrichir considérablement ce tableau, avec des conséquences à la fois en termes d'opportunités à saisir et en termes d'impacts à éviter. C'est aussi l'occasion de rappeler que la France a été pionnière mondiale en recherche sur la thérapie électromagnétique au début du XXème siècle (d'Arsonval) après les premiers travaux dus à Nikola Tesla à la fin du siècle précédent.

4.5.1 Au niveau atomique et moléculaire

Plusieurs processus physiologiques tels que la photosynthèse (expérimenté), l'olfaction ou la catalyse enzymatique (suspecté) s'avèrent mobiliser des mécanismes quantiques, reposant sur la nature ondulatoire de la matière (biologie quantique). Par exemple, la reconnaissance rapide et sélective d'une molécule par un récepteur pourrait se faire aussi sur un mode vibratoire (expérimenté sur la reconnaissance des odeurs).

Par ailleurs, certains chimistes accélèrent des réactions chimiques ou les réalisent à pression et température ambiantes par adjonction d'énergie sonore, de micro-ondes ou de plasmas froids.

4.5.2 Au niveau cellulaire

Les champs non ionisants électromagnétiques ou acoustiques engendrent des vibrations photoniques (champs électromagnétiques) ou atmosphériques (champs acoustiques) qui peuvent impacter les canaux ioniques des membranes cellulaires (expérimenté), notamment les canaux contrôlant les flux de calcium intracellulaires -450MHz-, par dépolarisation membranaire ou tension physique, voire (hypothèse non élucidée à ce stade) reconnaissance vibratoire. Des brevets ont été déposés (Etats-Unis).

Parmi les effets induits observés dans les cellules, on trouve notamment :

- la formation de composés oxydants (symptôme de stress) pouvant endommager l'équilibre acido-basique de la cellule, voire l'ADN basses fréquences (10Hz, 2mT) et au-delà ;
- l'endommagement de la membrane et de la photosynthèse dans des cellules végétales isolées (champ électromagnétique 300MHz) ;
- une croissance et une multiplication stimulées des micro-algues (1000Hz, 100dB), une photosynthèse perturbée des Cyanophycées (1,8GHz, 40V/m) ;
- l'endommagement direct de l'ADN à partir de très basses fréquences et au-delà (controversé)¹⁷⁰ ;
- la désorganisation des microtubules lors de la mitose (réalisée à 100V/m sur 27MHz modulée, ou 44kV/cm selon les laboratoires et types de cancers)¹⁷¹ ;

¹⁷⁰ Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields, Henry Lai, Bioinitiative 2012 section 6, supplément 2014 (department of Bioengineering, Univ. of Washington, Seattle) , mars 2014, preparation for the Bioinitiative Working Group

¹⁷¹ Costa et Barbault (2011), Carr et O'Connor (2016)

- la modulation de l'expression de protéines (parmi les hypothèses : modulation de la vitesse de synthèse au niveau des ribosomes) plus ou moins ciblées selon les méthodes : 1000Hz non spécifique à 100dB (Chine), séquences spécifiques de molécules identifiées entre 50Hz et 500kHz à 55-70dB (France) ;
- la stimulation, à moins de 100Hz, ou la réduction, par des radiofréquences de téléphonie 900MHz, de l'activité neuronale spontanée ; une capacité de réponse des membranes neuronales à des ondes ultrarapides à 300MHz voire 800MHz selon un mécanisme non élucidé qui impacte aussi les organites cellulaires¹⁷². En cas de superposition d'ondes de fréquences voisines (2000+/-10 Hz), les battements interférentiels sont la cause de stimulation du cerveau en profondeur¹⁷³.

4.5.3 Au niveau de l'organisme végétal entier

L'utilisation d'ondes acoustiques audibles comme support de communication intra et interspécifique est observée (expérimenté). Elle déclenche des adaptations chimiques, physiques ou comportementales chez les organismes récepteurs.

L'utilisation de champs acoustiques audibles parfois très spécifiques peut stimuler les processus de croissance, de pollinisation, de défense vis-à-vis des pathogènes ou de résistance à la sécheresse de nombreuses plantes cultivées ou en réacteurs à micro-algues (Chine, Inde, France...), avec des résultats concrets d'ampleur.

4.5.4 Au niveau de l'organisme animal entier

L'exposition à des radiofréquences de téléphonie (900MHz) de faible puissance (1V /m) perturbe le métabolisme basal (thermorégulation, rat, expérimenté ; rôle des canaux calciques suspecté) ; l'hypothèse d'une interaction avec le système immunitaire (êtres humains hypersensibles) est formulée¹⁷⁴.

Des effets neurochimiques et comportementaux sont observés (handicap d'apprentissage chez le rat par exemple¹⁷⁵).

4.5.5 Au niveau de l'organisme humain entier

Les basses fréquences (50Hz) sont susceptibles de déclencher des leucémies infantiles, sans que des processus générateurs aient encore pu être proposés pour des champs aussi faibles¹⁷⁶.

Les RNI sont utilisés comme outils de diagnostic de tumeurs, qui se signalent par des fréquences électromagnétiques spécifiques¹⁷⁷, comme auxiliaires oncologiques (facilitent la pénétration des médicaments dans les tissus notamment cérébraux, ou le ciblage des cellules tumorales), et comme traitements, par exemple :

¹⁷² département bioélectronique, IMT Saint-Etienne

¹⁷³ idem

¹⁷⁴ Université de Picardie

¹⁷⁵ Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields, Henry Lai, Bioinitiative 2012 section 6, supplément 2014 (department of Bioengineering, Univ. of Washington, Seattle) , mars 2014, preparation for the Bioinitiative Working Group

¹⁷⁶ CIRC

¹⁷⁷ IMT Saint-Etienne

- en oncologie (ablation de gliome frontal par infrarouges ; attrition cellulaire par ralentissement des macrophages destructeurs des éboueurs cellulaires) ; en effet, comme les cellules tumorales ouvrent plus de canaux Na⁺ et contiennent plus d'eau que les cellules saines, elles sont plus électrosensibles ;
- comme antalgique : 4-6Hz ;
- contre l'arthrite : 25-50Hz ;
- contre des difficultés circulatoires et des allergies : 13Hz diagnostic, 10Hz traitement¹⁷⁸.

Ces différents résultats montrent que les champs électromagnétiques et acoustiques interagissent avec les organismes vivants d'une façon plus fondamentale que considéré traditionnellement en France. D'autres pays et acteurs investissent beaucoup depuis une dizaine d'années dans ces domaines, avec des mises en marché déjà actuelles ou annoncées à seulement 5 ans.

a. En applications médicales

Les champs électromagnétiques et les micro-courants sont officiellement utilisés dans plusieurs pays pour diagnostiquer et traiter une grande variété de dysfonctionnements neurologiques (douleur), allergiques et musculo-squelettiques (Allemagne, Suisse, Chine, Russie...), notamment dans le prolongement des techniques d'acupuncture (Chine). Dans des conditions différentes, divers usages comme auxiliaires de traitement¹⁷⁹ (voire traitements) pour certaines tumeurs sont pratiqués ou étudiés. Ils seraient susceptibles de remplacer des médicaments chimiques avec des efficacités équivalentes voire supérieures¹⁸⁰, moins d'effets secondaires, des coûts moins élevés, une moindre consommation énergétique et une plus grande facilité de réalisation (AMM moins lourde, pas de sites industriels chimiques etc.), donc accessibles à de petites et moyennes entreprises, notamment pour soulager ou traiter des pathologies chroniques.

Ils font l'objet d'investissements importants de majors du numérique comme Alphabet, qui devient un acteur mondial en santé (filiale Galvanibioelectronics avec GlaxoSmithKline), mais aussi Apple et Microsoft, et d'autres sociétés plus petites comme Setpoint Medical (Etats-Unis)¹⁸¹. Certaines de ces techniques alternatives ou complémentaires de la pharmacie chimique sont annoncées comme susceptibles d'arriver sur le marché dès 2026.

Compte tenu des fondamentaux rappelés ci-dessus et de l'accélération des publications et des moyens mis en œuvre en Allemagne, mais surtout en Chine, aux Etats-Unis, en Inde, il est vraisemblable que les recherches en la matière débouchent assez vite (déjà aujourd'hui pour certains sujets, annoncés à 2026 pour d'autres) sur des applications ciblées, en complément ou remplacement de voies chimiques et pharmaceutiques classiques. De façon scientifiquement moins

¹⁷⁸ Wegamed et autres

¹⁷⁹ Electroporation 0,4kV à 1kV/cm, quelques microsecondes, irréversible ; ou électro-perméabilisation, 40kV/cm, quelques nanosecondes, réversible.

¹⁸⁰ L'effet placebo jouerait un rôle deux fois plus important pour les médicaments chimiques que pour les micro-courants dans le traitement de la dépression : 79% de placebo en moyenne pour les anti-dépresseurs chimiques (89% pour le Prozac), 37% en moyenne pour les micro-courants, selon : Gilula et al., Cranial electrotherapy stimulation review : a safer alternative to psycho-pharmaceuticals in the treatment of depression ; journal of neurotherapy ; 2005, vol 1(2), p7-26 ; Haworth Press

¹⁸¹ Société fondée en 2007 sur la stimulation par pulses du système nerveux parasymphatique pour réguler les réflexes inflammatoires et ainsi soigner les maladies auto-immunes telles que la maladie de Crohn, et les rhumatismes arthritiques ; <https://setpointmedical.com/company/>

assurée à ce stade, mais avec des ressources importantes, Tesla investit dans la perspective d'interfaces souples cerveau-machine généralisables et couplées à l'intelligence artificielle.

L'encadrement réglementaire de ce champ en plein développement est aussi impératif que son appropriation par les entreprises chimiques et pharmaceutiques.

b. En chimie, en applications agricoles et en bioproduction

Des ondes acoustiques sont déjà utilisées pour catalyser des réactions chimiques, ainsi que pour la stimulation, l'adaptation et la protection de plantes en plein champ ou sous serre, ou de micro-organismes en bioréacteurs (micro-algues, levures...), à des niveaux entre 55 et 100dB(A) selon les cas.

Dans ces nouveaux domaines des relations entre les ondes acoustiques et électromagnétiques et les fonctionnements du vivant, les entreprises sont demandeuses de chercheurs publics « *osant sortir des sentiers battus* ». Compte tenu du potentiel technico-économique de ces sujets, elles pourraient être sollicitées pour constituer un fond commun cofinçant des programmes précompétitifs, par exemple dans le cadre de la loi de programmation pluriannuelle de la recherche qui sera présentée au Parlement début 2020 pour une entrée en application début 2021. Ce fonds, doté d'un pilotage associant pouvoirs publics, acteurs économiques privés et société civile, pourrait avoir deux utilisations :

- Financer l'allongement d'un an des thèses dans les domaines concernés pour donner aux doctorants le temps de publier suffisamment tôt, et donc à l'ensemble de la recherche nationale de bénéficier des retours correspondants en termes de notoriété et de classement international ;
- Venir en appui aux programmes publics pluridisciplinaires en connaissances fondamentales dans les domaines concernés, en s'attachant à développer une diversité d'approches pour répondre aux questions posées.

5 UNE REGLEMENTATION PRECISE ET PROTECTRICE POUR LES TYPES D'EXPOSITION A RISQUE LES MIEUX DOCUMENTES MAIS SANS VERITABLE PORTEE SUR LES RISQUES POTENTIELS

5.1 La réglementation de l'exposition aux ondes sonores, fondée sur la lutte contre le bruit, met l'accent sur les fréquences audibles mais concerne peu les infrasons et les basses fréquences

5.1.1 La réglementation de l'exposition aux ondes sonores en milieu professionnel

Le cadre réglementaire de la prévention des risques liés à l'exposition au bruit s'inscrit dans une démarche globale pour les risques professionnels dont les principes généraux sont édictés par le Code du travail (article L. 4121-2).

L'évaluation des risques liés au bruit passe par une évaluation et si nécessaire un mesurage des niveaux de bruit auxquels les travailleurs sont exposés. Elle a pour objet de déterminer des indicateurs de risques, principalement niveau d'exposition sonore quotidienne exprimé en dB(A) et

niveau de pression acoustique de crête qui correspond à des bruits intenses mais courts et de décider des mesures de prévention appropriées.

Les règles de prévention des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs exposés au bruit sont déterminées d'une part par les articles R. 4213-5 à R. 4213-6 et d'autre part par les articles R. 4431-1 à R. 4437-4 du Code du travail.

Le suivi individuel de l'état de santé et l'information des travailleurs font l'objet des articles R.4435-2 à R4436-1.

Ces règles s'articulent autour de 3 axes :

➤ **L'action sur l'environnement de travail**

Elle consiste à réduire le bruit à la source, concevoir des machines silencieuses, informer sur le niveau sonore des machines, insonoriser dès leur conception les locaux où seront installés des équipements de travail susceptibles d'exposer les travailleurs à un niveau sonore quotidien supérieur à 85 dB(a), réduire la réverbération, limiter la propagation du bruit vers les autres locaux, réduire le bruit dans les locaux, mettre en œuvre les principes généraux de prévention, diminuer le niveau sonore dans les locaux de travail et utiliser les locaux conformément à leur destination.

➤ **L'évaluation des risques**

La réglementation prévoit que l'exposition au bruit peut être évaluée ou mesurée. La mesure du bruit dans l'entreprise permet d'apprécier précisément l'exposition des salariés. On utilise, en premier lieu, des mesures instantanées, effectuées avec un sonomètre, comprenant un microphone et son électronique. Ces mesures sont faites à hauteur d'oreille. On détermine ainsi les situations ou les lieux de travail les plus bruyants. Pour les salariés travaillant dans les zones trop bruyantes, on réalise des mesures suivant des méthodes normalisées (norme NF EN ISO 9612), soit à l'aide d'un exposimètre porté par le travailleur et mesurant en continu le niveau de bruit, soit à l'aide d'un sonomètre.

Le mesurage peut être effectué à la demande de l'employeur, du comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail (CHSCT), du médecin du travail voire de l'inspection du travail. L'évaluation du risque est du ressort de l'entreprise.

➤ **La protection des travailleurs exposés**

Les exigences de la réglementation varient en fonction des niveaux d'exposition : le dépassement de certains seuils déclenche une série d'actions à mettre en œuvre par le chef d'entreprise.

L'exposition est évaluée à partir de deux paramètres :

- **l'exposition moyenne quotidienne** (sur 8 heures : notée $L_{EX,8h}$)
- **l'exposition instantanée aux bruits très courts** (niveau crête : noté L_{PC}).

Chacun de ces deux paramètres est comparé à 3 seuils :

- **la valeur d'exposition inférieure déclenchant l'action (VAI)** : c'est le seuil le plus bas ; il déclenche les premières actions de prévention ;

- **la valeur d'exposition supérieure déclenchant l'action (VAS)** : c'est le 2^e seuil : il déclenche des actions plus sévères. En particulier des actions correctives doivent être mises en œuvre.
- **la valeur limite d'exposition (VLE)** : ce troisième seuil ne doit être dépassé en aucun cas. A la différence des seuils précédents, il prend en compte l'atténuation du bruit apportée par les protecteurs individuels.

Les tableaux figurant en annexe 3 (au I) donnent les valeurs de ces seuils pour chacun des deux paramètres d'exposition, puis les actions requises lorsqu'ils sont dépassés.

5.1.2 La réglementation de l'exposition aux ondes sonores dans la vie quotidienne

5.1.2.1 Les bruits de voisinage « ordinaires »

5.1.2.1.1 Principes

Ils sont réglementés par le code de la santé publique aux articles R. 1336-4 et suivants.

Sont inclus dans cette réglementation tous les bruits des voisinage à l'exception de ceux qui proviennent des infrastructures de transport et des véhicules qui y circulent, des aéronefs, des activités et installations particulières de la défense nationale, des installations nucléaires de base, des installations classées pour la protection de l'environnement ainsi que des ouvrages des réseaux publics et privés de transport et de distribution de l'énergie soumis à la réglementation prévue à l'article 19 de la loi du 15 juin 1906 sur les distribution d'énergie. Ces bruits font l'objet de réglementations spécifiques.

La réglementation prévoit qu'aucun bruit particulier ne doit, par sa durée, sa répétition ou son intensité, porter atteinte à la tranquillité du voisinage ou à la santé de l'homme, dans un lieu public ou privé, qu'une personne en soit elle-même à l'origine ou que ce soit par l'intermédiaire d'une personne, d'une chose dont elle a la garde ou d'un animal placé sous sa responsabilité.

Pour les bruits de voisinage ordinaire, l'article R. 1336-6 précise que, lorsque le bruit a pour origine une activité professionnelle ou une activité sportive, culturelle ou de loisirs, organisés de façon habituelle ou soumise à autorisation, l'atteinte à la tranquillité du voisinage ou à la santé de l'homme est caractérisée si l'**émergence globale** de ce bruit perçu par autrui est supérieure aux valeurs limites fixées par l'article R. 1336-7. Lorsque le bruit mentionné à l'alinéa précédent, perçu à l'intérieur des pièces principales de tout logement d'habitation, fenêtres ouvertes ou fermées, est engendré par des équipements d'activités professionnelles, l'atteinte est également caractérisée si l'**émergence spectrale** de ce bruit, définie à l'article R. 1336-8, est supérieure aux valeurs limites fixées au même article.

L'**émergence globale** est définie comme la différence entre le niveau de bruit ambiant, comportant le bruit particulier en cause, et le niveau du bruit résiduel constitué par l'ensemble des bruits habituels, extérieurs et intérieurs, correspondant à l'occupation normale des locaux et au fonctionnement habituel des équipements, en l'absence du bruit particulier en cause.

Les valeurs admises de l'émergence sont calculées à partir des valeurs de 5 décibels dB(A) en période diurne (de 7h00 à 22h00) et de 3 dB(A) en période nocturne (de 22h00 à 7h00). A ces valeurs s'ajoute un terme correctif, fonction de la durée cumulée d'apparition du bruit particulier (voir en annexe 3 II les modalités de prises en compte de la durée cumulée).

L'**émergence spectrale** est définie par la différence entre le niveau de bruit ambiant dans une bande d'octave normalisée, comportant le bruit particulier en cause, et le niveau de bruit résiduel dans la même bande d'octave, constitué par l'ensemble des bruits habituels, extérieurs et intérieurs, correspondant à l'occupation normale des locaux, en l'absence du bruit particulier en cause. Les valeurs limites de l'émergence spectrale sont de 7 dB dans les bandes d'octave normalisées centrées

sur 125 Hz et 250 Hz et de 5 dB dans les bandes d'octave normalisées centrées sur 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz et 4 000 Hz, donc sans infrasons ni ultrasons.

L'émergence globale et, le cas échéant, l'émergence spectrale ne sont recherchées que lorsque le niveau de bruit ambiant mesuré, comportant le bruit particulier, est supérieur à 25 dB(A) si la mesure est effectuée à l'intérieur des pièces principales d'un logement d'habitation, fenêtres ouvertes ou fermées, ou à 30 dB(A) dans les autres cas.

5.1.2.1.2 Modalités de mesure de bruit

Conformément à l'article R. 1336-6 du code de la santé publique, les mesures de bruit sont effectuées selon les modalités définies par un arrêté des ministres chargés de la santé, de l'écologie et du logement. L'arrêté du 5 décembre 2006 relatif aux modalités de mesurage des bruits de voisinage et la norme NF S 31-010 relative à la caractérisation et au mesurage des bruits de l'environnement fixent ces modalités. Les mesurages sont réalisés par des agents assermentés à l'aide d'un sonomètre intégrateur homologué de classe 1 ou de classe 2 au sens de la norme NF EN 61672-1. Les prescriptions concernant l'appareillage de mesure, les conditions de mesurage, les conditions météorologiques et l'acquisition des données de la méthode dite de « contrôle » de la norme NF S 31-010 doivent être respectées. Le matériel doit être homologué ou approuvé et à jour de ses vérifications périodiques.

5.1.2.1.3 Les sanctions applicables

Lorsqu'elle a constaté l'inobservation des dispositions réglementaires, l'autorité administrative compétente peut prendre une ou plusieurs des mesures prévues à l'article R. 1337-6 du code de la santé publique (contraventions de la 5^{ème} classe (amende de 1 500 euros maximum portée à 3000 euros en cas de récidive)).

L'autorité administrative compétente peut, indépendamment des poursuites pénales encourues, mettre en demeure l'exploitant ou le responsable de l'activité de satisfaire aux dispositions précitées dans un délai déterminé. Si à l'expiration de ce délai, il n'a pas été obtempéré à cette injonction, l'autorité administrative peut, après avoir mis l'intéressé en mesure de présenter sa défense :

- obliger l'exploitant ou le responsable de l'activité à consigner entre les mains d'un comptable public une somme correspondant au montant des travaux à réaliser, laquelle sera restituée au fur et à mesure de l'exécution des mesures prescrites ;
- faire procéder d'office, aux frais de l'exploitant ou du responsable, à l'exécution des mesures prescrites ;
- suspendre l'activité jusqu'à exécution des mesures prescrites.

5.1.2.1.4 La réglementation spécifique du tapage nocturne

L'article R. 623-2 du code pénal caractérise l'infraction de tapage nocturne (en principe, entre 22h et 7h, mais cela varie selon la saison considérée). L'auteur de tapage nocturne peut être condamné à une amende de 3^{ème} classe (450 € au plus) et au versement de dommages et intérêts. Le tapage nocturne concerne tout bruit perçu d'une habitation à l'autre ou en provenance de la voie publique, même s'il n'a troublé la tranquillité que d'une seule personne. Le constat de l'infraction se fait sans mesure acoustique.

5.1.2.1.5 La réglementation applicable aux lieux musicaux

Les lieux musicaux, en tant qu'activités bruyantes, sont régis par le code de l'environnement (articles R. 571-25 à R. 571-30). Ces textes découlent du décret du 15 décembre 1998 relatif aux prescriptions

applicables aux établissements ou locaux recevant du public et diffusant à titre habituel de la musique amplifiée.

Le décret impose aux exploitants de ces établissements de limiter à 105 dB (A) le niveau sonore moyen à l'intérieur de l'établissement et le niveau de crête à 120 dB. Il ne mentionne pas les basses fréquences.

La réglementation impose de faire réaliser une étude de l'impact des nuisances sonores afin que le propriétaire prenne en compte les nuisances occasionnées par son activité dans le voisinage.

Un arrêté fixe les conditions et méthodes de mesurage des niveaux sonores, les indicateurs complémentaires à prendre en compte conformément aux normes en vigueur et les mesures techniques destinées à préserver le public et l'environnement.

Les manquements aux prescriptions réglementaires peuvent être sanctionnés par l'amende prévue pour les contraventions de la 5^{ème} classe. Les préfets sont chargés de veiller à l'application de cette réglementation.

La sanction peut être assortie de la saisie du matériel, de la fermeture administrative provisoire de l'établissement en cause, de l'injonction de réaliser des travaux tels que la pose d'un limiteur de puissance, le réaménagement d'un sas d'entrée ou des travaux d'isolation ou d'interdictions précises en fonction de la situation.

5.1.2.2 Les réglementations spécifiques

5.1.2.2.1 La réglementation relative aux bruits émis par les installations classées

L'arrêté du 23 janvier 1997 fixe les dispositions et la méthode de mesure propres aux ICPE. Il reprend les principes généraux fixant la prééminence accordée à l'émergence et le mode de détermination des niveaux applicables en limites d'établissement (voir les valeurs limites en annexe 3-III).

Ne sont pas soumises à ce texte, certaines activités déjà réglementées par des arrêtés spécifiques : élevages de veaux de boucherie et/ou de bovins, élevages de vaches laitières et/ou mixtes et porcheries de plus de 450 porcs ainsi que les élevages de volailles et/ou de gibiers à plumes, verreries, papeteries, cimenteries, installations d'incinération de résidus urbains, exploitations de carrières et installations de premier traitement des matériaux de carrières.

5.1.2.2.2 Les réglementations relatives aux transports

Non soumis aux dispositions générales du code de la santé publique, les matériels (automobiles, deux-roues motorisés) et les installations relatives aux transports (routes, aéroports, voies ferrées) font l'objet de réglementation spécifiques en matière de bruit (voir plus en détail en annexe 3-IV les spécificités de chaque secteur des transports en matière de bruit).

S'agissant des véhicules terrestres, l'article R. 318-3 du code de la route prévoit que les véhicules à moteur « ne doivent pas émettre de bruits susceptibles de causer une gêne aux usagers de la route ou aux riverains ».

S'agissant des nuisances sonores provenant des aéroports, la loi n° 92-1444 du 31 décembre 1992 relative à la lutte contre le bruit a institué un dispositif d'aide à l'insonorisation des logements riverains des dix plus grands aérodromes nationaux (Roissy, Orly, Marseille, Nice, Toulouse, Lyon, Bordeaux, Strasbourg, Mulhouse et Nantes).

S'agissant des infrastructures de transports terrestres (routes, voies ferrées), le code de l'environnement impose à l'article L. 571-9 la prise en compte du bruit dans toute construction ou

modification d'une infrastructure de transports terrestres. Le dossier de demande d'autorisation des travaux relatifs à ces aménagements et infrastructures, soumis à enquête publique, comporte les mesures envisagées pour supprimer ou réduire les conséquences dommageables des nuisances sonores.

5.1.3 Un préalable à l'approfondissement éventuel de la réglementation : la poursuite des recherches sur les effets physiologiques potentiels de l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores

La littérature concernant les effets sanitaires des basses fréquences n'est pas encore décisive. Tel est le cas en particulier de l'avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'expertise « Évaluation des effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens » (février 2017).

Dans cet avis, qui porte sur la question particulière des parcs éoliens, l'ANSES rappelle que les éoliennes émettent des infrasons (bruits inférieurs à 20 Hz) et des basses fréquences sonores mais qu'il existe également d'autres sources d'émission d'infrasons qui sont d'origine naturelle (vent notamment) ou anthropique (poids-lourds, pompes à chaleur, etc.). De manière générale, les infrasons ne sont audibles ou perçus par l'être humain qu'à de très forts niveaux.

L'expertise met en évidence le fait que les mécanismes d'effets sur la santé regroupés sous le terme «*vibroacoustic disease*», rapportés dans certaines publications, ne reposent sur aucune base scientifique sérieuse. Un faible nombre d'études scientifiques se sont intéressées aux effets potentiels sur la santé des infrasons et basses fréquences produits par les éoliennes. L'examen de ces données expérimentales et épidémiologiques ne mettent pas en évidence d'argument scientifique suffisant en faveur de l'existence d'effets sanitaires liés aux expositions au bruit des éoliennes, autres que la gêne liée au bruit audible et un effet nocebo, qui peut contribuer à expliquer l'existence de symptômes liés au stress ressentis par des riverains de parcs éoliens.

Le rapport relève cependant que « des connaissances acquises récemment sur la physiologie du système cochléo-vestibulaire ont révélé chez l'animal l'existence d'effets physiologiques induits par l'exposition à des infrasons de forts niveaux. Ces effets, bien que plausibles chez l'être humain, restent à démontrer pour des expositions à des niveaux comparables à ceux observés chez les riverains de parcs éoliens. Par ailleurs, le lien entre ces effets physiologiques et la survenue d'un effet sanitaire n'est aujourd'hui pas documenté. »

Dans ce contexte, l'ANSES recommande, en matière d'études et de recherches :

- de vérifier l'existence ou non d'un possible mécanisme de modulation de la perception du son audible par des infrasons de niveaux comparables à ceux mesurés chez les riverains de parcs éoliens ;
- d'étudier les effets de la modulation d'amplitude du signal acoustique sur la gêne ressentie liée au bruit ;
- d'étudier l'hypothèse de mécanismes d'effets cochléo-vestibulaires pouvant être à l'origine d'effets physiopathologiques ;
- de réaliser une étude parmi les riverains de parcs éoliens qui permettrait d'identifier une signature objective d'un effet physiologique.

L'ANSES conclut que les connaissances actuelles en matière d'effets potentiels sur la santé liés à l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores ne justifient ni de modifier les valeurs limites existantes, ni d'étendre le spectre sonore actuellement considéré.

D'autres études sont prévues; ainsi, le laboratoire CNRS de mécanique et d'acoustique de Marseille, technopole de Château-Gonthier, dispose d'un ensemble de chambres acoustiques de grande qualité, dont une chambre infrasonore pouvant aller jusqu'à 130dB. Les protocoles sont multidisciplinaires.

Compte tenu des résultats obtenus sur les ondes électromagnétiques en suivant parallèlement le métabolisme thermique des rats, là où aucun effet isolé direct n'était mis en évidence, il paraît judicieux d'examiner rigoureusement de même si l'acoustique a un impact, positif ou négatif, sur certains fonctionnements de base des organismes vivants.

Les industriels de la musique sont actifs dans le domaine des basses fréquences sonores et de la santé. Il est possible de protéger les personnes, il sera bientôt possible de réhabiliter des déficits acquis et de fournir des médicaments réparateurs. Des essais cliniques sont en cours de préparation.

5.2 La réglementation de l'exposition aux champs électromagnétiques est précise en matière professionnelle mais se limite à des dispositions générales de précaution pour le grand public

L'Union européenne a produit la recommandation 1999/519/EC destinée au public et la directive 2013/35/UE à destination des professionnels.

La recommandation européenne 1999/519/EC définit :

- des valeurs biologiques limites pour éviter les effets sanitaires portant sur le champ électrique induit E_i (V/m), la densité de courant j (A/m²) et le débit d'absorption spécifique DAS (W/Kg). Ces valeurs sont définies pour l'intérieur de la cible biologique et donc non mesurables ;
- des grandeurs physiques qui permettent de garantir le respect des valeurs limites biologiques : induction magnétique (T) ou champ magnétique (A/m), champ électrique (V/m), densité de puissance (W/m²).

La philosophie de la recommandation consiste à appliquer au seuil d'effet critique connu (mais non légal) un facteur de réduction de 50. Ainsi, pour la téléphonie mobile, le seuil d'effet critique en matière de DAS est de 4 W/kg pour une exposition corps entier et de 100 W/kg pour une exposition locale. La recommandation européenne prévoit de ne pas dépasser respectivement 0,08 W/kg et 2 W/kg, seuils définis en respectant une marge de précaution par rapport à l'obtention calculée ou modélisée des valeurs internes précédentes.

La mise en œuvre de la recommandation varie selon les pays : par exemple pour la téléphonie mobile dans la bande 900 MHz, la recommandation européenne indique une limite de 41,2 V/m pour le champ électrique induit (DAS 0,08 W/kg). La France retient ce seuil mais la Ville de Paris a défini une charte limitant le champ électrique induit à 5 V/m, la Flandre l'a fixé à 21,6 V/m, l'Italie à 20 V/m, la ville de Bruxelles à 6 V/m. Il en résulte une grande confusion : pour une même recommandation et une même base scientifique, les lectures et les interprétations sont variables et les facteurs de sécurité appliqués sont différents.

5.2.1 La réglementation applicable en France en matière de réseaux de télécommunications

Le décret n°2002-775 du 3 mai 2002 s'applique aux exploitants de réseaux de télécommunications. Ils doivent veiller à ce que le niveau d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements des réseaux de télécommunications et par les installations radioélectriques qu'ils exploitent soit inférieur à certaines valeurs (cf. annexe 3- V).

Le cumul d'expositions est prévu puisque, lorsque plusieurs équipements ou installations radioélectriques sont à l'origine des champs électromagnétiques en un lieu donné, les exploitants de réseaux de télécommunications doivent veiller à ce que le niveau d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis globalement par l'ensemble des équipements et installations concernés, et déterminé par une formule de calcul indiquée dans le décret, soit inférieur aux valeurs limites fixées.

5.2.2 La réglementation de protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques

En application de la directive 2013/35/UE rectifiée du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques), le décret n°2016-1074 du 3 août 2016¹⁸² a créé les articles R. 4453-1 et suivants du code du travail.

Ce décret, entré en vigueur le 1^{er} janvier 2017, vise à protéger les travailleurs contre les effets biophysiques directs et indirects dus à ces champs. Il fixe d'une part des **valeurs limites d'exposition (VLE)**, valeurs qui sont internes à l'organisme, et en deçà desquelles il n'existe pas d'effets biophysiques directs et indirects connus et, d'autre part, des **valeurs déclenchant l'action (VA)** que l'on peut mesurer au poste de travail et en deçà desquelles les VLE sont respectées. Si ces VA sont dépassées, des moyens de prévention, répondant aux principes généraux de la prévention des risques professionnels, doivent être mis en œuvre.

Ces dispositions ne sont pas exigées si les valeurs déclenchant l'action ne concernent que les effets biophysiques directs, et si l'employeur a démontré que les valeurs limites d'exposition ne sont pas dépassées et que les risques pour la sécurité peuvent être écartés.

Les zones et les lieux de travail où les VA sont susceptibles d'être dépassées doivent être identifiés et faire l'objet d'une signalisation spécifique. Enfin l'employeur doit prendre en compte cette exposition potentielle pour les personnes à risques particuliers : porteurs d'implants actifs ou passifs, porteurs de dispositifs médicaux externes, femmes enceintes.

5.2.3 L'exposition du grand public aux champs électromagnétiques : un principe de sobriété posé par la loi du 9 février 2015 qui reste à préciser scientifiquement

La loi n°2015-136 du 9 février 2015¹⁸³, dite loi « Abeille » vise à constituer une première étape pour contribuer à la sobriété de l'exposition de la population aux champs électromagnétiques et renforcer l'information et la concertation lors de l'implantation d'installations radioélectriques. Un comité

¹⁸² https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000032974358

¹⁸³

https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=A48C1E1B344BFEFBC13E491D64FDD78C.tplgr32s_3?cidTexte=JORFTEXT000030212642&categorieLien=id

national de dialogue relatif aux niveaux d'exposition du public aux champs électromagnétiques est mis en place au sein de l'Agence nationale des fréquences.

La loi demande notamment aux entreprises dans le domaine des télécommunications de modérer leurs émissions d'ondes. Avant toute mise en place de produits émettant des ondes électromagnétiques majeures, ces sociétés devront réaliser une concertation du public concerné par cette exposition.

Une autre partie de la loi Abeille porte sur la modification de la loi Grenelle 2 pour davantage contrôler et réduire les ondes émises. Les produits tactiles (tablettes et téléphones) émettant des ondes devront également davantage être encadrés dans leur publicité, une campagne de prévention de la bonne utilisation des téléphones mobiles étant prévue. Les enfants devront être protégés de l'exposition continue aux ondes, alors que leur organisme n'est pas encore mature. Le Wi-Fi est ainsi interdit dans certains établissements publics. Les espaces d'accueil, de repos et d'activité des enfants de moins de 3 ans, garderies et crèches ne seront plus équipés d'appareil sans fil.

Le rapport de présentation de la loi révèle la conscience du Parlement de légiférer en situation d'incertitude scientifique sur l'existence d'un lien entre l'exposition aux ondes électromagnétiques et les risques sanitaires. Néanmoins, le Parlement a considéré qu'il était de sa responsabilité d'adapter le cadre juridique applicable « pour prévenir la survenance d'un drame sanitaire, répondre aux inquiétudes de nos concitoyens et assurer le respect des principes constitutionnels de notre pays, au premier rang desquels celui de *vivre dans un environnement équilibré et respectueux de la santé* ».

En dépit des précautions parlementaires, l'adoption de cette loi a été interprétée par certains comme une preuve de la dangerosité du Wi-Fi.

Enfin, il faut noter que les éventuels impacts des RNI ne sont pas considérés comme assurables par la réassurance¹⁸⁴.

Pour conforter scientifiquement les dispositions de la loi Abeille, le cas échéant les restreindre ou les étendre, il est essentiel d'accélérer les travaux de recherches sur les effets cumulatifs des champs électromagnétiques, tout particulièrement dans le contexte d'émergence de la 5G et d'explosion du marché des objets connectés.

L'agence de sécurité nucléaire et de protection des radiations australiennes (ARPANSA) recommande une limite à 1000 mG (soit 1000µT) pour une exposition de 24h. L'agence internationale de recherche sur le cancer inclut les champs électromagnétiques supérieurs à 2mG dans les causes possibles de cancer. Enfin, le ministre de la santé israélien recommande un maximum de 4mG. Sur certaines voitures hybrides, des radiations de 14 à 30mG en conduite normale et jusqu'à 100mG en accélération ont été mesurées (<https://www.thetruthaboutcars.com/2010/03/israel-preps-worlds-first-hybrid-car-radiation-scale/>).

¹⁸⁴ **Electromagnetic Field Insurance Policy Exclusion Are The Standard** : *Electromagnetic Fields Are Covered in "Pollutant" Policy Enhancements* (<https://ehtrust.org/key-issues/electromagnetic-field-insurance-policy-exclusions/>)

6 RECOMMANDATIONS

Recommandation n° 1. Faire plus entrer les industries françaises chimiques et pharmaceutiques dans la course internationale aux usages des ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques

- 1) L'utilisation des ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques pourrait représenter un levier et un risque concurrentiel sérieux à court et moyen termes pour les secteurs de la chimie, de la pharmacie et de l'agrochimie (économie d'énergie et de polluants, dynamisme de la production de dispositifs médicaux portables pour médecine ambulatoire, financements importants publics et privés dans divers pays : Chine, Allemagne, Corée, Etats-Unis, Russie, Royaume-Uni...). Le ministère de l'économie et le CNI devraient inciter les entreprises à développer la recherche et l'utilisation des ondes électromagnétiques et acoustiques pour la catalyse industrielle et la fourniture de services, notamment l'étude et l'utilisation des ondes sonores ou électromagnétiques pour stimuler ou orienter des réactions de bio-production en milieu confiné, ainsi que celles des ondes acoustiques en milieu ouvert (résistance des plantes à la sécheresse, aux maladies, productivité), par exemple via des appels à projets type DARPA 2016 vis-à-vis des entreprises et des pôles de compétitivité compétents¹⁸⁵.
- 2) Concernant les thérapies humaines, animales ou végétales qui visent à rectifier des fonctionnements enzymatiques ou membranaires, les ministères de la recherche, de l'économie, de la santé, de l'écologie et de l'agriculture devraient organiser des financements transdisciplinaires collaboratifs réunissant des spécialistes des ondes acoustiques et électromagnétiques, de biologie cellulaire, de biologie quantique, de médecine et d'agronomie, afin de développer des acteurs français scientifiques et économiques sur ces champs devant la montée en puissance des majors de la e-tech sur ces sujets.
- 3) A l'instar d'autres pays, les ministères de la recherche et de l'économie pourraient inciter les fabricants de matériels de mesure de laboratoire à collaborer avec les chercheurs pour la conception et le déploiement des équipements correspondants, pour permettre aux équipementiers comme aux équipes et institutions de recherche de se maintenir au meilleur niveau international.
- 4) Les ministères de l'économie et de la défense devraient organiser un recensement et des transferts depuis la recherche publique et privée militaire, dans ce secteur déjà très investi par de grands pays.
- 5) Le Conseil général de l'Economie pourrait être sollicité pour examiner les conditions de constitution des pôles ou réseaux d'excellence sur ces sujets à l'étranger et leur transférabilité en France.

¹⁸⁵ AlphaRLH, Eurobiomed, SCS...

Recommandation n° 2. Ouvrir davantage le dispositif français de recherche aux voies moins classiques en matière de champs électromagnétiques non ionisants et acoustiques

- 6) Les programmes du MESRI et de l'ANR devraient prévoir que la recherche publique investisse plus largement le champ des phénomènes vibratoires et du vivant pour mieux placer la France et ses entreprises dans la course internationale sur le sujet. Pour repérer et soutenir les voies en rupture, les ministères concernés (recherche, écologie, santé, économie, défense) devraient soutenir sur moyen terme des équipes et programmes pluridisciplinaires¹⁸⁶, à l'instar de l'Allemagne et des Pays-Bas sur l'interface biophysique, biochimie et biologie, par exemple dans le cadre de l'ANR¹⁸⁷. Les entreprises étant en ces domaines demandeuses de chercheurs publics « osant sortir des sentiers battus », elles pourraient être sollicitées pour constituer un fonds commun cofinçant ces programmes précompétitifs, par exemple dans le cadre de la loi de programmation pluriannuelle de la recherche qui sera présentée au Parlement début 2020 pour une entrée en application début 2021. Le dispositif doit permettre à différentes approches scientifiques des mêmes questions de se développer, notamment grâce à un pilotage associant pouvoirs publics, acteurs économiques privés et société civile.
- 7) L'INSERM pourrait lancer et piloter un programme interdisciplinaire de recherche sur l'utilisation des ondes non ionisantes électromagnétiques notamment basses fréquences et acoustiques en santé humaine.
- 8) Le programme lancé début 2019 par le CEA et l'IRBA pour recenser les effets connus des ondes électromagnétiques devrait être étendu aux ondes acoustiques et impliquer en tant que de besoin le département de biologie quantique du CEA.
- 9) L'IRSN devrait voir ses compétences étendues aux ondes électromagnétiques non ionisantes.
- 10) En matière de biologie des champs électromagnétiques et acoustiques, le ministère de la recherche devrait étudier avec les autres ministères concernés comment instaurer des conditions plus favorables aux recherches en rupture sur moyen terme, complétant les appels à projets ciblés sur 3 ans qui privilégient les travaux à résultats peu risqués et favorisant la constitution d'équipes stables sur des sujets en rupture¹⁸⁸. Le ministère pourrait par exemple tester la réintégration d'une partie des crédits de l'ANR au sein des organismes publics de recherche dont les objectifs seraient complétés dans cette direction.
- 11) Le ministère de la recherche devrait étudier l'adaptation de la durée des thèses en ces domaines au temps de publication des résultats, aujourd'hui sous-valorisés par la limite de trois ans, ce qui réduit l'efficacité des fonds publics et pénalise le classement international de la France et de ses établissements de recherche. Le fonds commun proposé précédemment pourrait cofinancer cette possibilité d'allongement des thèses dans les domaines concernés.
- 12) L'Agence de l'innovation de défense pourrait être impliquée dans la conception et le financement de ce programme pour la recherche de ruptures fondamentales.

¹⁸⁶ Ex : Université de Picardie (biologistes et spécialistes des radiofréquences), Institut Hubert Curien (physiciens, biologistes et éthologues), etc.

¹⁸⁷ AVIESAN et ALLENI

¹⁸⁸ Cette réflexion pourrait s'étendre aux sujets émergents liés au fonctionnement des organismes et écosystèmes.

Recommandation n° 3. Compléter les études sur les effets des champs électromagnétiques et acoustiques, notamment sur la 5G et les objets connectés

13) De nouvelles études ciblées sur l'animal et la modélisation doivent être lancées notamment via les programmes de l'ANSES, qui a été missionnée en ce sens en janvier 2019 :

- a. l'ANSES et le ministère de la recherche devraient aider à standardiser la qualité méthodologique des protocoles expérimentaux, en particulier concernant les divers effets potentiels des radiofréquences et basses fréquences acoustiques sur le stress oxydant, l'activité des neurones dans le cerveau, les périodes de sommeil paradoxal, les potentiels auditifs, et les performances cognitives ;
- b. via des appels à projets et le fonds commun de cofinancement précompétitif, travailler sur les effets non-thermiques des champs électromagnétiques et acoustiques (polarisation des cellules, ouvertures des canaux ioniques, variations de perméabilité de la membrane cellulaire) ; effectuer des travaux sur plusieurs générations d'animaux, sur leur reproduction et leur développement ; vérifier l'existence de fréquences caractéristiques du corps humain (organes et composants, microbiote) et vérifier les effets ou l'innocuité des signaux modulés de communication, y compris ceux utilisés en médecine¹⁸⁹ par rapport à ces fréquences ;
- c. dans le cadre des appels à projets du Programme National de Recherche Environnement Santé Travail (PNREST), approfondir la caractérisation des effets éventuels des radiofréquences sur la thermorégulation et le système immunitaire, et faire figurer les travaux complémentaires souhaités dans le rapport sur l'hypersensibilité électromagnétique qui doit être remis au Parlement à l'automne 2019 ; examiner si les ondes acoustiques basse fréquence seraient susceptibles d'influer positivement ou négativement sur ces systèmes ; introduire ces informations dans les groupes de travail du Plan National Santé Environnement 4 (PNSE4) devant remettre leurs rapports fin 2019.

14) Des études épidémiologiques adaptées au nouvel exposome devraient être organisées :

- a. Des travaux sur l'exposome résultant de la 5G et des objets connectés devraient être rapidement coordonnés par l'ANSES et l'ANFR, pour établir en particulier un scénario d'exposition composé de modules correspondant aux divers équipements qu'un individu pourrait rencontrer au quotidien¹⁹⁰, afin de disposer d'un outil de concertation et de prévention d'un point de vue sanitaire et environnemental. Les chercheurs français pourraient se rapprocher de leurs collègues européens pour établir un programme commun dans le cadre Horizon Europe.

¹⁸⁹ Réseaux corporels de capteurs/émetteurs ou *Body Area Network* (norme *Ultra Wide Band*)

¹⁹⁰ à préciser à mesure des connaissances sur les terminaux effectivement mis en place

- b. Un suivi plus précis des populations exposées aux radiofréquences dans leur activité professionnelle devrait être organisé par le ministère de la santé; pour ce faire, les opérateurs de communications électroniques, radio et télévision pourraient analyser les données de leurs mutuelles de santé spécifiques¹⁹¹. Les populations potentiellement plus fragiles (enfants, femmes enceintes, personnes âgées, sujets épileptiques, personnes souffrant de diverses maladies, porteurs d'implants actifs) devraient être particulièrement suivies.
- 15) Les Etats membres et l'UE devraient développer des travaux d'analyse et d'épidémiologie sur les cumuls d'exposition, dans le cadre du programme Horizon Europe : radiofréquences et polluants chimiques, basses fréquences et polluants chimiques, résonances éventuelles entre fréquences utilisées simultanément. Une étude épidémiologique autour d'antennes de puissance à basses fréquences serait utile. Ce programme devrait aussi intégrer l'exploration des ondes acoustiques basses fréquences et infrasons liées aux motorisations électriques.

Recommandation n° 4. Contribuer à l'encadrement en expertise, en norme et en droit national, européen et international des usages des ondes

- 16) Les ministères de l'économie, de la santé et des affaires européennes devraient proposer d'élaborer au niveau européen une régulation technico-juridique des usages médicaux et cosmétiques¹⁹² des ondes électromagnétiques, pour en permettre un développement sûr et loyal dans un contexte prévisible de foisonnement concurrentiel. Le Guichet Unique Santé pourrait être mobilisé pour tester cliniquement des dispositifs médicaux reposant sur les utilisations des ondes électromagnétiques et acoustiques.
- 17) Dans le mandat de l'AFNOR devrait être introduit la prise en compte des cumuls d'exposition les plus probables pour la normalisation des émissions des objets connectés, terminaux et antennes, notamment des phénomènes de résonances et d'interférences fréquentielles. La France devrait pousser cette réflexion au CEN et à l'ISO.
- 18) Pour sécuriser et optimiser le développement des nouveaux usages des ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques, tant pour les entreprises que pour les utilisateurs, les pouvoirs publics devraient organiser en leur sein une forte capacité d'évaluation des techniques correspondantes, en réunissant les compétences scientifiques et techniques nécessaires notamment du point de vue de la santé, des finances publiques et de l'environnement. Ces évaluations devraient bénéficier d'une transparence satisfaisante et d'un équilibre des sources publiques et privées. Cette recommandation devrait s'appliquer de façon générale aux techniques émergentes susceptibles d'utilisations multiples.
- 19) Les réglementations nationales et européennes concernant les ondes devraient s'adapter à l'évolution des connaissances et prendre en compte les effets cumulés. Par exemple, les définitions des émergences globale et spectrale ainsi que l'encadrement des lieux musicaux devraient davantage reposer sur l'échelle G qui prend mieux en compte les sources d'infrasons et d'ultrasons.

¹⁹¹ Cf. chaire Orange IMT

¹⁹² Ces appareils n'ont pas de norme en UE, contrairement à leur situation aux Etats-Unis

Recommandation n° 5. Contribuer à une coordination européenne et internationale de la recherche précompétitive sur les ondes magnétiques et les ondes acoustiques

- 20) Le ministère de l'économie et le ministère de la recherche, avec l'appui de l'Académie des technologies, devraient identifier les principaux centres de compétences scientifiques et techniques dans le monde sur la biologie des ondes électromagnétiques et acoustiques, qui concerne des secteurs industriels très divers, ainsi que les conditions de leur constitution afin de les transposer le cas échéant.
- 21) Les ministères de l'économie, de la recherche et des affaires européennes devraient soutenir une coordination au moins européenne en matière de protocoles et dispositifs de mesure pour la biologie des champs électromagnétiques et acoustiques compte tenu des croisements disciplinaires nécessaires et du coût des équipements, notamment en lien avec les enjeux potentiels de santé humaine.

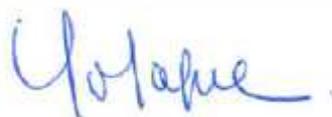
Recommandation n° 6. Accompagner le développement des outils connectés par l'information des citoyens.

- 22) L'ANFr et le ministère de la santé devraient poursuivre dans la durée la sensibilisation des utilisateurs en fonction du progrès des connaissances, les informer sur les niveaux maximaux d'exposition des divers équipements (téléphones sans fil, téléphonie cellulaire, tablettes, compteurs et autres objets communicants, équipements ménagers...), et leur proposer des moyens simples pour réduire leur exposition (mesure des niveaux du champ, règles de bon usage).
- 23) L'accès des citoyens aux études et évaluations publiques des usages et effets de ces techniques doit être garanti dans la durée.

Dominique DRON
Ingénieure générale des Mines



Yves MAGNE
Administrateur civil hors classe



Ilarion PAVEL
Ingénieur en chef des
Mines



ANNEXE 1 : LETTRE DE MISSION

Paris, le 1^{er} JUIN 2018**CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ÉCONOMIE**
DE L'INDUSTRIE, DE L'ÉNERGIE ET DES TECHNOLOGIESTELEDOC 792
BATIMENT NECKER
120, RUE DE BERCY
75572 PARIS CEDEX 12Affaire suivie par :
Téléphone : 01 53 18
Télécopie : 01 53 18 57 15
Mél. :
Dossier N° 4 4 5

Le Vice-président

à

Dominique DRON
Harion PAVEL
Robert PICARD
Yves MAGNE

Objet : Mission sur les enjeux des usages industriels et commerciaux des nouvelles fréquences des rayonnements non ionisants. Thème 2018-2019 de la section Sécurité-Risques.

Les usages des fréquences électromagnétiques, ou rayonnements non-ionisants (RNI), sont en plein essor dans les pays développés comme dans les pays émergents. L'internet des objets communicants (IoT), les perspectives de la 5G en matière de radiocommunications, avec les terminaux mobiles, les dispositifs médicaux et leurs applications innovantes en sont des illustrations. Ces utilisations du spectre électromagnétique se développent dans des gammes de fréquence, notamment les basses fréquences, jusqu'ici peu exploitées et peu étudiées.

Les RNI peuvent comporter des effets biologiques thermiques, non thermiques et sensoriels, pouvant nécessiter une action, comme le prévoit une réglementation spécifique de l'Union européenne en matière d'exposition des personnes. Ces mêmes effets peuvent aussi être source d'innovations pour les entreprises et le grand public avec des applications thérapeutiques, vétérinaires, phytosanitaires, de sécurité ou de sûreté des lieux accueillant du public, que ces applications soient spatiales, terrestres ou maritimes...

Si l'encadrement apparaît bien établi aux plans national, européen et international pour les rayonnements ionisants, pour lesquels un dispositif de radioprotection a été établi pour permettre les usages civils de sources radioactives, il n'en est pas aujourd'hui de même pour beaucoup de RNI, dont les communautés scientifiques spécialisées en bio-électromagnétisme mettent d'ailleurs rarement en valeur les usages bénéfiques qui pourraient être attendus d'une innovation responsable en ce domaine.

Il apparaît donc opportun d'examiner simultanément les perspectives et les limites des usages industriels des RNI, en particulier dans une optique de protection des organismes et systèmes vivants, et notamment de leur biorésilience définie comme la capacité d'un système biologique à conserver ou retrouver un fonctionnement viable (restauration, développement, reproduction) après avoir subi une perturbation importante.

Compte tenu des enjeux économiques, techniques, environnementaux et sociétaux du sujet, je souhaite que vous lanciez, au sein de la section Sécurité et Risques du Conseil général, une réflexion qui permettrait de répondre aux questions suivantes :

- 1°) Quel est l'état de lieux de l'écosystème français en matière d'usages industriels des RNI, ses forces et ses faiblesses ?
- 2°) Quelles sont les bio-vulnérabilités les plus sensibles de ces usages ?
- 3°) Quels sont les risques et opportunités crédibles des développements technologiques concernés tout notamment à des horizons de 5 ou 10 ans ?
- 4°) Quels axes d'action pour les pouvoirs publics, le monde de la recherche et le monde économique peuvent permettre le meilleur équilibre possible entre la poursuite de l'innovation, le développement économique et la sécurité biologique dans un contexte de développement de l'usage des RNI ?
- 5°) Quelles mesures concrètes serait-il opportun de mettre en œuvre, aux plans national, européen et international, en analysant pour chacune la faisabilité juridique, technique et économique ?

Dans un premier temps, vous élaborerez d'ici la fin septembre 2018 une note de cadrage d'au plus une dizaine de pages visant à affiner le périmètre de la mission et esquisser les premières propositions à tester auprès des diverses parties prenantes. Vous veillerez particulièrement à ce que vos travaux s'appuient sur une recherche bibliographique et s'inscrivent en complément de ceux réalisés tant par le ministère de l'économie, par d'autres ministères et leurs établissements publics, en particulier ceux chargés de la santé, de l'agriculture, de l'écologie et de la recherche. Votre travail sera conduit sous l'égide de la section Sécurité et Risques et en référerez régulièrement à sa présidente.

Sur la base de la note de cadrage, nous évaluerons alors ensemble l'opportunité et les modalités d'approfondissement de vos travaux. La note de cadrage attendue devra préciser la ou les formes que pourrait prendre cet approfondissement.



Luc ROUSSEAU

ANNEXE 2 : LISTE DES PERSONNES RENCONTRÉES

Nom	Fonction	Organisme	Date
Françoise Gaill	Présidente de plusieurs conseils scientifiques ; ex-directrice de l'institut INEE du CNRS	Plateforme Océan et climat ; flotte océanographique française ; PSL environnement	13/06/18
Pascal Jean Lopez	Directeur OHM Port Caraïbe	MNHN	juin 2018 tel
Rodney O'Connor	<i>Associate Professor Head Department of Bioelectronics</i>	Ecole des Mines Saint-Etienne à Gardanne	11/07/18 et 19/07/18 tel ; Intervention en section Sécurité Risques le 150119
Isabelle Lagroye	Directrice du laboratoire IMS, Université de Bordeaux	École Pratique des Hautes Études GRET CEDI - UMR 5218	23/07/18 tel ; Intervention en section Sécurité Risques le 131118
Olivier Gallet	Directeur de l'Unité ERRMECe (Equipe de Recherche sur les Relations Matrice-Extracellulaire/Cellule)	Université de Cergy-Pontoise	31/08/18 et 20/12/18 tel. Intervention en section Sécurité Risques le 150119
François Monnet	Vice-président	Solvay	16/10/18
Patrick Maestro	Directeur scientifique	Solvay	22/10/18 tel
Olivier Merckel Olivia Roth-Delgado Aurélie Niaudet Lucile Migault	Unité Evaluation des risques liés aux agents physiques	ANSES	20/11/18
Anne Goldberg	Senior Principal Scientist	Solvay	22/11/18 tel
Jean-Pierre Libert	Laboratoire PERITOX, Centre Universitaire de Recherche en Santé - INERIS	Amiens, Université de Picardie Jules Verne	04/12/18 tel
Bruno Robert	directeur du laboratoire de biologie quantique	CEA	07/12/18 tel
Paul Avan	Laboratoire de biophysique sensorielle, médecin	Université d'Auvergne	17/12/18 tel
Jacques-Aurélien Sergent	<i>Corporate Product Safety Toxicologist</i>	Solvay	20/12/18 tel
Pedro Ferrandiz Michel Duhamel	Directeur général, directeur scientifique	Genodics	08/01/19
Denis Abraham	Directeur adjoint de l'Innovation	IMT	23/01/19
Guillaume Lacroix Jean-Louis Gerstenmayer Elodie Adam Grégoire Postel-Vinay Christian Ravier	Adjoint au Chef du service industrie ; sous-directeur chimie matériaux ; sous-directrice biologie et santé ; chef de la mission stratégie ; service économie numérique	DGE	01/04/19

Benoît Marin Caroline Paul Anne-Marie Gallot Aurélie Chaigneau	Adjoint à la Sous-directrice de la politique des produits de santé et de la qualité des pratiques et des soins	DGS	02/04/09
Gilles Brégant Jean-Pierre Luguern Jean-Benoît Agnani	Directeur général, directeur de la stratégie, directeur adjoint de la stratégie	ANFr	11/04/19
Guillaume Andéol	Médecin chef, Neurosciences et Sciences Cognitives	Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA), Département Neurosciences et Sciences Cognitives	29/03/19
Jean-Claude Debouzy	Médecin chef de services, Biophysique et radiobiologie	Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA)	01/04/19 tel
Elisabeth Verges, Patrick Garda, Anne Paoletti, Xavier Montagne	Chef du service stratégie ; chef de bureau nanos et techniques de l'information ; cheffe du bureau biologie et santé ; chef du bureau énergie	DGRI	09/04/09
Philippe Bodenez Natalie Commeau	Chef du service des risques sanitaires liés à l'environnement ; cheffe du bureau du bruit et agents physiques	DGPR	06/05/19 (tel)

ANNEXE 3 : RÉGLEMENTATIONS EN VIGUEUR

I -Les seuils réglementaires de l'exposition aux ondes sonores en milieu professionnel

SEUILS	PARAMÈTRES	RÉGLEMENTATION
Valeur d'exposition inférieure déclenchant l'action (VAI)	Exposition moyenne (Lex,8h)	80 dB(A)
	Niveau de crête (Lp,c)	135 dB(C)
Valeur d'exposition supérieure déclenchant l'action (VAS)	Exposition moyenne (Lex,8h)	85 dB(A)
	Niveau de crête (Lp,c)	137 dB(C)
Valeur limite d'exposition (VLE*)	Exposition moyenne (Lex,8h)	87 dB(A)
	Niveau de crête (Lp,c)	140 dB(C)

* en tenant compte de l'atténuation liée au port éventuel de protecteurs individuels contre le bruit (PICB).

NIVEAU D'EXPOSITION	EXIGENCE
Quel que soit le niveau	<p>Évaluation du risque</p> <p>Suppression ou réduction au minimum du risque, en particulier à la source</p> <p>Consultation et participation des travailleurs pour l'évaluation des risques, les mesures de réduction, le choix des protecteurs individuels contre le bruit (PICB)</p> <p>Bruit dans les locaux de repos à un niveau compatible avec leur destination</p>
Au-dessus de la valeur d'exposition inférieure déclenchant l'action(VAI) Lex, (8h) ≥80 dB(A) ou Lp,c ≥135 dB(C)	<p>Mise à disposition des PICB</p> <p>Information et formation des travailleurs sur les risques et les résultats de leur évaluation, les PICB</p> <p>Examen audiométrique préventif proposé</p>

NIVEAU D'EXPOSITION	EXIGENCE
Au-dessus de la valeur d'exposition supérieure déclenchant l'action (VAS) $L_{ex, (8h)} \geq 85 \text{ dB(A)}$ ou $L_{p,c} \geq 137 \text{ dB(C)}$	Mise en œuvre d'un programme de mesures de réduction d'exposition au bruit Signalisation des endroits concernés (bruyants) et limitation d'accès Contrôle de l'utilisation effective des PICB
Au-dessus de la valeur limite d'exposition (VLE) (compte tenu de l'atténuation du PICB) $L_{ex, (8h)} 87 \text{ dB(A)}$ et $L_{p,c} 140 \text{ dB(C)}$	Adoption immédiate de mesures de réduction du bruit Identification des causes de l'exposition excessive et adaptation des mesures de protection

II - Terme correctif apporté pour le calcul de l'émergence globale en fonction de la durée cumulée d'apparition du bruit.

Durée cumulée d'apparition du bruit particulier : t	Terme correctif en dB(A)
t ≤ 1 minute (la durée de mesure du niveau de bruit ambiant est étendue à 10 secondes lorsque t < 10 secondes)	6
1 minute < t ≤ 5 minutes	5
5 minutes < t ≤ 20 minutes	4
20 minutes < t ≤ 2 heures	3
2 heures < t ≤ 4 heures	2
4 heures < t ≤ 8 heures	1
t > 8 heures	0

Par exemple, pour une durée cumulée supérieure à 8 heures, le terme correctif est 0, l'émergence reste fixée à 3 dB(A) la nuit ou à 5 dB(A) le jour. En revanche, pour une nuisance sonore ayant, entre 22h00 et 7h00, une durée cumulée de 20 à 45 minutes, la correction est de 3, et l'émergence admissible est de 6 dB(A) (3+3). Plus la durée du bruit se prolonge, moins le terme correctif est important. Il apparaît normal d'être clément lorsque le bruit apparaît sur un laps de temps court, alors qu'un bruit se prolongeant de façon excessive ne doit pas être excusable.

III – Les limites d'émergence sonore spécifiquement applicables aux installations classées

(arrêté du 23 janvier 1997)

Prééminence accordée à l'émergence et aux niveaux en limites d'établissement

Valeurs admissibles d'émergence

Niveau de bruit ambiant existant dans les zones à émergence réglementée* (incluant le bruit de l'établissement)	Émergence admissible pour la période allant de 7 heures à 22 heures, sauf dimanches et jours fériés	Émergence admissible pour la période allant de 22 heures à 7 heures, ainsi que les dimanches et jours fériés
Supérieur à 35 dB(A) et inférieur ou égal à 45 dB(A)	6 dB(A)	4 dB(A)
Supérieur à 45 dB(A)	5 dB(A)	3 dB(A)

* Zone à émergence réglementée : intérieur des immeubles habités ou occupés par des tiers, existant à la date de l'arrêté d'autorisation de l'installation et leurs parties extérieures éventuelles les plus proches (cour, jardin, terrasse)

Les niveaux admissibles en limites de propriété ne peuvent excéder 70 dB(A) pour la période de jour et 60 dB(A) pour la période de nuit, sauf si le bruit résiduel pour la période considérée est supérieur à cette limite.

IV – Les réglementations relatives aux transports aériens et terrestres.

S'agissant des véhicules terrestres, l'article R. 318-3 du code de la route qui s'applique aux automobiles comme aux motocyclettes, cyclomoteurs et vélomoteurs prévoit que les véhicules à moteur « ne doivent pas émettre de bruits susceptibles de causer une gêne aux usagers de la route ou aux riverains ». Notamment, les moteurs doivent être munis d'un dispositif silencieux, en bon état de fonctionnement. L'échappement libre est interdit, ainsi que toute opération tendant à le supprimer ou à réduire l'efficacité du dispositif d'échappement silencieux.

S'agissant des nuisances sonores provenant des aéroports, la loi n° 92-1444 du 31 décembre 1992 relative à la lutte contre le bruit a institué un dispositif d'aide à l'insonorisation des logements riverains des dix plus grands aérodromes nationaux (Roissy, Orly, Marseille, Nice, Toulouse, Lyon, Bordeaux, Strasbourg, Mulhouse et Nantes). Depuis le 1er janvier 2004, l'attribution de cette aide financière est confiée aux exploitants de ces aérodromes (chambres de commerce et d'industrie par exemple). Cette aide est financée par la taxe sur les nuisances sonores aériennes (TNSA). La TNSA est collectée par les services de la DGAC et elle est affectée à l'exploitant de l'aérodrome sur lequel le décollage a lieu. La gestion administrative du dispositif a été confiée aux exploitants des aérodromes concernés. La TNSA se distingue par le fait que son produit est spécifiquement affecté au financement des aides aux riverains de l'aérodrome concerné. L'échelle décibel utilisée a été complétée par rapport à l'échelle A initiale pour prendre en compte les ultrasons.

S'agissant des infrastructures de transports terrestres (routes, voies ferrées), le code de l'environnement impose à l'article L571-9 la prise en compte du bruit dans toute construction ou modification d'une infrastructure de transports terrestres. Le dossier de demande d'autorisation des travaux relatifs à ces aménagements et infrastructures, soumis à enquête publique, comporte les mesures envisagées pour supprimer ou réduire les conséquences dommageables des nuisances sonores. La construction d'une infrastructure de transports terrestres nouvelle ainsi que la modification ou la transformation significative d'une infrastructure de transports terrestres existante sont accompagnées de mesures destinées à éviter que le fonctionnement de l'infrastructure ne crée des nuisances sonores excessives. Des arrêtés fixent les indicateurs de gêne pour les infrastructures routières (arrêté du 5 mai 1995 complété par une circulaire n°97-110 du 12 décembre 1997) et pour les infrastructures ferroviaires (arrêté du 8 novembre 1999).

V – Les seuils réglementaires en France pour le niveau d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements des réseaux de télécommunications et par les installations radioélectriques qu'ils exploitent

(Décret n°2002-775 du 3 mai 2002)

Valeurs limites d'exposition du public

GAMME DES FRÉQUENCES	INDUCTION magnétique (mT)	DENSITÉ de courant S (mA/m ²) (valeur efficace)	MOYENNE DAS pour l'ensemble du corps (W/kg)	DAS localisé (tête et tronc) (W/kg)	DAS localisé (membres) (W/kg)	DENSITÉ de puissance S (W/m ²)
0 Hz	40	-	-	-	-	-
> 0-1 Hz	-	8	-	-	-	-
1.4 Hz	-	8/f	-	-	-	-
4-1 000 Hz	-	2	-	-	-	-
1 000 Hz-100 kHz	-	f/1500	-	-	-	-
100 kHz-10 MHz	-	f/500	0,08	2	4	-
10 MHz-10 GHz	-	-	0,08	2	4	-
10-300 Ghz	-	-	-	-	-	10

Ces valeurs sont réputées respectées lorsque le niveau des champs électromagnétiques émis par les équipements et installations radioélectriques concernés est inférieur aux niveaux de référence ci-dessous :

Niveaux des champs

GAMME de fréquences	E(V/m)	H(A/m)	B(μ T)	DENSITÉ de puissance équivalente en onde plane Seq (W/m ²)
0-1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	-
1-8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8-25 Hz	10 000	$4\,000/f$	$5\,000/f$	-
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	-
3-150 kHz	87	5	6,25	-
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	-
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	-
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2 000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,003\,7 f^{1/2}$	$0,004\,6 f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

ANNEXE 4 : LES FILIALES MÉDICALES BIOÉLECTRONIQUES D'ALPHABET

La filiale Google Venture (GV) est un fond de placement qui réalise des investissements dans les jeunes entreprises spécialisées dans les nouvelles technologies, en particulier biotech, comme Adimab, Iperian Inc¹⁹³, 23andMe, Calico ou encore Verily. GV a soutenu plus de 50 startups dans le domaine de la santé et des sciences de la vie dont les ambitions consistaient à réduire la souffrance et accroître l'espérance de vie humaines. Le montant des soutiens de GV s'échelonne de 100 k\$ à plusieurs centaines de millions. Ainsi, GV considère que les startups dans le domaine des sciences de la vie ont le potentiel de devenir les futures « Tech mega-corporations »¹⁹⁴. Les entreprises soutenues par GV développent des technologies parfois si nécessaires qu'elles intéressent de près les pouvoirs publics. À ce titre, 5 entreprises de son portfolio sont devenues publiques en 2017 ; l'entreprise 23andMe, spécialisée dans le séquençage du génome, devrait devenir publique rapidement¹⁹⁵.

En 2007, Adimad¹⁹⁶ a lancé la première technologie de découverte et d'optimisation d'anticorps de l'industrie pharmaceutique. Par ailleurs, Iperian Inc¹⁹⁷ développe des dispositifs thérapeutiques utilisant les cellules comme modèles de maladie humaine. Elle réalise ainsi l'industrialisation de cellules souches pluripotentes pour les maladies neurodégénératives. Quant à 23andMe¹⁹⁸, elle propose à ses clients d'établir une analyse de leur code génétique pour 99 USD (en 2018). Calico¹⁹⁹ lutte contre le vieillissement et les maladies associées avec dans le cadre du projet « Tuer la mort » (trans-humanisme) et Verily²⁰⁰ mène des recherches sur les sciences de la vie.

La bioélectronique ne constitue pas l'unique secteur d'investissement d'Alphabet dans le domaine des produits de santé et des dispositifs médicaux portables. En effet, Alphabet entend étendre sa position aux différentes étapes du soin, du diagnostic à la thérapie en passant par le suivi des patients. À ce titre, Google s'associe à des entreprises présentant des domaines d'expertises spécifiques et ciblés et développent avec elles des produits de santé innovants avec pour objectif de lancer à terme ces dispositifs sur le marché. C'est notamment le cas du partenariat Google-Novartis pour le développement des « *smart contact lens* » permettant la mesure de la glycémie. Ce projet, lancé en 2014, est à destination des personnes souffrant de diabète afin qu'elles puissent contrôler/surveiller leur glycémie en temps réel en mesurant le glucose présent dans leurs larmes. Bien que les résultats actuels de ces lentilles de contact ne soient pas probants, ce phénomène illustre les enjeux concurrentiels posés aux industries pharmaceutiques qui ne disposent pas en leur sein d'expertise technologique.

¹⁹³ <https://www.bloomberg.com/research/stocks/private/snapshot.asp?privcapId=46011438>

¹⁹⁴ <http://uk.businessinsider.com/gv-alphabet-vc-arm-pouring-billions-health-startups-life-expectancy2017-8>

¹⁹⁵ <https://www.cnn.com/2018/03/30/alphabet-gv-life-sciences-and-health-investments-going-public.html>

¹⁹⁶ *In 2007, Adimab launched the pharma industry's premier antibody discovery and optimization technology. Leveraging several decades of research in the labs of yeast biotechnology pioneers Dane Witttrup (MIT) and Tillman Gerngross (Dartmouth), Adimab has established an entirely new standard in human antibody discovery and optimization. Adimab's technology is designed around clearly articulated performance metrics. Adimab integrates all aspects of antibody discovery, from human library design to bio-manufacturing. The Adimab yeast has been extensively engineered to transport high quality, whole IgGs through the secretory pathway, and then present them on the surface (selection mode) or secrete them directly into the medium (secretion mode) thereby obviating the need for reformatting between discovery and production. Adimab delivers a broad panel of fully human, full-length, monoclonal antibodies to its partners that are superior to the output from any other platform.*

¹⁹⁷ *iPierian, Inc. discovers and develops therapeutics using cells as models of human disease. It offers industrialization of induced pluripotent stem cell technology. The company develops therapies for neurodegenerative disease, focused on discovering monoclonal antibodies against targets of the Tau protein. It focuses on neurological diseases including spinal muscular atrophy, amyotrophic lateral sclerosis, and Alzheimer's disease. The company was formerly known as iZumi Bio, Inc. and changed its name to iPierian, Inc. in July 2009. The company was founded in 2007 and is based in South San Francisco, California.*

¹⁹⁸ <https://fr.wikipedia.org/wiki/23andMe>

¹⁹⁹ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Calico_\(entreprise\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Calico_(entreprise))

²⁰⁰ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Verily>

ANNEXE 5 : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Effets cellulaires des ondes électromagnétiques

Sherrard RM, Morellini N, Jourdan N, El-Esawi M, Arthaut L-D, Niessner C, et al. (2018) Low-intensity electromagnetic fields induce human cryptochrome to modulate intracellular reactive oxygen species. *PLoS Biol* 16(10): e2006229.

ANSES, Cahiers de la recherche 2017 : Yves Le Dréan, Ondes millimétriques et cellules nerveuses ; Michel Mallat, Effet des ondes GSM 1800Mhz sur les cellules microgliales et la neurotransmission dans un contexte neuroinflammatoire

El Khoueiry, Moretti, Lagroye, Veyret, and Lewis, *Neurophysiology* 2018

Debouzy JC, Crouzier D, Ballester B and Foerster M, Active Probe Emitting HF Electromagnetic Fields and Piezoelectric Emissions in Association with Local Carbon Nanotubes : Preliminary Tests in C6 Glioma Cell Death Induction: A Possible Application in Glioblastoma Therapeutics ? *Biomedical*, ISSN: 2574 -1241 DOI: 10.26717.BJSTR.2019.14.002563

Blackman J : Treating cancer with amplitude-modulated electromagnetic fields : a potential paradigm shift, again ? *Br J Cancer*. 2012 Jan 17; 106(2): 241–242. doi: [10.1038/bjc.2011.576](https://doi.org/10.1038/bjc.2011.576)

Zimmerman JW, Pennison MJ, Brezovich I, Yi N, Yang CT, Ramaker R, Absher D, Myers RM, Kuster N, Costa FP, Barbault A, Pasche B: Cancer cell proliferation is inhibited by specific modulation frequencies. *Br J Cancer*. 2012 Jan 17; 106(2):307-13.

Barbault A, Costa FP, Bottger B, Munden RF, Bomholt F, Kuster N, Pasche B: Amplitude-modulated electromagnetic fields for the treatment of cancer: discovery of tumor-specific frequencies and assessment of a novel therapeutic approach. *J Exp Clin Cancer Res*. 2009 Apr 14; 28:51

Jimenez H., O'Connor R. et al : Use of non-ionizing electromagnetic fields in the treatment of cancer. *Frontiers In Bioscience, Landmark*, 23, 284-297, January 1, 2018

Zhadobov M (2006) : Effet des ondes millimétriques au niveau cellulaire, thèse université Rennes 1 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00121677/document>

Non-invasive radiofrequency diagnostics of cancer. The Bioscanner —Trimprob technology and clinical applications, Clarbruno Vedruccio, Carla Ricci Vedruccio, *Journal of Physics: Conference Series* 329 (2011) 012038

Concetta De Cicco, Luigi Mariani, Clarbruno Vedruccio, Carla Ricci, *Clinical Application of Spectral Electromagnetic Interaction in Breast Cancer, Tumori* 92(3):207-12, May 2006

Ruigrok et al., Activation of the TRPV1 Thermoreceptor Induced by Modulated or Unmodulated 1800 MHz Radiofrequency Field Exposure, *Radiation Research*, 189(1):95-103.

Henry Lai, Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields, *Bioinitiative 2012 section 6, supplément 2014* (department of Bioengineering, Univ. of Washington, Seattle), mars 2014, preparation for the Bioinitiative Working Group

Vian et al. 2016, Plant responses to HF electric fields, *Biomed research international*

Tang et al. (2018) Electromagnetic Radiation Disturbed the Photosynthesis of *Microcystis aeruginosa* at the Proteomics Level. *Scientific Reports*. Vol. 8, Article number: 479

Effets cellulaires des ondes acoustiques

Ratnesh Chandra Mishra, Ritesh Ghosh and Hanhong Bae, Plant acoustics: in the search of a sound mechanism for sound signaling in plants, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 67, No. 15 pp. 4483–4494, 2016 doi:10.1093/jxb/erw235)

Fernandez-Jaramillo et al., 2018, Effects of acoustic waves on plants: an agricultural, ecological, molecular and biochemical perspective, *Scientae Horticulturae* 235 (218) 340-348

Zhao et al., Effect of sound stimulation on *Dendranthema morifolium* callus growth, Beijing, 2002 *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 29 (2003) 143-147

Observations et expérimentations sur les organismes (ondes électromagnétiques)

Champs électromagnétiques, environnement et santé, SFRP, dirigé par Anne Perrin et Martine Souques, 2011

Human Exposure to Electromagnetic Fields, Patrick Staebler, Wiley 2017

Les Cahiers de la Recherche, 2017, ANSES, dont : Anne-Sophie Villégier, Effets des champs électromagnétiques GSM sur des modèles de vulnérabilité cérébrale : inflammation et gestation

Effets sanitaires liés aux champs électromagnétiques basses fréquences, ANSES, avril 2019

<https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2013SA0038Ra.pdf>

Exposition aux radiofréquences et santé des enfants, ANSES, juin 2016

<https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2012SA0091Ra.pdf>

Radiofréquences et santé, ANSES, avril 2013

<https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2011sa0150Ra.pdf>

Quantification de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à l'intérieur des bâtiments, ER-712-100003-712-QIN, François Gaudaire, Alain Monard, Christophe MArtinsons, CSTB, 10 octobre 2011

Olle Johansson, Disturbance of the immune system by electromagnetic fields, *Pathophysiology* 16(2009) 157-177

Hardell L. et al., Increased concentrations of certain POPs in subjects with self-reported electromagnetic hypersensitivity – A pilot study, *Electromagnetic Biology and Medicine*, 27: 197–203, 2008

A. Pelletier et al. (2014) Does exposure to a radiofrequency electromagnetic field modify thermal preference in juvenile rats ? *PLOS One* June 2014:9:6 e99007

N. Loos, JP Libert et al. (2013), Is the effect of mobile phone radiofrequency waves on human skin perfusion non-thermal ?, *Microcirculation* 20 : 629-636

INERIS, Les cahiers de la recherche Santé Environnement Travail mai 2017

J.-C. Debouzy , D. Crouzier, V. Dabouis R. Malabiau, C. Bachelet, A. Perrin, Biologic effects of millimetric waves (94 GHz). Are there long term consequences? *Pathologie Biologie* 24 février 2006

Non-thermal GSM RF and ELF EMF effects upon rat BBB permeability, Henrietta Nittby et al., *Environmentalist* (2011) 31:140–148 DOI 10.1007/s10669-011-9307-z

Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields, Henry Lai, Bioinitiative 2012 section 6, supplément 2014 (department of Bioengineering, Univ. of Washington, Seattle) , mars 2014, preparation for the Bioinitiative Working Group

Gilula et al., Cranial electrotherapy stimulation review : a safer alternative to psycho-pharmaceuticals in the treatment of depression ; *journal of neurotherapy* ; 2005, vol ̑(2), p7-26 ; Haworth Press

NTP technical report on the toxicology and carcinogenesis studies in Hsd: Sprague-Dawley rats exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (900MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones, nov. 2018

CIRC, Volume 80, Non-ionizing radiation, part 1: Static and extremely low-frequency electric and magnetic fields, 2002

Vincent Dabouis, Philippe Arvers, Jean-Claude Debouzy, Charles Sebbah, David Crouzier and Anne Perrin, First epidemiological study on occupational radar exposure in the French Navy: a 26-year cohort study, *International Journal of Environmental Health Research*, 2015
<http://dx.doi.org/10.1080/09603123.2015.1061112>

David Roux · Alain Vian · Sébastien Girard · Pierre Bonnet · Françoise Paladian · Eric Davies · Gérard Ledoigt, *Planta* (2008) 227:883–891, DOI 10.1007/s00425-007-0664-2, High frequency (900 MHz) low amplitude (5 V m⁻¹) electromagnetic field: a genuine environmental stimulus that affects transcription, translation, calcium and energy charge in tomato

Hermanus Ruigrok, thèse 2017, Etude en temps réel des effets cellulaires et moléculaires des champs électromagnétiques radiofréquences environnementaux, Université de Bordeaux, Biochimie

Observations et expérimentations sur les organismes (ondes acoustiques)

Monica Gagliano, 2012, Green symphonies : a call for studies on acoustic communication in plants, *Behavioral Ecology*, doi :10.1093/beheco/ars206, 25 novembre 2012

Ratnesh Chandra Mishra, Ritesh Ghosh and Hanhong Bae, Plant acoustics: in the search of a sound mechanism for sound signaling in plants, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 67, No. 15 pp. 4483–4494, 2016 doi:10.1093/jxb/erw235)

Appel and Cocroft, 2014, Plants respond to leaf vibrations caused by insect herbivore chewing, *Oecologia*, 1-10

Fernandez-Jaramillo et al., 2018, Effects of acoustic waves on plants : an agricultural, ecological, molecular and biochemical perspective, *Scientae Horticulturae* 235 (218) 340-348

Hassanien et al. 2014, Advances in effects of sound waves on plants, *Journal of Integrative Agriculture* 13, 335-348

Da Silva et Dobranszki, 2014, Sonication and ultrasound : impact on plant growth and development, *Plant Cell Tissue and Organ Culture* 117 131-143

Prévost V. et al, Diffusions of sound frequencies designed to target dehydrins induce hydric stress tolerance onto *Pisum sativum* seedings. (à paraître)

Nicolas Jones, The quest for quieter seas, *Nature* vol 568, 11 april 2019, 158-161

ANNEXE 6 : LISTE DES ACRONYMES

ADN	Acide désoxyribonucléique
AFNOR	Association française de normalisation
AMM	Autorisation de mise sur le marché
ANFr	Agence Nationale des fréquences (France)
ANR	Agence nationale de la recherche (France)
ANSES	Agence Nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (France)
ARN	Acide ribonucléique
ARPANSA	Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (Australie)
ATP	Adénosine triphosphate
AVIESAN	Alliance nationale pour les sciences de la vie et de la santé (France)
CD	Compact Disc
CDMA	Code Division Multiple Access
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (France)
CEN	Comité européen de normalisation
CETIM	Centre technique des industries mécaniques (France)
CGE	Conseil général de l'économie
CIRC	Centre international de recherche sur le cancer
CNAM	Conservatoire national des arts et métiers
CND	Contrôle non destructif
CNI	Conseil national de l'industrie (France)
CNRS	Centre national de la recherche scientifique (France)
CORDIS	Community Research and Development Information Service- Union Européenne
CUVG	Centre d'usinage à grande vitesse
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency (Etats-Unis)
DAS	Débit d'absorption spécifique
DVD	Digital Versatile Disc
EMAI	Imagerie acoustique électromagnétique
ENS	Ecole normale supérieure
ERC	European Research Council - Union européenne
FDA	Food and Drugs Administration (Etats-Unis)
GAFA	Google-Apple-Facebook-Amazon
GSM	Global System for Mobile Communications
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IMS Bordeaux	Laboratoire Intégration du matériau au système Université de Bordeaux
IMT	Institut Mines-Telecom
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques (France)
INRS	Institut national de recherche et de sécurité (France)
INSERM	Institut national de la santé et de la recherche médicale (France)
IoT	Internet of Things (internet des objets)
IR	Infrarouge
IRBA	Institut de recherche biomédicale des armées (France)

IRM	Imagerie par résonance magnétique
ISO	International Organization for standardization (Organisation internationale de normalisation)
LED	Light-emiting diode (diode électroluminescente)
MESRI	Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation (France)
OCDE	Organisation de coopération et de développement économique
OMS	Organisation mondiale de la santé
ORL	Oto-rhino-laryngologie
PAFT	Générateur de fréquences acoustiques
PNREST	Programme national de recherche environnement-santé-travail
PNSE	Plan national santé -environnement
RF	Radiofréquences
RFID	Radio Frequency Identification
RMN	Résonance magnétique nucléaire
RNI	Rayonnements non-ionisants
ROS	<i>Reactive oxigen species</i> : espèces réactives oxygénées (radicaux oxydants)
RX	Rayons X
SFRP	Société Française de Radioprotection
SPL	Sound pressure level
SV	Vibrations acoustiques
TRL	Technology readiness level (niveau de maturité technologique)
TRP	Transient receptor potential
TÜV	Technischer Überwachungsverein (association d'inspection technique) Allemagne
UE	Union Européenne