

Article de synthèse

B. Blake Levitt*, Henry C. Lai et Albert M. Manville II

Effets des champs électromagnétiques non ionisants sur la flore et la faune, partie 1. Augmentation des niveaux de CEM ambients dans l'environnement

<https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0026>

Reçu le 19 février 2021 ; accepté le 20 mars 2021 ; publié en ligne le 27 mai 2021

Résumé : Les niveaux ambients de champs électromagnétiques (EMF) ont fortement augmenté au cours des 80 dernières années, créant une nouvelle exposition énergétique qui n'existe pas auparavant. Les dernières décennies ont vu des augmentations exponentielles dans presque tous les environnements, y compris les zones rurales/éloignées et les régions à basse atmosphère. En raison de leur physiologie unique, certaines espèces de flore et de faune sont sensibles aux CEM exogènes d'une manière qui peut dépasser la réactivité humaine. Il existe aux États-Unis des données de référence limitées, mais complètes, datant des années 1980, auxquelles on peut comparer les nouvelles enquêtes importantes menées dans différents pays. Celles-ci fournissent désormais des données plus larges et plus précises sur les expositions transitoires et chroniques potentielles de la faune et des habitats. Des effets biologiques ont été observés sur l'ensemble des taxons et des fréquences à des intensités extrêmement faibles, comparables aux expositions ambiantes actuelles. De larges effets sur la faune ont été observés sur l'orientation et la migration, la recherche de nourriture, la reproduction, l'accouplement, la construction de nids et de tanières, le maintien et la défense du territoire, la longévité et la survie. Des effets cytotoxiques et génotoxiques ont été observés. Les questions ci-dessus sont examinées dans trois parties consécutives : La partie 1 s'interroge sur la capacité des CEM ambients d'aujourd'hui à nuire à la faune, avec une urgence accrue concernant les technologies 5G. La partie 2 explore les champs naturels et artificiels, les mécanismes de magnéto-réception des animaux et les études pertinentes pour tous les règnes de la faune. La troisième partie examine les normes d'exposition actuelles, les lois applicables et les orientations futures. Il est temps

de reconnaître les CEM ambients comme une nouvelle forme de pollution et d'élaborer des règles au sein des organismes de réglementation qui désignent l'air comme un "habitat" afin que les CEM puissent être réglementés comme d'autres polluants. La perte de la vie sauvage est souvent invisible et non documentée jusqu'à ce que les points de basculement soient atteints. Les normes d'exposition chronique à long terme à de faibles niveaux de CEM, qui n'existent pas encore, devraient être fixées en conséquence pour la faune et la flore, et les lois environnementales devraient être strictement appliquées.

Mots-clés : 2G - 4GLTE ; 5G ; tours/mâts/stations de base/petites cellules de téléphonie cellulaire ; " Internet des objets " (IoT) ; magnéto-réception ; ondes millimétriques (MMW) ; champs électromagnétiques non ionisants (EMF) ; rayonnement radiofréquence (RFR) ; satellites ; faune et flore sauvages.

PARTIE 1 : DÉFINIR LE PROBLÈME : LA TECHNOLOGIE ET L'AUGMENTATION DES NIVEAUX D'EMF

Introduction : la déconnexion environnementale

Depuis l'avènement de l'électrification à la fin des années 1800 et des communications sans fil dans les années 1930, les niveaux ambients de rayonnement provenant des appareils, des installations de radiodiffusion, des infrastructures de télécommunications terrestres, des satellites et des applications militaires ont progressivement augmenté sur une gamme de fréquences dans les bandes non ionisantes du spectre électromagnétique. Les effets des champs électromagnétiques (CEM) non ionisants sur l'homme ont fait l'objet d'un large débat dans les médias et ailleurs, en particulier depuis que le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a classé les champs magnétiques de fréquences extrêmement basses (ELF) et les rayonnements de radiofréquences (RFR) ([1, 2] respectivement) dans la catégorie 2B des agents cancérogènes possibles pour l'homme - comme le plomb, les gaz d'échappement, le DDT et le formaldéhyde. Mais l'augmentation de l'exposition aux champs électromagnétiques ambients - en particulier les RFR - provenant des appareils de communication mobile, des antennes WiFi et de toutes les infrastructures qui les accompagnent ne présente-t-elle pas un inconvénient environnemental plus important, qui est négligé par les organismes de santé publique ,

*Auteur correspondant : B. Blake Levitt, P.O. Box 2014, New Preston, CT 06777, USA, E-mail : blakelevitt2@gmail.com, blakelevit@cs.com Henry C. Lai, Département de bio-ingénierie, Université de Washington, Seattle, WA, USA, E-mail : hla@uw.edu

Albert M. Manville II, Advanced Academic Programs, Krieger School of Arts and Sciences, Environmental Sciences and Policy, Johns Hopkins University, Washington DC Campus, USA, E-mail : amanvil1@jhu.edu

les écologistes, les chercheurs et les régulateurs gouvernementaux. Il se peut que nous passions à côté d'effets physiologiques critiques sur les espèces en nous fondant sur des hypothèses obsolètes selon lesquelles les expositions à des champs lointains de faible intensité sont trop faibles pour avoir des effets néfastes sur les tissus vivants. Nous n'avons pas encore pris en considération les physiologies uniques des autres espèces, ni la façon dont elles utilisent l'environnement d'une manière différente de celle des humains, lorsque nous supposons que l'utilisation sans entrave des CEM/RFR peut se poursuivre sans relâche et être autorisée à se développer indéfiniment. Les champs électromagnétiques ambients, tels que les CEM provenant des lignes électriques, des câblages et des appareils électriques, et les RFR utilisés dans tous les appareils de diffusion, de communication sans fil et de transmission, sont biologiquement actifs et peuvent avoir des effets néfastes sur différentes espèces d'organismes vivants.

En raison de l'ampleur des recherches qui s'appliquent à ce sujet, cet ouvrage est divisé en trois parties consécutives :

La première partie explore les recherches sur l'augmentation des niveaux ambients de CEM, la façon dont les champs sont mesurés, l'utilisation de dispositifs de suivi chez les animaux et ce que les nouvelles technologies comme la 5G vont apporter.

La deuxième partie explore les champs géomagnétiques naturels de la Terre et les mécanismes de magnéto-réception des espèces non humaines, ainsi que les effets cyto- et génotoxiques des CEM d'origine humaine. Elle se concentre sur les physiologies uniques des espèces non humaines, leurs habitats spécifiques et la façon dont l'énergie se propage dans les différents environnements. La section établit ensuite un lien entre ce qui a été observé en laboratoire, ainsi que les études sur le terrain, pour toutes les fréquences et les taxons biologiques représentatifs, à des expositions maintenant observées dans les environnements ambients.

La troisième partie traite des normes d'exposition gouvernementales et explore les lois déjà en place dans les pays occidentaux, puis indique comment une nouvelle vision de l'aéroécologie et de l'électroécologie peut utiliser ces lois pour informer la politique concernant les impacts des rayonnements non ionisants.

Les documents supplémentaires comprennent des tableaux complets des études applicables par section à des expositions d'intensité extrêmement faible et les références correspondantes.

Il existe de nombreuses recherches sur la façon dont les CEM de faible niveau affectent les espèces non humaines, y compris des études approfondies sur les rayonnements non ionisants dans toutes les fréquences et tous les environnements, dont de nombreux environnementalistes et régulateurs ne sont pas conscients [3-14]. Dans le cadre de la recherche sur les effets biologiques des CEM, on sait depuis les années 1960 que de nombreuses espèces sont sensibles aux expositions à l'énergie de faible niveau. De nombreuses études en laboratoire et sur le terrain ont mis en évidence une sensibilité accrue et des effets néfastes chez les oiseaux [15-32], les mammifères (vaches et chauves-souris [33-38]), les insectes [39-54], les bactéries/protozoaires [55-61], les amphibiens [62-67], les poissons et les tortues [68-82], ainsi que chez les arbres et les plantes [83-85], entre autres.

Les organismes vivants ont évolué dans une matrice de champs électromagnétiques non ionisants de l'environnement, en particulier le rayonnement terrestre.

le champ géomagnétique. Ces champs naturels sont nécessaires pour que les organismes se portent bien et vivent en harmonie. Par exemple, on sait depuis longtemps que le champ géomagnétique est nécessaire pour coordonner le développement embryonnaire et fournir des informations pour la migration directionnelle des insectes et des oiseaux. Ces champs sont relativement faibles et varient également en fonction du lieu. Pendant des millions d'années, les organismes vivants ont vécu et prospéré dans ces champs. Il est donc logique de penser que les champs créés par l'homme, qui ne sont pas familiers aux organismes vivants, pourraient perturber leurs fonctions physiologiques normales. Et cela pourrait se produire à des intensités très faibles de ces champs inconnus. La prolifération des systèmes de communication sans fil, en particulier, pourrait constituer un défi dangereux pour les organismes vivants sur Terre. En outre, il existe un défi plus difficile à relever, à savoir que ces nouvelles expositions aux CEM ne permettent pas aux organismes vivants de s'adapter ou de s'ajuster, car les caractéristiques de signalisation de la technologie changent rapidement à mesure que de nouvelles technologies apparaissent et sont constamment développées.

Malgré les preuves qui s'accumulent, les cercles environnementaux n'ont pas tenu compte de l'éventualité de conséquences graves liées à l'augmentation des CEM cumulés provenant d'appareils tels que les téléphones cellulaires, les smartphones/tablettes (iPods, iPads, Kindles), l'Internet sans fil (WiFi, 2G, 3G, 4G, 4G LTE, et maintenant l'"Internet des objets" 5G), l'infrastructure des tours/antennes nécessaire pour prendre en charge de vastes services sans fil, et les récents systèmes de réseaux/compteurs "intelligents" construits dans les pays industrialisés par de nombreuses sociétés de services publics, ainsi que l'industrie automobile avec des dispositifs anti-collision/détection à distance maintenant intégrés dans les véhicules, entre autres. En fait, de grandes organisations nationales comme le Natural Resources Defense Council [86] et le Sierra Club [87] sont des partisans actifs des réseaux/compteurs intelligents et d'autres technologies sans fil au nom de la conservation de l'énergie, sans tenir compte des effets biologiques des CEM. Cependant, lorsque les organisations n'abordent pas la base de données croissante des impacts des CEM, le résultat est l'approbation tacite et/ou explicite de l'introduction de nouvelles couches entières de CEM dans chaque maison et chaque quartier, sans un examen complet des - conséquences potentielles. Aux États-Unis, les agences de réglementation de la protection de l'environnement, tant au niveau fédéral qu'au niveau des États, sont également des partisans de la technologie des réseaux intelligents [88], sans aucune mention des effets possibles des CEM sur la faune.

Cette déconnexion s'explique notamment par le fait que de nombreux biologistes ne connaissent pas les recherches existantes et/ou ne possèdent pas les connaissances spécialisées en bioélectromagnétique nécessaires pour évaluer les recherches publiées. Il existe également un manque de familiarité - et souvent un faible niveau de confort - avec la discipline transversale de la bioélectromagnétique, ainsi qu'un préjugé professionnel ou un sentiment d'intimidation chez les biologistes à l'égard des sciences "dures" que sont la physique et la chimie.

l'ingénierie, qui sont les foyers naturels de la technologie. En fait, à l'exception de l'adoption de la technologie pour faciliter divers objectifs de recherche, comme l'insertion de micropuces RFID et/ou l'installation d'émetteurs radio sur des animaux sauvages afin de suivre leur migration, leur comportement et leurs modes de reproduction, les biologistes peuvent sembler peu intéressés par les effets des CEM environnementaux sur les systèmes vivants. Ils semblent davantage se concentrer sur le point final de la technologie, à savoir ce qu'elle peut accomplir, plutôt que sur son fonctionnement réel en tant qu'entité biologiquement active.

À une certaine époque, l'électromagnétisme était considéré comme faisant partie intégrante du monde naturel, et il l'est toujours dans de nombreuses cultures indigènes et dans toute l'Asie. Mais cette connaissance a été largement perdue dans les cultures occidentales au cours du 20e siècle, à une époque de surspécialisation des sciences, en particulier entre les disciplines de la physique et de l'ingénierie, qui fournissent les fondements des CEM et de la propagation de l'énergie, et les sciences biologiques. Cette situation a créé un gouffre dans lequel les niveaux de fond des CEM continuent d'augmenter avec chaque nouvelle technologie ajoutée, mais les écologistes demandent peu de recherches pour déterminer les effets, s'il y en a, qui peuvent se produire sur le chemin de la technologie dans une myriade d'espèces ainsi que dans leurs habitats.

Nous sommes sur le point d'introduire un nouveau niveau massif d'expositions dans la gamme des extrêmement hautes fréquences (EHF 30-300 GHz) jamais utilisée auparavant dans les - télécommunications civiles, bien qu'elle ait été utilisée dans les radars militaires et certaines applications médicales. Il s'agit de la nouvelle 5G et de l'Internet des objets [89], qui utilise des ondes millimétriques complexes et en phase, dont la longueur d'onde est plus petite et qui sont donc capables d'atteindre une correspondance de résonance avec certaines espèces d'insectes [90], ainsi que de perturber des fonctions biologiques cruciales de nombreux autres organismes. En théorie, cette seule technologie a la capacité de perturber d'importants écosystèmes avec des effets étendus sur les réseaux alimentaires. En outre, l'extrémité supérieure de ces gammes atteint des fréquences infrarouges, dont certaines sont en fait visibles pour d'autres espèces, notamment les oiseaux, et peuvent entraver leur capacité à détecter les champs magnétiques naturels nécessaires à la migration et à l'orientation [91]. Pourtant, aux États-Unis, aucune étude environnementale n'a été recommandée avant la construction de ces installations [89]. D'autres pays, notamment en Europe, se montrent plus prudents.

Historiquement, les États-Unis étaient le leader de la recherche sur la santé et l'environnement des CEM, mais maintenant la plupart de ces travaux - et toutes les recommandations de politique publique qui les accompagnent - viennent d'Europe et d'ailleurs [92, 93]. Il n'y a pratiquement aucun financement public ou privé aux États-Unis pour la recherche sur les CEM ambients et leurs effets sur la faune, malgré les appels d'agences fédérales telles que l'U.S. Fish & Wildlife Service [94-96] pour étudier les effets des CEM sur les espèces non humaines, et les demandes adressées à l'U.S. Department of Agriculture et de l'Aquaculture.

U.S. EPA et FCC pour traiter les expositions à la faune sauvage [94, 96-100]. Les recherches financées par l'industrie ne peuvent pas être considérées comme impartiales. Il n'existe aucune réglementation spécifiquement conçue pour protéger la faune des CEM. Toutes les réglementations sont destinées à la santé humaine, même si la plupart des recherches ont historiquement été menées sur des modèles animaux [94, 95]. Les conséquences involontaires de cette situation, en fait, peuvent être que nous en savons plus sur les effets des CEM sur les espèces non humaines que nous ne le pensons, rendant une grande quantité d'informations disponibles pour l'intégration écologique et l'utilisation environnementale.

Choix des études d'examen : définir comment l'énergie spatiale de faible niveau peut se traduire par l'absorption de tissus non humains

Les études sur les effets biologiques des champs électromagnétiques anthropiques se comptent par milliers (101) et s'étalent sur plus de huit décennies. Cependant, la majorité des premières recherches ont étudié les CEM à des intensités beaucoup plus élevées que celles des CEM d'origine humaine présents dans l'environnement. Nous soulevons une question fondamentale dans cet article : Les CEM anthropiques de faible intensité présents dans l'environnement sont-ils capables d'affecter les fonctions physiologiques des organismes vivants ? Il existe une abondance d'études portant sur des niveaux très faibles dont on peut s'inspirer (voir Partie 2 : Suppléments 1, 2, 3 et 4).

Cet examen porte principalement sur les expositions aux CEM de faible intensité en champ lointain, c'est-à-dire à une certaine distance de la source de rayonnement, comparable aux champs ambients que diverses espèces peuvent rencontrer de manière répétée. Les études auxquelles nous faisons référence ont été choisies en fonction de leur importance générale et de leur pertinence spécifique pour les espèces dont il est question dans le texte et dans les tableaux supplémentaires.

Il existe littéralement des milliers d'études remontant aux années 1930 (par exemple, [90, 102-107]) qui ont utilisé des animaux de laboratoire dans des conditions contrôlées pour déterminer les effets des CEM sur les humains. Il est ironique de constater que la réalisation de tels travaux directement sur l'homme est considérée comme contraire à l'éthique, alors même que nous permettons à la technologie de se développer. Bien que la plupart des recherches aient été menées sur des modèles de rongeurs tels que les souris et les rats, un sous-produit involontaire est que nous savons en fait beaucoup de choses sur la façon dont les CEM de haute et de basse - intensité peuvent affecter des espèces telles que les lapins, les chiens, les chats, les poulets, les porcs, les primates, les amphibiens, les mouches à fruits, les abeilles, les vers de terre, divers microbes et les cellules de levure qui ont tous été utilisés comme modèles de recherche. En général, ces travaux n'ont pas été considérés comme ayant un rapport direct avec la vie sauvage, mais dans le cadre de la recherche sur la faune et la flore sauvages, ils ont été utilisés comme modèles.

Dans de nombreux cas, elle peut être considérée comme importante, comme illustré tout au long de ce document.

La grande majorité des premières recherches menées avant les années 1960 sur des modèles animaux ont été effectuées avec des RFR de haute intensité [108-112], contrairement à la plupart des expositions ambiantes de faible niveau actuelles. Les premiers travaux étaient spécifiquement conçus pour déterminer les effets thermiques bruts chez l'homme à une époque où l'électrophysiologie et les mécanismes de thermorégulation n'étaient pas bien compris. Les effets non thermiques plus subtils présentaient peu d'intérêt à l'époque, bien que leur existence soit connue [104-106, 113-115]. De plus, les caractéristiques de signalisation étaient différentes des expositions numériques pulsées complexes d'aujourd'hui. Ainsi, le grand nombre de travaux antérieurs n'est pas inclus dans cette revue, sauf lorsque cela est approprié pour la compréhension générale des modèles physiologiques trans-espèces et pour une compréhension globale de la façon dont l'énergie se couple avec les tissus vivants que les travaux antérieurs ont contribué à définir.

Comment les normes d'exposition gouvernementales se rapportent à la faune

Pour se faire une idée de la pertinence potentielle des expositions ambiantes pour la faune, il est nécessaire de comparer brièvement les normes d'exposition humaine. Aux États-Unis, la Federal Communications Commission (FCC) est l'agence autorisée par la loi à réglementer l'industrie des communications et à accorder des licences pour l'émission/la réception/l'exposition aux rayonnements des appareils de communication. La FCC a adopté des normes d'exposition [116-118] qui incluent à la fois la densité de puissance pour les expositions ambiantes à partir de sources de transmission (généralement définies comme le taux d'énergie transmis dans l'espace) et les taux d'absorption spécifique (SAR) reflétant le débit de dose de l'énergie absorbée dans les tissus - deux paramètres potentiellement pertinents pour les espèces dans la nature.

Pour la densité de puissance, les normes américaines se situent entre 0,2 et 1,0 mW/cm² et pour le DAS entre 0,08 et 0,40 W/kg de tissu humain. Pour les téléphones cellulaires, les niveaux de DAS exigent que les appareils portatifs soient égaux ou inférieurs à 1,6 W/kg en moyenne sur 1,0 g de tissu. Pour les expositions du corps entier, la limite est de 0,08 W/kg. Au Canada et dans la plupart des pays européens qui utilisent les normes d'exposition créées par la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants [119, 120], la limite du DAS pour les appareils portatifs est de 2,0 W/kg en moyenne sur 10 g de tissu. Les limites d'exposition du corps entier sont de 0,08 W/kg. À une distance de 30,5 à 61 m (100-200 pi) d'une station de base de téléphone cellulaire (c'est-à-dire une antenne ou un réseau d'antennes), une personne ou un animal se déplaçant dans la zone peut être exposé à une densité de puissance de 0,001 mW/cm² (c'est-à-dire 1,0 µW/cm²). Le DAS à une telle distance peut être de 0,001 W/kg (c'est-à-dire 1,0 mW/kg) pour un homme debout.

Aux fins du présent document, nous définirons donc l'exposition de faible intensité aux RFR pour une densité de puissance de 1 µW/cm² ou un DAS de 0,001 W/kg.

De nombreux effets biologiques ont été documentés à de faibles intensités comparables à celles que la population - et donc la faune - subit dans un rayon de 61 à 152 m (200 à 500 pi) d'une tour de téléphonie cellulaire [100]. Il peut s'agir d'effets observés dans des études *in vitro* sur des cultures cellulaires et dans des études *in vivo* sur des animaux après des expositions à des RFR de faible intensité. Les effets signalés sont les suivants : altérations génétiques, de la croissance et de la reproduction ; augmentation de la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique ; augmentation des protéines de stress ; modifications du comportement ; altérations moléculaires, cellulaires et métaboliques ; et augmentation du risque de cancer (voir Réf. [100], tableau 1).

La sensibilité aux RFR et la fixation de normes d'exposition pour l'homme sont principalement basées sur des données de recherche concernant les rats (une autre espèce de mammifère). En général, cependant, il n'est pas valable d'appliquer les mêmes données à des espèces plus éloignées sur l'échelle de l'évolution, par exemple les oiseaux, les insectes et les arbres. D'un point de vue réaliste, on ne devrait utiliser que les données dosimétriques disponibles sur chaque espèce particulière pour comprendre sa sensibilité aux RFR, ce qui explique pourquoi cet article est si détaillé dans la partie 2 sur les études des CEM couvrant tous les taxons. Cependant, les normes d'exposition établies par la FCC et d'autres organismes ne fixent pas de limites en tenant compte des espèces non humaines.

Contrairement à la recherche sur le terrain, les études de laboratoire *in vivo* et *in vitro* sont menées dans des circonstances hautement contrôlées, souvent avec des animaux d'expérience immobilisés, généralement en champ proche, pendant des durées déterminées, à des fréquences et des intensités spécifiques. Il est difficile d'extrapoler les résultats de la recherche en laboratoire aux espèces sauvages en ce qui concerne les expositions à des champs lointains non contrôlés, si ce n'est, par exemple, pour rechercher d'éventuelles corrélations avec les dommages observés en laboratoire au niveau de l'ADN, du comportement ou de la reproduction. Dans la nature, il y a plus de variation génétique et de mobilité, ainsi que des variables qui rendent difficile une évaluation précise des données. En outre, des variables complexes comme l'orientation vers la source d'émission, la durée d'exposition, la taille de l'animal, les caractéristiques physiques propres à l'espèce et la variation génétique entrent également en jeu. Les évaluations pour la faune sauvage peuvent varier considérablement en fonction de nombreux facteurs.

Il est fort probable que la majorité des espèces sauvages se déplacent constamment dans et hors des champs artificiels variables. Les données précises sur l'exposition sont toutefois difficiles à estimer. Néanmoins, de plus en plus d'éléments montrent que diverses espèces sauvages subissent des dommages à proximité des structures de communication, en particulier lorsque des extrapolations à l'exposition aux rayonnements ont été faites [15, 17, 32, 36, 37, 121-123].

La question principale est de savoir si les CEM environnementaux créés par l'homme ont des effets biologiques sur les espèces sauvages.

est devenu urgent avec les technologies 5G et les autorisations potentiellement plus clémentes envisagées par les principaux comités de normalisation de la FCC et de l'ICNIRP (voir la partie 3 sur les normes d'exposition gouvernementales et les nouveaux changements proposés).

Utilisons-nous le bon modèle physique dans la définition des normes ?

Depuis le début, il y a eu des discussions sur les modèles de physique de base utilisés pour déterminer les effets des CEM d'origine humaine sur les systèmes vivants [124-131]. La discussion s'est concentrée sur les modèles classiques de l'énergie photonique par rapport à l'énergie des ondes en relation avec l'équilibre thermodynamique. Il s'agit de discussions biophysiques très complexes qui dépassent le cadre de cet article, si ce n'est dans sa description la plus large. Elles sont incluses ici en raison de leurs ramifications sur les modèles d'établissement de normes mentionnés ci-dessus et dans la partie 3, et particulièrement en ce qui concerne les effets sur l'ADN abordés dans la partie 2. Ces facteurs sont liés et s'appliquent à toutes les espèces.

Le spectre électromagnétique est divisé en bandes ionisantes et non ionisantes. Les modèles classiques de la théorie quantique des photons des CEM utilisés pour évaluer les rayonnements ionisants [132] ont établi il y a longtemps que les rayonnements ionisants ont suffisamment d'énergie intrinsèque pour faire sortir les électrons de leur orbite à l'intérieur des atomes, provoquant ainsi des modifications cellulaires structurelles qui sont potentiellement cancérogènes et mutagènes en raison des dommages causés à l'ADN.

Ces mêmes modèles ont ensuite été extrapolés pour conclure que puisque les CEM non ionisants n'ont pas assez de puissance inhérente pour déplacer les électrons des atomes, ils ne peuvent donc pas endommager directement, et certainement pas indirectement, des molécules telles que l'ADN. Historiquement, par rapport à cette seule définition de l'énergie photonique inhérente, les CEM non ionisants d'origine humaine ont été considérés comme relativement inoffensifs, au-delà de leur capacité à chauffer les tissus et à provoquer des chocs électriques. La plupart des technologies modernes, y compris toutes les normes d'exposition actuelles et les exclusions catégorielles, sont basées sur ce raisonnement, ainsi que sur les effets comportementaux observés dans les modèles animaux. Les normes d'exposition ont été strictement basées sur les risques thermiques facilement quantifiables du chauffage des tissus, avec des marges de sécurité intégrées [116-120]. Si ces marges de sécurité varient selon les pays, l'hypothèse fondamentale du mécanisme d'exposition n'est pas remise en cause.

Cependant, ce modèle étroit ne tient pas compte du fait que tous les êtres vivants sont fondamentalement des systèmes électriques cohérents qui interagissent de manière très sensible à des niveaux infimes de CEM non ionisants - parfois à des intensités infiniment faibles, bien en dessous des normes actuelles [3, 4, 100, 133-135]. Cela est particulièrement vrai pour d'autres espèces qui ont évolué pour détecter et utiliser les champs électromagnétiques de faible niveau de manière surprenante (voir partie 2).

En outre, une grande partie de la biologie est non linéaire. Par exemple, une petite quantité de venin d'abeille peut créer un effet démesuré (anaphylaxie) chez les personnes allergiques aux piqûres d'abeilles. Le temps est également non linéaire [136], par exemple, une petite perturbation dans une partie du monde peut théoriquement entraîner un événement météorologique majeur comme une tornade dans une région très éloignée [137-139] (à ne pas confondre avec le soi-disant effet papillon - ou théorie du chaos du battement d'ailes de papillon affectant les événements météorologiques dans d'autres parties du globe, qui n'a jamais été documenté). Depuis des décennies, il est de plus en plus évident que la biologie est davantage liée à des états quantiques et à des réponses résonantes, et non aux modèles thermodynamiques d'équilibre linéaire traditionnels actuellement utilisés pour définir les effets biologiques qui *devraient* se produire, mais qui souvent ne se produisent pas [127].

Ce modèle linéaire étroit, qui est basé sur un photon unique agissant sur une cellule unique à un moment singulier dans le temps, ne tient pas compte non plus du fait que les utilisations - actuelles des CEM/RFR impliquent de nombreux photons agissant à l'unisson [140] de manière extrêmement complexe, comme dans la technologie des réseaux phasés. En d'autres termes, l'ensemble du modèle thermodynamique traditionnellement utilisé pour promouvoir la réglementation de la sécurité en matière de RFR - peut ne pas s'appliquer. Il exclut également les recherches les plus récentes mettant en évidence des effets cumulatifs et synergiques [141], et est incapable d'incarner la complexité et la totalité des expositions actuelles, et encore moins la sensibilité biologique en général.

Le rayonnement n'est pas un système fermé classique en - équilibre thermodynamique [142]. Pourtant, il a été maintes fois avancé que les dispositifs et les infrastructures doivent être sûrs parce qu'un seul photon de micro-ondes, par exemple, n'a pas assez d'énergie pour briser une liaison chimique. Si cela peut être exact pour certaines sources de rayonnements ionisants, ce n'est pas forcément le cas pour les bandes de fréquences inférieures qui fonctionnent dans la limite classique des ondes à forte densité de photons, où l'énergie de chaque photon est souvent sans importance ([132], mise à jour 2017).

Panagopoulos et al. [143-146] ont beaucoup écrit sur cette question, notant que les émissions électromagnétiques d'origine humaine sont très différentes de ce que l'on trouve à l'état naturel dans les spectres lumineux et les bandes ionisantes ; que les CEM d'origine humaine ne sont pas "quantifiés". "Ils affirment au contraire que les CEM non ionisants ne sont pas constitués de photons, mais plutôt d'ondes continues en "paquets" de photons à haute densité décrits dans l'électromagnétisme classique, qui interagissent très différemment avec les systèmes biologiques par rapport aux modèles traditionnels. Il reste à voir si cette hypothèse sera largement acceptée.

Si nous voulons vraiment passer à des normes d'exposition plus sûres, nous avons besoin d'un modèle précis basé sur la biologie, l'observation et l'expérimentation, et pas seulement sur la théorie physique. Généralement,

Lorsque des informations contradictoires allant à l'encontre des hypothèses populaires atteignent une masse critique suffisante, ces hypothèses finissent par céder le pas à des connaissances plus récentes. À l'heure actuelle, il n'existe pas de véritables normes fondées sur la biologie, si ce n'est pour une gamme étroite d'effets de chauffage. Ce que nous semblons avoir, ce sont des modèles de dosimétrie qui permettent facilement à la technologie de fonctionner.

Le modèle le plus précis reste encore à déterminer, mais il pourrait évoluer vers un nouvel hybride. On sait déjà que la distribution de l'énergie RF absorbée dans les tissus vivants n'est pas uniforme, qu'elle varie considérablement à l'intérieur des cellules et entre les différentes zones du corps et les organes, ce qui explique pourquoi les DAS sont généralement moyennés [142]. Si la non-uniformité peut être prise en compte de manière plus précise, les interactions subthermiques peuvent avoir un sens avec ou sans la définition de nouveaux modèles mécanistes. Ce qui est de plus en plus clair, c'est que les modèles actuels ne résistent plus à un examen minutieux face à tant de données scientifiques contradictoires qui demandent une évaluation plus précise.

Augmentation des niveaux de fond ambients

L'exposition aux radiofréquences environnementales anthropiques a commencé il y a un peu plus de 100 ans - une période extrêmement courte du point de vue de l'évolution. La radiodiffusion à modulation d'amplitude (AM) a été introduite pour la première fois dans les années 1920 dans la bande des moyennes fréquences (500-1 600 kHz), la radio et la télévision à modulation de fréquence (FM) dans la bande des très hautes fréquences (VHF 30-300 MHz) ayant été introduites dans les années 1930. La fin de la Seconde Guerre mondiale et les progrès technologiques ont permis une expansion rapide tout au long des années 1950, avec des stations de télévision fonctionnant dans la gamme des ultra-hautes fréquences (UHF 300 MHz-3 GHz ; [147]). Au cours des années 1970 et 1980, la FM a fini par dominer la radio commerciale, mais la MA n'a jamais cessé d'émettre. Depuis les années 1980 jusqu'à aujourd'hui, de larges pans de l'infrastructure de la radio commerciale de forte puissance (50 000 000 W et plus) sont passés des tours terrestres aux plates-formes satellitaires, tandis que les stations FM de faible puissance (1 000 W) ont augmenté leur empreinte terrestre. Une autre augmentation exponentielle a eu lieu du milieu des années 1990 jusqu'à aujourd'hui avec l'introduction de la technologie de la téléphonie cellulaire, également dans les bandes UHF, qui est devenue de loin la principale exposition au RFR aujourd'hui [148, 149]. Les RFR ambients sont depuis devenus une exposition constante et omniprésente dans tous les pays industrialisés, provenant d'infrastructures terrestres et satellitaires.

Les applications sans fil d'aujourd'hui sont légion. Parmi les plus récentes, citons les réseaux et compteurs intelligents, la technologie LTE 3G/4G et maintenant la 5G.

des réseaux de télécommunications offrant une infinité d'"applications" cliquables, des téléchargements de programmes télévisés, de musique et de vidéos, des livres électroniques, des photos dans le "nuage", des maisons "intelligentes" et des assistants personnels comme Alexa d'Amazon, Siri d'Apple et Google Homes, une connectivité Internet WiFi/WiMax et l'envoi de SMS, le tout à partir d'un téléphone portable. Viennent ensuite les systèmes GPS universels fonctionnant à partir de satellites et une multitude de radars anti-collision RFR intégrés aux véhicules pour s'arrêter automatiquement, détecter des personnes ou des animaux sur la route ou garer le véhicule sans intervention du conducteur.² Des prototypes de voitures et de camions sans conducteur ont déjà vu le jour, ainsi qu'un nouveau service sans fil à large bande qui introduira une nouvelle forme de WiFi omniprésent avec des antennes capables de transmettre dans un rayon de 31 080 km⁽²⁾ avec une portée de 100 km à partir d'une seule antenne. Des services cellulaires améliorés sont également en cours de construction dans de nombreuses régions, grâce à des systèmes d'antennes distribuées (DAS) et à de petites cellules montées sur des poteaux électriques, destinés aux zones urbaines et rurales essentiellement exemptes de radiofréquences. Les DAS/petites cellules accueilleront l'Internet des objets (IoT) de la 5G. Ensuite, il y a les nouveaux réseaux de sécurité intérieure comme GWEN et FirstNet, et les systèmes de premiers secours comme TETRA (Terrestrial Trunked Radio). Toutes ces technologies utilisent des caractéristiques de signalisation extrêmement complexes transportant beaucoup d'informations avec des effets biologiques potentiellement complexes. Chaque nouvelle technologie introduit un nouveau niveau d'exposition environnementale. Il y a 70 ans à peine, il n'existe que très peu de choses de ce genre et leurs conséquences n'avaient été que peu étudiées ou comprises jusqu'à aujourd'hui - ce qui fait l'objet du présent document.

À l'exception de certains pays en développement, la 2G a largement disparu de l'usage dans la plupart des nations industrialisées où la troisième génération (3G) est encore opérationnelle pour le système mondial de communications mobiles (GSM), tandis que la quatrième génération (4G) d'évolution à long terme (LTE) est devenue de plus en plus populaire pour les téléphones intelligents/technologies utilisant le système universel de télécommunications mobiles (UMTS). Gonzalez-Rubio et al. [150] ont constaté que les valeurs moyennes de rayonnement dans l'environnement les plus élevées mesurées aujourd'hui concernent les systèmes GSM/UMTS/DCS, qui représentent environ 70 % des expositions environnementales extérieures aux communications mobiles, bien que dans certains pays, comme la Turquie, l'exposition la plus élevée provienne encore des émissions de radio et de télévision. Les systèmes de première et deuxième générations étaient très spécifiques en termes de fréquence (850-1 200 MHz), mais aujourd'hui, des bandes multifréquences sont utilisées dans les systèmes pour les fréquences montantes et descendantes des appareils et des stations de base - par exemple, les bandes GSM + UMTS 900 MHz, UMTS 2 100 MHz, LTE 800 MHz, LTE 2 600 MHz et GSM 1 800 MHz.

Avant la mise en place des télécommunications au début des années 1990, il existait un échantillon détaillé de données de base sur l'environnement, basé sur une étude réalisée en 1980 par l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis.

(EPA) que nous pouvons comparer aux expositions croissantes d'aujourd'hui. Dans la première étude de ce type, les chercheurs Tell et Mantiply [151] de l'EPA ont évalué les niveaux de fond de l'intensité du champ de signaux de radiodiffusion du RFR pendant trois ans et ont obtenu des données sur 486 sites répartis dans 15 grandes villes américaines. Les données représentaient collectivement 14 000 mesures du rayonnement à très haute fréquence (VHF) et à ultra-haute fréquence (UHF) (utilisé dans la télédiffusion) dans des environnements ambients avec une exposition estimée à 47 000 districts de recensement dans les limites métropolitaines de ces villes. À l'époque, les signaux de diffusion terrestre de la télévision, de la radio AM et des transmissions radio FM, alors en augmentation, constituaient les principales expositions. Il n'y avait pas de services cellulaires, très peu d'appareils sans fil et très peu de transmissions par satellite par rapport à aujourd'hui.

L'étude de Tell et Mantiply [151] a révélé que 20 % de la population américaine totale était exposée à des rayonnements de radiodiffusion VHF et UHF moyennés dans le temps à un niveau médian (c'est-à-dire la valeur médiane des valeurs mesurées les plus élevées et les plus basses) de $0,0005 \mu\text{W par centimètre carré} (\mu\text{W/cm}^2)$. Cela représente une mesure de la densité de puissance dans un espace défini couramment utilisé pour délimiter l'intensité du champ de RFR. À Los Angeles, par exemple, Tell et Mantiply [151] ont constaté que le niveau médian était de $0,005 \mu\text{W/cm}^2$ [152]. Leurs données suggéraient également que seul 1 % de la population, soit environ 441 000 personnes, était potentiellement exposé à des niveaux supérieurs à $1 \mu\text{W/cm}^2$ - la limite de sécurité recommandée par l'URSS qui était 1 000 fois plus stricte que les directives de sécurité américaines en 1980. À l'époque, les chercheurs ont clairement jugé ces données rassurantes pour la population générale.

Tell et Kavet [147] ont réexaminé le sujet en 2014, mais n'ont pas reproduit ou tenté d'actualiser la vaste étude de 1980. Leur objectif était de déterminer si, et comment, les niveaux environnementaux pouvaient désormais être évalués, étant donné le nombre et la variété des émetteurs RF utilisés aujourd'hui. Ils ont effectué des tests dans quatre municipalités de taille petite à moyenne et ont constaté que les bandes FM contribuaient toujours de manière importante à l'exposition globale aux RF, mais ont noté qu'au fil du temps, les intensités dans les bandes VHF diminuaient tandis que les bandes UHF augmentaient, ce qui reflète le passage aux bandes UHF pour l'utilisation des téléphones cellulaires depuis 1980. Les chercheurs européens, cependant, n'ont pas trouvé que la FM était un facteur significatif dans les expositions actuelles [153-155].

L'étude américaine originale de 1980 ne peut pas être reproduite car le profil et la nature des RFR ont complètement changé depuis lors. Cependant, une équipe internationale de chercheurs [149] a mesuré les CEM/RFR dans 94 micro-environnements appariés dans six pays, dont la Suisse, l'Éthiopie, le Népal, l'Afrique du Sud, l'Australie et la région de Los Angeles aux États-Unis - l'un des sites de l'EPA de 1980 - où ils ont constaté une augmentation de l'intensité des CEM/RFR.

Les niveaux de radiofréquences ont été multipliés par 70 par rapport aux mesures effectuées à la fin des années 1970 [152]. Voir ci-dessous pour plus d'informations sur cette étude dont l'infrastructure de téléphonie cellulaire est le principal contributeur. En dehors de l'étude de Sagar et al. [149], il n'existe pas de données actuelles sur les niveaux de rayonnement de fond aux États-Unis. Toutefois, les résultats obtenus dans les villes américaines et canadiennes sont considérés comme comparables aux études réalisées en Europe, qui s'intéresse davantage au sujet en général et à la quantification des niveaux intérieurs et extérieurs en constante augmentation, en particulier.

Bien que les services cellulaires n'existaient pas lorsque l'étude originale de l'EPA de 1980 a été réalisée, la technologie cellulaire fonctionne maintenant dans des bandes UHF similaires mesurées par Tell et Mantiply en 1980 [151]. Ainsi, les expositions croissantes d'aujourd'hui peuvent être évaluées par rapport aux valeurs de référence relevées à l'époque. Lorsque les États-Unis sont passés à la télévision numérique en 2008, ils ont libéré l'"espace blanc" du spectre utilisé auparavant pour la transmission de la télévision analogique. Cet espace est désormais alloué à l'Internet sans fil 4G, et les bandes VHF et UHF seront utilisées pour étendre le service Internet à large bande omniprésent dans les zones rurales. Mais l'avènement de la technologie numérique, qui simule des ondes pulsées, a considérablement modifié les caractéristiques de signalisation des communications, permettant essentiellement de construire un deuxième système de transmission universel par-dessus les anciens signaux analogiques [100]. Cette évolution n'a pas seulement doublé l'exposition globale aux RFR dans l'environnement, elle en a introduit un tout nouveau type. C'est l'introduction globale de la technologie numérique qui a facilité le remaniement des diverses bandes de RFR dans le "bien immobilier" fini du spectre électromagnétique. L'introduction de la 5G est en train de faire la même chose.

Il n'y a jamais assez de spectre pour satisfaire le désir de la société, ce qui a pour conséquence que nous avons maintenant complètement rempli la plupart des bandes inférieures non ionisantes à usage commercial et militaire, et que nous nous dirigeons vers des fréquences beaucoup plus élevées en utilisant les ondes millimétriques entre 30 et 300 GHz pour les communications et d'autres applications. Les États-Unis ont été le premier pays à approuver la mise en place des communications de cinquième génération (5G), à ce jour dans les gammes 28, 37 et 39 GHz pour la 5G. Les nouveaux systèmes 5G, qui utilisent des petites cellules et des réseaux de systèmes d'antennes distribuées (DAS), sont construits avec des antennes fixées sur des bâtiments et des poteaux de lignes électriques à proximité immédiate de la population, en utilisant une signalisation à réseau phasé extrêmement complexe, jusqu'à présent surtout utilisée par les militaires. Ces fréquences et ces caractéristiques de signalisation n'existaient pas pour un usage civil en 1980 et constituent donc une exposition environnementale entièrement nouvelle et inédite depuis ce premier examen de l'EPA, avec toutes les autres technologies sans fil introduites depuis. Une chose est sûre : les modes d'exposition

évoluent rapidement avec chaque nouveau développement technologique, bien avant notre compréhension biologique des conséquences.

Avec l'arrivée des technologies cellulaires au milieu et à la fin des années 1990, l'exposition ambiante de fond aux RFR a commencé à augmenter régulièrement, en particulier - mais pas exclusivement - dans les zones urbaines [18-149, 156-165]. L'infrastructure cellulaire, bien que sa densité de puissance soit inférieure de plusieurs ordres de grandeur à celle des installations de radiodiffusion, est devenue beaucoup plus omniprésente et est placée beaucoup plus près de la population humaine dans les zones urbaines et rurales [155].

Difficultés d'évaluation des expositions ambiantes

L'évaluation des expositions ambiantes, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur, a frustré les chercheurs et les régulateurs quant à la meilleure façon de saisir les données d'exposition sur le terrain. Faut-il recourir à la simulation informatique ou à des mesures réelles sur le terrain ? Les variables des évaluations environnementales peuvent être d'une complexité aveuglante. La densité de puissance et la distance par rapport à une source de production ont traditionnellement été utilisées comme substitut aux expositions ambiantes, mais ces mesures peuvent être imparfaites étant donné la façon dont les RFR se couplent avec l'environnement une fois transmis, ainsi que la prise en compte nécessaire de multiples sources qui se chevauchent aujourd'hui. Outre la distance et les sources multiples, les évaluations environnementales font intervenir des variables telles que l'orientation vers la source émettrice, l'espèce, la taille, la composition physique, la présence d'objets métalliques et la topographie, pour n'en citer que quelques-unes [100, 155].

L'intensité du champ RF diminue rapidement avec la distance de la source d'émission (loi de l'inverse du carré de Maxwell), mais la prévision des expositions réelles basée sur la simple distance des antennes à l'aide de formules informatiques standardisées est inadéquate. Les expositions réelles sont beaucoup plus complexes dans les environnements urbains et ruraux, tant pour les humains que pour la faune.

Le fait que l'étroitesse de l'étalement vertical du faisceau crée un faible champ RF au niveau du sol, directement et à une certaine distance en dessous de l'antenne, contribue à cette complexité. Lorsqu'une personne ou une espèce sauvage s'éloigne ou se déplace à l'intérieur d'un champ particulier, les expositions créent des pics et des creux dans l'intensité du champ. En outre, la diffusion et l'atténuation modifient l'intensité du champ en fonction de l'emplacement des bâtiments, de la composition architecturale, de la présence d'arbres, du type de sol et des caractéristiques topographiques telles que les montagnes et les formations rocheuses [166]. Les niveaux de densité de puissance peuvent être 1 à 100 fois plus faibles à l'intérieur d'un bâtiment, par exemple, en fonction des matériaux de construction utilisés et du gain d'antenne [155]. Les expositions peuvent varier considérablement en fonction de la présence de milieux conducteurs tels que l'eau ou le sable.

le sol contenant des sels minéraux avec du sodium, du fer, du cuivre et du zinc, entre autres. Les expositions peuvent être deux fois plus élevées dans les étages supérieurs des bâtiments que dans les étages inférieurs [167, 168]. Cela s'applique également aux oiseaux/chauves-souris/abeilles et autres insectes qui reçoivent des expositions plus élevées lorsqu'ils volent dans un plan latéral avec des antennes émettrices montées sur une tour ou au sommet d'autres structures.

Bien qu'il ait été démontré que la distance par rapport à une source d'émission n'est pas un facteur déterminant fiable pour des mesures d'exposition précises en raison de la création potentielle de points chauds de RFR [155], cette mesure est néanmoins utile de manière générale. Par exemple, Rinebold [169] a montré que les niveaux de rayonnement d'une tour équipée de 15 systèmes radio non radiodiffusés retombent aux niveaux naturels à une distance d'environ 457 m (1 500 ft). Cela concorde avec la diminution des symptômes chez les populations humaines vivant à proximité de tours de téléphonie mobile à une distance supérieure à 300 m (170). Il n'existe, bien entendu, aucun moyen adéquat ou raisonnable d'empêcher la faune de s'approcher, de défendre des territoires et/ou de vivre près des tours, y compris les oiseaux qui nichent directement sur ou à proximité immédiate de celles-ci.

Dispositifs de radiopistage des animaux : Colliers RFID et radio

Dans les populations humaines, le port de dispositifs de dosimétrie personnelle semble être un domaine prometteur pour la saisie de données sur l'exposition cumulative. Mais il est peu judicieux d'attacher de tels dispositifs à la faune sauvage aux mêmes fins, étant donné la quantité d'équipements de suivi - puces RFID, colliers radio et implants radio/satellites - déjà déployés dans le monde entier par des biologistes sur/dans de nombreuses espèces de faune aviaire, terrestre, aquatique et marine pour l'étude et le divertissement médiatique.

On peut soutenir qu'une telle utilisation a permis de découvrir d'importantes informations sur le comportement et la migration - d'une multitude d'espèces, notamment les plongées profondes des grands requins blancs (*Carcharodon carcharias*) et les migrations annuelles en "huit" de plus de 80 470 km des sternes arctiques (*Sterna paradisaea*), entre autres. L'un des auteurs [171] a radiomarqué des ours noirs (*Ursus americanus*) dans la péninsule inférieure du Michigan pendant trois ans à l'aide de récepteurs au sol et dans des avions, afin d'étudier l'impact des humains sur les ours, mais il ignorait à l'époque l'impact possible des CEM. En dehors des technologies de télémétrie les plus récentes, dotées de dispositifs de sécurité tels que les options de rupture immédiate du télémètre/collier, la signalisation de la perte du collier et les capacités de téléchargement de la carte de données, il peut toujours être difficile de retirer ces dispositifs après leur fixation/insertion, si tant est qu'ils le soient, ou de les récupérer une fois que l'animal est mort, ou que les dispositifs ont glissé et/ou se sont détachés d'eux-mêmes dans des zones reculées.

Le plus important, cependant, ce sont les données disponibles qui confondent les expositions supplémentaires [172] provenant des dispositifs eux-mêmes, ce qui n'a pas été largement abordé par la communauté de la faune. Balmori [8] a noté que les émetteurs radio fixés sur les animaux peuvent induire des effets négatifs, ce qui entraîne des résultats biaisés. Les effets documentés de l'utilisation de ces dispositifs comprennent une diminution de la productivité, des changements de comportement et de mouvement, une augmentation de la dépense énergétique, des rapports sexuels biaisés et une réduction de la survie. Les biologistes attribuent souvent ces facteurs au poids de l'émetteur radio et/ou des dispositifs associés. Le type de fixation (harnais, collier, collier de patte, colle ou implant) et l'endroit où il est monté (ancrage sous-cutané, queue, tête, aile, etc.) sont également considérés comme des facteurs de résultats négatifs. Jusqu'à présent, cependant, les CEM/RFR ont été largement laissés de côté en tant que facteur de confusion, même s'il a été constaté que les effets indésirables étaient significativement associés à la durée de fixation de l'émetteur RFR [8, 173]. Cela correspond à des effets similaires observés chez tous les taxons de la faune sauvage à cause du RFR, comme cela a été démontré tout au long de cet article. Balmori [8] a affirmé qu'ironiquement, les scientifiques qui étudient l'orientation des animaux comprennent qu'ils doivent protéger leurs laboratoires pour éviter que les CEM anthropiques ne faussent ou n'influencent les résultats de la recherche, mais ils fixent directement des émetteurs aux espèces dans les études sur le terrain sans tenir compte de l'exposition confondante des dispositifs de radiopistage eux-mêmes sur le comportement, le mouvement, l'orientation et même la survie.

Barron et al. [173] ont publié une méta-analyse des effets de l'utilisation de dispositifs de radiopistage sur les espèces aviaires. Jusqu'à cette vaste analyse, les études se limitaient à des enquêtes portant soit sur le type de dispositif, soit sur une seule espèce. Les chercheurs ont examiné 84 études pour déterminer si les dispositifs avaient un effet global sur les espèces aviaires, quels aspects du comportement et de l'écologie étaient affectés et, surtout, si la simple capture et la contention étaient des facteurs. Ils ont constaté des effets négatifs globaux significatifs induits par les dispositifs, ainsi que des effets négatifs sur huit des douze aspects spécifiques - les plus marqués étant l'augmentation de la dépense énergétique et la réduction de la probabilité de nidification. En fait, les dispositifs ont eu un effet négatif sur tous les aspects considérés, à l'exception de la capacité de vol. Les effets étaient indépendants du sexe, de l'âge, du principal mode de locomotion et de la masse corporelle. Les chercheurs n'ont pas trouvé de preuve d'effets plus importants pour les dispositifs les plus lourds, mais les équipements montés sur la poitrine et attachés à un harnais augmentaient les comportements induits par les dispositifs, comme le lissage. La mortalité induite par les dispositifs différait selon les méthodes de fixation, les émetteurs ancrés et implantés (qui nécessitent généralement une anesthésie) présentant les taux de mortalité induite par les dispositifs les plus élevés. Les harnais et les colliers présentaient également des taux de mortalité relativement élevés, probablement en raison de l'enchevêtrement dans la végétation. Ils ont également noté que les impacts cumulatifs

de certains aspects de l'attachement étaient substantiels. Par exemple, les réductions de la propension à la nidification, du succès, de la productivité et de la recherche de nourriture peuvent toutes diminuer le potentiel de reproduction, tandis que la réduction de la recherche de nourriture, de la condition corporelle et de la capacité de vol, ainsi que l'augmentation des comportements induits par les dispositifs et des dépenses énergétiques, sont susceptibles d'augmenter la mortalité des oiseaux avec l'utilisation d'émetteurs. De plus, les émetteurs installés sur certains oiseaux réduisent indirectement la capacité de leurs compagnons non marqués s'ils doivent compenser la diminution des activités parentales de l'oiseau muni d'un émetteur. En revanche, la capture et la contention, en tant que variables indépendantes, n'ont pas eu d'incidence. Les auteurs ont déduit que les effets négatifs étaient principalement dus aux émetteurs. Ils ont conclu que les émetteurs et autres dispositifs pouvaient avoir des effets négatifs sur les oiseaux et biaiser les données obtenues. Contrairement à la revue de 2016 de Balmori [8], cette étude n'a pas spécifiquement inclus les CEM/RFR, mais on peut généralement le sous-entendre.

Des sarcomes mortels ont également été observés dans les tissus autour des puces RFID implantées chez des animaux de recherche et des animaux domestiques [174-182], ce que certains ont attribué au matériau de l'enveloppe. On a également observé de graves changements métaboliques chez des animaux exposés à des puces RFID de 915 MHz [183].

Cependant, tous les animaux étudiés avec des puces RFID n'ont pas présenté d'effets indésirables [184-187], bien que la plupart de ces tests aient été de courte durée [174]. Très peu de données de suivi ont été recueillies sur les effets possibles sur la faune sauvage après la pose de colliers émetteurs ou d'autres dispositifs de suivi, ou sur la contribution éventuelle de ces dispositifs à l'exposition ambiante. Il reste encore beaucoup d'inconnues sur les impacts des télémètres dans et/ou sur la faune sauvage.

Une étude de terrain menée par Raybuck et al. [188] sur des fauvettes céruleennes (*Setophaga cerulea*), un petit oiseau chanteur migrateur longue distance, a révélé un taux de retour inférieur de 35 % lorsque des géolocalisateurs (également connus sous le nom d'enregistreurs de données ou de géologistes) étaient fixés, par rapport aux populations témoins dépourvues de géolocalisateurs. Les géolocateurs sont des appareils miniatures équipés de minuscules ordinateurs qui produisent un petit champ magnétique et enregistrent la lumière à intervalles réguliers, généralement deux fois par jour, ce qui permet de calculer la position générale. Les oiseaux doivent être capturés à nouveau pour recueillir l'ensemble des informations de localisation au fil du temps. Les dispositifs sont fixés à l'extérieur des oiseaux à l'aide de fines sangles sous leurs pattes ou de harnais sur leur dos et sont largement utilisés par les biologistes pour suivre la migration des oiseaux tout au long de leur cycle annuel complet : retour au printemps, accouplement, nidification, envol, migration d'automne et hivernage. Alors que Raybuck et al. [188] n'ont trouvé aucun effet négatif des géolocalisateurs pendant la saison de reproduction, le taux de retour des oiseaux marqués par un géolocalisateur était inférieur à celui des oiseaux témoins ($16 \pm 5\%$ contre $35 \pm 7\%$). Ils ont attribué cette perte à l'augmentation du poids des dispositifs, à des conditions météorologiques défavorables, en particulier à l'augmentation de la température.

des espèces survolant de grandes étendues d'eau, le retour dans des zones autres que celles prévues et la mort. Les chercheurs n'ont pas exploré les effets potentiels des CEM mais ont noté que la prudence était de mise.

La plupart des biologistes de la faune sauvage ne prennent pas en compte les effets des expositions dues aux microcourants dans les batteries/ordinateurs, aux puces RFID qui transmettent ou non des RFR, ou aux colliers radio GPS qui transmettent aux satellites, qui peuvent créer des expositions indépendantes pour la faune sauvage et les environnements environnants. Étant donné qu'il existe très peu d'informations sur les effets de l'exposition aux CEM chez les animaux sauvages marqués, l'utilisation de dosimètres portés par des humains peut fournir de meilleures informations sur les expositions ambiantes qui peuvent ensuite être extrapolées aux animaux sauvages lorsqu'ils entrent et sortent de différents habitats. Les animaux sauvages ne devraient pas être équipés de dispositifs permettant d'évaluer les CEM ambients, même dans les zones sauvages reculées. Les biologistes devraient reconstruire l'utilisation abondante de ces appareils comme s'il n'y avait aucune conséquence ou confusion des données recueillies par ces appareils.

Dispositifs de dosimétrie individuelle humaine : capturer les mesures du champ ambiant

Une nouvelle approche pour capturer et quantifier les expositions ambiantes pour de plus grandes zones construites a été créée par Estenberg et Augustsson [153] pour l'autorité suédoise de radioprotection. Il s'agissait d'un système de mesure basé sur une voiture pour estimer les expositions extérieures du grand public. Le système, compliqué mais soigneusement conçu, a permis de réaliser des mesures rapides, sur une grande surface et avec une largeur de bande spectrale isotrope couvrant la gamme de fréquences entre 30 MHz et 3 GHz. La méthode a permis de réaliser en une journée la cartographie complète d'une ville de 15 000 habitants et d'une portée de 115 km (71+ mi). Les zones choisies en Suède représentaient des zones rurales, urbaines et citadines typiques. Les ensembles de données comprenaient plus de 70 000 mesures effectuées entre 8 h et 18 h 30, heure locale. Les résultats ont révélé que la densité de puissance médiane était de 0,0016 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ dans les zones rurales, de 0,027 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ dans les zones urbaines et de 0,24 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ dans les zones urbaines. Dans les zones urbaines et en ville, les stations de base de téléphonie mobile étaient les sources clairement dominantes avec les liaisons descendantes GSM et UMTS. Les nombreux facteurs qui affectaient les résultats des mesures ont été discutés, le plus crucial étant la variation de l'intensité réelle du champ dans le temps causée par des émetteurs sporadiques, pulsés ou en mouvement, ou par l'évanouissement par trajets multiples dû aux réflexions d'objets en mouvement. Les auteurs ont déclaré "... une seule mesure de l'intensité de champ d'émetteurs tels que les stations de base du système global de communication mobile (GSM) peut être à la fois sous-estimée et surestimée selon que la rafale est capturée ou non par la mesure", mais ils ont ajouté que "le grand nombre de mesures dans chaque ensemble de données garantit toujours que la médiane de l'intensité de champ est égale ou supérieure à la valeur de l'intensité de champ.

ou la densité de puissance moyenne dans un district mesuré est robuste. "Ils ont également noté qu'en raison du montage de l'antenne sur le toit du véhicule, des sur- et sous-estimations peuvent également se produire entre les émetteurs plus proches du sol et ceux placés à un niveau plus élevé, mais ils ont ajouté que la répétabilité de la méthode de mesure et sa capacité à localiser les points chauds locaux est un résultat positif acquis en utilisant cette méthode. Bien que ces mesures mobiles présentent de nombreuses complexités, outre le fait qu'il n'existe pas encore de solution standard ou existante sur la manière dont ces mesures mobiles devraient être effectuées, l'approche résumée ci-dessus semble néanmoins être un bon début.

Gonzalez-Rubio et al. [150] ont essayé une autre méthode mobile créative en plaçant un EME Spy 140 dans le panier en plastique d'une bicyclette, effectuant des mesures dans les 110 régions administratives (électorales) de la ville d'Albacete, en Espagne, dont la population est homogène. L'utilisation de la bicyclette a permis un meilleur accès à toutes les zones de ces districts - en particulier les zones inaccessibles avec des véhicules motorisés. Les auteurs ont spécifiquement cherché à établir une corrélation entre les niveaux d'exposition et les sites - connus des stations de base fixes et mobiles, mais, étonnamment, ils n'ont pas trouvé de corrélation. Les raisons possibles de cette absence de corrélation sont : l'orientation des antennes des stations de base, les caractéristiques de construction des bâtiments, la topographie du terrain, la déviation des RFR par les bâtiments et l'atténuation des signaux. Gonzalez-Rubio et al. [150] n'ont pas caractérisé la contribution éventuelle aux niveaux ambients extérieurs des fuites éventuelles des émetteurs RF intérieurs ou des appareils portatifs, mais ils ont utilisé des téléphones domestiques DECT comme témoins, car le DECT fonctionne sans liaison avec des stations de base extérieures. Leurs résultats ont fait la moyenne de trois bandes d'antennes de téléphonie mobile (GSM, Digital Combat Simulator [DCS] et UMTS) dans les différentes régions et ont révélé des variations d'intensité moyenne de 0,04 V/m (0,00042 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) à 0,89 V/m (0,21 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$). L'étude souligne les complexités de la façon dont les RFR se dissipent dans l'environnement et le fait que la distance par rapport à une source génératrice est une mesure peu fiable. Calvente et al. [189] avaient auparavant constaté une grande variabilité spatiale similaire à l'extérieur de 123 résidences du sud de l'Espagne en utilisant les mêmes variables, plus des différences saisonnières. Lahham et Ayyad [190] ont mesuré le RFR environnemental en Palestine en utilisant un appareil de mesure de l'exposition personnelle EME SPY 140. L'exposition quotidienne totale provenant de toutes les sources de champ électromagnétique de radiofréquence variait largement parmi les participants en fonction de leur emplacement, du réseau mobile qu'ils utilisent, de leurs activités et de leur mode de transport, allant d'environ 0,2 à 0,9 V/m, principalement du WiFi 2G, du GSM900 en liaison montante, du GSM900 en liaison descendante et de la diffusion FM.

L'utilisation de ces méthodes de mesure mobiles dans les zones rurales étendues avec accès routier, ainsi que les méthodes de mesure fixes, permettent d'améliorer la qualité de la vie.

dans des endroits très éloignés, permettrait de mieux saisir les expositions en temps réel (y compris les pics intermittents provenant de réseaux spatiaux susceptibles d'affecter la faune) que les simulations informatiques ou les méthodes de dosimètre personnel, bien que des dosimètres portés ou correctement attachés à des équipements de trekking puissent également recueillir des informations pertinentes.

Niveaux mesurés : (pour un tableau des études, voir la partie 1, supplément 1, "Mesures des CEM dans l'environnement dans le monde entier")

Avant l'utilisation généralisée du réseau UMTS dans l'une des premières études sur l'environnement ambiant après Tell et Mantiply [151], Hamnerius et Uddmar [191] ont étudié les champs électromagnétiques et les radiofréquences sur 16 sites différents en Suède, à l'intérieur et à l'extérieur dans des zones urbaines comme les arrêts de bus. La valeur maximale observée était de $0,3 \text{ jiW/cm}^2$ et était dominée par le GSM 900 MHz. Une mesure effectuée à l'intérieur d'un bureau a révélé une valeur de $0,15 \text{ jiW/cm}^2$, 96% de la densité de puissance provenant d'une antenne GSM-900 MHz située à 100 m de distance. Des mesures effectuées à proximité d'émetteurs de radio et de télévision ont donné des valeurs allant jusqu'à $0,23 \text{ jiW/cm}^2$.

Frei et al. [157] ont utilisé des dosimètres pour examiner les niveaux d'exposition totale aux RFR dans la population urbaine suisse. Leurs résultats ont été surprenants : près d'un tiers des expositions cumulées des sujets testés provenaient des stations de base des tours de téléphonie mobile. Avant cette étude, on pensait que l'exposition aux stations de base était insignifiante en raison de leurs faibles émissions et qu'elle ne touchait que les personnes vivant ou travaillant à proximité de ces infrastructures. Mais cette étude a montré que la population générale entre et sort de ces champs particuliers avec plus de régularité que prévu. Cette évaluation s'appliquerait également à la faune sauvage.

Dans l'échantillon de Frei et al. [157], composé de 166 volontaires de Bâle, en Suisse, les participants à l'étude portaient un dosimètre pendant une semaine et remplissaient également un journal d'activité. Les résultats ont montré que l'exposition hebdomadaire moyenne à toutes les sources de RFR et/ou de CEM était de $0,013 \text{ jiW/cm}^2$. L'exposition provenait principalement des stations de base des téléphones mobiles (32,0 %), des combinés des téléphones mobiles (29,1 %) et des téléphones domestiques sans fil à technologie numérique (DECT) (22,7 %). Les valeurs moyennes étaient les plus élevées dans les trains ($0,116 \text{ jiW/cm}^2$), les aéroports ($0,074 \text{ jiW/cm}^2$), les tramways ou les bus ($0,036 \text{ jiW/cm}^2$) et étaient plus élevées pendant la journée ($0,016 \text{ jiW/cm}^2$) que pendant la nuit ($0,008 \text{ jiW/cm}^2$).

Une autre conclusion surprenante de l'étude de Frei et al. (157) impliquait qu'au niveau de la ceinture, du sac à dos ou à proximité du corps des sujets testés, la contribution moyenne de l'antenne relais correspondait à environ 7 min d'utilisation du téléphone mobile. En d'autres termes, l'exposition ambiante due à l'infrastructure seule représentait une

Les téléphones mobiles ne sont pas un facteur significatif au-delà du choix personnel d'utiliser des appareils individuels. Frei et al. ont estimé que le rayonnement extérieur RFR avait été multiplié par 10 depuis l'introduction de la technologie des téléphones mobiles par rapport à la quantification du RFR de radiodiffusion par Tell et Mantiply [151]. Cette tendance a continué à être mesurée par de nombreux chercheurs aujourd'hui.

Joseph et al. [158] ont essayé de donner un sens aux résultats mesurés mais différents provenant de divers pays. Leurs objectifs étaient de comparer les niveaux d'exposition et les contributions de différentes sources dans différents pays européens, dont la Belgique, la Suisse, la Slovénie, la Hongrie et les Pays-Bas, en utilisant le même dosimètre personnel dans tous les pays. Les résultats ont montré que les niveaux étaient de la même ampleur dans tous les pays, sauf aux Pays-Bas, où ils étaient plus élevés dans tous les environnements. Aucune explication adéquate n'a été fournie pour ces résultats néerlandais. Les expositions totales les plus élevées, comme dans d'autres études, ont été enregistrées dans les véhicules de transport (trains, voitures, bus) en raison des combinés de téléphones mobiles (jusqu'à 97 %). L'exposition dans les bureaux était plus élevée que dans les habitations urbaines. Dans les environnements urbains extérieurs, les stations de base et les combinés de téléphones mobiles dominent l'exposition.

D'autres ont également étudié diverses expositions ambiantes pertinentes pour cet article, notamment les animaux domestiques et les animaux s'abritant dans des environnements intérieurs. Viel et al. [165] ont étudié les différentes expositions en fonction du jour de la semaine et ont conclu que l'exposition la plus élevée pour les résidents était le dimanche, principalement en raison de la transmission en amont UMTS et de l'utilisation domestique de téléphones DECT. Markakis et Samaras [159] ont effectué des mesures à l'intérieur des bâtiments à l'aide de dosimètres dans 40 sites urbains et suburbains différents en Grèce entre 2010 et 2012 et ont constaté que les RF provenant des stations de base mobiles étaient dominantes sur les lieux de travail et dans les écoles pendant la journée, tandis que dans les environnements domestiques, les expositions dominantes la nuit provenaient des téléphones DECT/sans fil et des réseaux informatiques. Bolte et Eikelboom [156] ont affirmé que les dosimètres portés sur le corps peuvent à la fois sous-estimer et surestimer les expositions réelles en fonction de la façon dont ils sont portés et qu'une détermination de l'étalonnage doit être effectuée. Dans leur étude, portant sur 98 sujets portant des dosimètres, ils ont constaté que les gares présentaient une densité de puissance moyenne élevée, comprise entre $0,0304$ et $0,0354 \text{ jiW/cm}^2$, mais que les pubs ou les cafés, où un plus grand nombre de personnes se rassemblent pour utiliser des téléphones et des ordinateurs portables dans des endroits bondés, présentaient des expositions encore plus élevées, avec des expositions moyennes de $0,0526 \text{ jiW/cm}^2$. Cette étude a été menée en 2011, lorsque l'utilisation du GSM était répandue, avant la prolifération des téléphones intelligents utilisant l'UMTS. De même, Gryz et Karpowicz [192] ont mesuré le RFR intérieur dans le métro de Varsovie, en Pologne. La principale source d'exposition était le système GSM 900. Rowley et Joyner [160] ont trouvé l'exposition moyenne sur la base de 173 323 personnes.

mesures dans 21 pays du monde entier était de $0,073 \text{ jiW/cm}^2$ sur une décennie. Joyner et al. [193] ont effectué d'autres évaluations en Afrique pendant sept ans et ont trouvé des résultats cohérents avec l'étude précédente de 2012. Rowley et Joyner [161] ont analysé plus avant une base de données de plus de 50 millions de points de données provenant du réseau italien de surveillance des radiofréquences fixes sur le terrain entre juin 2002 et novembre 2006 et ont constaté que la valeur moyenne pour la bande des communications mobiles était de $0,047 \text{ jiW/cm}^2$. Ils ont conclu que les résultats des trois études étaient cohérents, quels que soient le continent, le pays, l'opérateur de réseau ou la limite réglementaire d'exposition aux RFR, ce qui permet de penser que les niveaux environnementaux moyens des systèmes de communications mobiles cellulaires sont inférieurs à $0,1 \text{ jiW/cm}^2$. Cependant, selon Estenberg et Augustsson [153], les méthodes de ces dernières études n'étaient pas bien décrites.

Avec l'introduction de nouveaux systèmes de communication et une utilisation accrue des téléphones mobiles, les niveaux de fond mesurés ont, sans surprise, augmenté. Urbinello et al [162], qui ont utilisé des dosimètres, ont constaté une augmentation combinée de 57,1 % des niveaux totaux de RFR dans les zones extérieures européennes étudiées en seulement un an, de 2011 à 2012, ce qui représente un environnement considérablement modifié sur une très courte période. Ils ont mesuré trois villes européennes - Bâle, en Suisse, Gand et Bruxelles, en Belgique - dans divers micro-environnements comprenant des centres de transport public (gares ferroviaires et routières), des zones intérieures (aéroports, chemins de fer, centres commerciaux) et des zones extérieures (résidentielles, centre-ville et banlieue). Le rayonnement RFR le plus élevé a été enregistré dans les zones de transport public, où les valeurs de mesure combinées allaient de $0,32 \text{ (} 272 \text{ jiW/m}^2 \text{)}$ à $0,59 \text{ V/m (} 862 \text{ jiW/m}^2 \text{)}$. Dans toutes les zones extérieures combinées, les valeurs variaient de $0,0128 \text{ jiW/cm}^2$ à $0,0446 \text{ jiW/cm}^2$. Les auteurs ont constaté que la plus forte augmentation dans les zones extérieures était due aux infrastructures de communication plutôt qu'aux combinés mobiles.

Les niveaux ambients dans les zones urbaines peuvent être très spécifiques au site, comme l'ont démontré Hardell et al. [154] lorsqu'ils ont étudié la gare centrale de Stockholm, en Suède, en utilisant le dosimètre EME Spy 200, qui balaye 20 bandes de radiofréquences différentes de 88 à 5 850 MHz, afin de collecter des données d'exposition aux RF. Au total, 1 669 points de données ont été enregistrés, les principales expositions provenant des liaisons descendantes. La valeur médiane de l'exposition totale était de $0,092 \text{ jiW/cm}^2$. Le niveau moyen de rayonnement RF total variait entre $0,28$ et $0,49 \text{ jiW/cm}^2$ pour chaque relevé par balayage (Des mesures moyennes élevées ont été obtenues pour la liaison descendante GSM + UMTS 900, variant entre $0,17$ et $0,21 \text{ jiW/cm}^2$. Des niveaux élevés ont également été obtenus pour la liaison descendante UMTS 2100 ; $0,044$ - $0,16 \text{ jiW/cm}^2$. De même, la liaison descendante LTE 800, la liaison descendante GSM 1800 et la liaison descendante LTE 2 600 se situaient dans la fourchette supérieure des mesures).

Des points chauds ont également été identifiés, par exemple à proximité d'une antenne murale donnant plus de $9,55 \text{ jiW/cm}^2$ et dépassant la limite de détection du dosimètre. Il convient de noter qu'il s'agit principalement d'expositions transitoires d'êtres humains se déplaçant dans la station, bien que les employés de la station soient soumis à des expositions prolongées, ainsi que toute la faune urbaine dans de tels environnements. Ces travaux illustrent les niveaux intérieurs élevés observés aujourd'hui, qui peuvent affecter les animaux domestiques et contribuer à l'augmentation des niveaux de fond en général au-delà des murs d'un bâtiment. Il est également indicatif de ce que les animaux sauvages pourraient rencontrer en se déplaçant à proximité de telles installations dans des zones extérieures.

Hardell et al. [155] ont par la suite étudié les expositions extérieures dans les principaux quartiers de Stockholm, en Suède. Les niveaux de RF ont été mesurés au cours de cinq tournées dans la vieille ville de Stockholm en avril 2016 à l'aide du dosimètre EME Spy 200 avec les mêmes 20 fréquences prédefinies mentionnées ci-dessus. Les résultats ont été basés sur un total de 10 437 échantillons à partir desquels ils ont constaté que le niveau total moyen de RF était de $0,4293 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$. Comme pour l'étude en intérieur, les niveaux moyens les plus élevés ont été obtenus pour la liaison descendante GSM + UMTS 900 et la liaison descendante LTE (long-term evolution) 2 600, respectivement à $0,16$ et $0,13 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$. Les places de la ville ont affiché les niveaux moyens totaux les plus élevés, avec un exemple sur la place Järntorget mesuré à $2,4 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$ (minimum $0,0257$, maximum $17,33 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$), alors que les résultats dans d'autres zones proches de la Cour suprême ont montré l'exposition totale la plus faible avec un niveau moyen de $0,0404 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$ (minimum $0,0002$, maximum $0,4088 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$). Les mesures effectuées dans les rues entourant le château royal étaient inférieures au total de la vieille ville, avec une moyenne de $0,0756 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$ (minimum $0,00003$, maximum $5,09 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$). Bien que leurs résultats soient inférieurs au niveau de référence de $1 000 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$ établi par la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP), cette norme de forte exposition, selon Hardell et al. (155), est moins crédible car elle ne tient pas compte des effets inférieurs aux seuils thermiques d'échauffement des tissus et n'est "... pas fondée sur une évaluation scientifique solide". Le niveau moyen le plus élevé qu'ils ont mesuré à Järntorget était de 0,24 % du niveau ICNIRP. De nombreuses études ont révélé des effets néfastes sur la santé bien en dessous de l'ICNIRP ou d'autres directives de ce type [100].

Les études de Hardell et al. [155] n'étaient pas compatibles avec celles de Tell et Kavet [147] qui ont constaté que les bandes FM contribuaient encore de manière significative aux expositions ambientes aux RFR. En effet, Hardell et al. [154, 155] ont trouvé des ordres de grandeur de FM inférieurs aux fréquences les plus courantes utilisées pour les télécommunications mobiles de toutes les sources, les contributeurs les plus importants étant les fréquences de téléchargement des stations de base des bandes GSM + UMTS 900, UMTS 2, 100, LTE 800, LTE 2,600 et GSM 1,800.

De même, dans une étude réalisée en Suisse, Sagar et al. [194] ont rapporté des mesures de RFR dans 51 micro-environnements extérieurs différents dans 20 municipalités différentes, alors qu'ils marchaient avec des exposimètres montés sur sac à dos (ExpoM-RF) dans cinq centres-villes, cinq zones résidentielles centrales, cinq zones résidentielles non centrales, 15 zones résidentielles rurales, 15 centres ruraux et six zones industrielles. Ils ont également constaté que les expositions aux liaisons descendantes des infrastructures étaient les plus importantes dans les zones extérieures et que les expositions augmentaient avec l'urbanité. Ils ont également constaté que les expositions aux liaisons montantes des combinés cellulaires n'étaient pertinentes que dans les zones de transport public (trains, bus, tramways), et que les mesures répétées étaient hautement reproductibles dans un délai de 2 à 4 mois. L'exposition moyenne aux RF-MF (somme des 15 bandes de fréquences principales entre 87,5 et 5875 MHz) était de 0,53 V/m dans les zones industrielles, 0,47 V/m dans les centres-villes, 0,32 V/m dans les zones résidentielles centrales, 0,25 V/m dans les zones résidentielles non centrales, 0,23 V/m dans les centres ruraux et les zones résidentielles rurales, 0,69 V/m dans les tramways, 0,46 V/m dans les trains et 0,39 V/m dans les bus. L'exposition la plus importante dans toutes les zones extérieures provenait des stations de base des téléphones portables (480 % pour toutes les zones extérieures en ce qui concerne la densité de puissance).

Dans l'étude la plus complète à ce jour, Sagar et al. [148, 149] ont mesuré les CEM/RFR dans 94 microenvironnements appariés dans six pays, dont la Suisse, l'Éthiopie, le Népal, l'Afrique du Sud, l'Australie et la région de Los Angeles aux États-Unis. Ils ont inclus à la fois des zones urbaines et rurales et des microenvironnements appariés dans les centres-villes, les zones résidentielles centrales, les zones résidentielles non centrales, les centres ruraux, les zones résidentielles rurales, les zones industrielles, touristiques et universitaires. Il s'agissait de la première étude - ironiquement initiée par des chercheurs européens - à réévaluer l'un des sites originaux de l'EPA/Tell et Mantiply (1980) aux États-Unis, où ils ont constaté que les niveaux ambients moyens avaient été multipliés par 70 (c'est-à-dire par 7 000 %) depuis l'enregistrement des données de référence de 1980 [152]. L'infrastructure cellulaire a été le principal facteur de cette augmentation. À l'aide d'appareils portables RFR ExpoM-RF et EME Spy 201, en marchant avec des appareils montés sur un sac à dos à hauteur de tête et à une distance de 20 à 30 cm du corps, ou en conduisant une voiture avec les appareils montés sur le toit à 170-180 cm du sol, ils ont mesuré 94 micro-environnements extérieurs ainsi que dans 18 véhicules de transport public dans les six pays. Les mesures ont été effectuées pendant environ 30 minutes en marchant et environ 15 à 20 minutes en conduisant dans chaque microenvironnement, avec un taux d'échantillonnage de 4 s (ExpoM-RF) et 5 s (EME Spy 201). Ils ont constaté une grande variabilité entre les pays et les régions d'un même pays, l'infrastructure de téléphonie cellulaire étant le principal facteur extérieur contribuant aux niveaux de fond actuels. La radiodiffusion RFR vient en deuxième position. Exposition moyenne totale aux RFR dans divers micro-environnements extérieurs

variaient respectivement entre 0,23 V/m dans les zones résidentielles non centrales de Suisse et 1,85 V/m dans une zone universitaire d'Australie ; et dans les bus de la Suisse rurale entre 0,32 et 0,86 V/m dans un auto rickshaw des zones urbaines du Népal. Les connexions RFR de liaison montante des combinés de téléphonie mobile étaient généralement très faibles, sauf dans les trains et les bus suisses et dans d'autres transports des pays de l'échantillon.

L'exposition dans les zones urbaines avait tendance à être plus élevée. L'exposition totale moyenne au RFR dans les centres-villes était de 0,48 V/m en Suisse, 1,21 V/m en Éthiopie, 0,75 V/m au Népal, 0,85 V/m en Afrique du Sud, 1,46 V/m en Australie et 1,24 V/m aux États-Unis. L'exposition correspondante en liaison descendante était de 0,47 V/m (Suisse), 0,94 V/m (Éthiopie), 0,70 V/m (Népal), 0,81 V/m (Afrique du Sud), 0,81 V/m (Australie) et 1,22 V/m (États-Unis).

Par rapport aux autres pays, les États-Unis présentaient des niveaux d'exposition élevés, allant de 1,4 mW/m² dans une zone résidentielle non centrale de Los Angeles à 6,8 mW/m² dans une zone moins peuplée du centre de la ville, près d'une autoroute. L'exposition totale médiane aux RFR dans les huit micro-environnements extérieurs de Los Angeles était de 3,4 mW/m². La Suisse, qui applique des normes d'exposition plus strictes basées sur des limites de précaution, présentait les niveaux mesurés les plus bas parmi tous les pays de l'étude.

Les études ci-dessus montrent une augmentation constante des niveaux environnementaux de RFR, principalement due à l'introduction des télécommunications mobiles. Toutes les études ci-dessus ont été menées avant l'introduction de la 5G, qui augmentera considérablement les niveaux de fond de RFR. Les niveaux de RFR ci-dessus, désormais omniprésents dans l'environnement, sont susceptibles d'affecter la faune et la flore, comme nous l'indiquons dans la deuxième partie.

Zones de nature sauvage : tours de téléphonie mobile dans les parcs nationaux ; entraînement militaire au-dessus de la péninsule olympique.

Les études citées dans la Partie 1, Supplément 1 ont été menées principalement dans des zones urbaines et suburbaines, avec une attention limitée portée aux environnements ruraux. Personne n'a encore mesuré le RFR environnemental dans les zones fortement boisées, probablement parce que l'on suppose que les expositions sont négligeables ou inexistantes. Les chercheurs sont traditionnellement plus curieux des effets sur les populations humaines. Cependant, les tours de téléphonie cellulaire transmettent maintenant dans nos vastes zones sauvages les plus profondes. En outre, les sources de radiofréquences environnementales comprennent les transmissions spatiales dirigées vers la Terre à des fins militaires et commerciales, les transmissions universelles par satellite pour le GPS, les expositions transitoires aux infrastructures aériennes telles que les dirigeables de Google [195] destinés aux zones rurales, les nouvelles plateformes satellitaires pour la connectivité Internet 5G et la technologie des drones,

et les dirigeables militaires utilisés dans les zones de guerre et/ou pour la sécurité et la surveillance des zones reculées [196]. Ces dirigeables créent leur propre infrastructure en décrivant des cercles autour de grandes zones ou en étant positionnés au-dessus d'un seul point de la surface de la Terre pour des applications civiles et militaires. Ils sont destinés à fournir des communications mobiles, en particulier dans les zones reculées dépourvues d'infrastructures terrestres, ainsi qu'en cas de catastrophe lorsque les infrastructures terrestres ne fonctionnent plus. Il se peut que l'exposition ambiante aux radiofréquences dans nos régions éloignées soit plus importante que nous ne l'avons supposé.

Aux États-Unis, la National Aeronautics and Space Administration [197] abrite le Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC) et, avec la Wildlife Conservation Society et le Center for International Earth Science Information Network (CIESIN 2018, [198]) de l'université de Columbia, a publié "The Last of the Wild Project, Version 2, 2005 (LWP-2) : Global Human Footprint Dataset (Geographic), v2 (1995-2004)". "Dans le cadre de ce programme, qui a permis d'accumuler des informations entre 1995 et 2004, la NASA a facilité la création de grands ensembles de données mondiales pour cartographier l'indice d'influence humaine (IHI) concernant les impacts sur l'environnement, afin de les utiliser pour la planification de la conservation de la faune, la gestion des ressources naturelles et la recherche sur les interactions homme-environnement. Dans des cellules de grille de 1 km (0,6 mi) créées à partir de neuf couches de données mondiales, l'IHI a évalué la pression démographique humaine (densité de population), l'utilisation humaine des terres/infrastructures (zones bâties, éclairage nocturne, utilisation des terres/couverture des terres) et l'accès humain (littoral, routes, chemins de fer, rivières navigables). CIESIN 2018 n'avait pas considéré la technologie cellulaire ou l'infrastructure de transmission comme des facteurs de conservation de la faune et de la flore, mais il s'agit d'un nouveau critère important à prendre en compte à l'avenir.

Un groupe de chercheurs [199] a utilisé la couverture des téléphones portables comme mesure de substitution de l'influence humaine sur la faune et la flore. Dans une étude de cas portant sur la vaste forêt atlantique brésilienne, les chercheurs ont d'abord démontré la corrélation entre la couverture des téléphones cellulaires et l'empreinte sans fil humaine mondiale, en utilisant une base de données de plus de 23 millions d'antennes. Ils ont ensuite établi une corrélation entre la présence de 45 espèces de mammifères de taille moyenne à grande et la couverture en téléphonie cellulaire de la forêt. Les chercheurs ont enregistré 18 211 points de présence de mammifères à partir d'observations personnelles, de traces d'animaux et d'images prises par des caméras à distance. Ils ont constaté que la probabilité que la faune soit présente dans des conditions de couverture cellulaire n'était en moyenne que de 18 %, la corrélation avec les espèces menacées étant bien plus faible (4 %). En d'autres termes, les espèces semblent éviter ces zones de rayonnement. Ils ont également noté que "La plupart des espèces ont montré une relation négative claire avec la couverture de téléphonie cellulaire, et les espèces menacées présentaient une probabilité encore plus faible, d'au moins 4 %, par rapport aux espèces non menacées. La forte relation positive entre

L'étude de la couverture des téléphones portables et du gradient de l'empreinte humaine à l'échelle mondiale a corroboré notre hypothèse *a priori* selon laquelle la couverture des téléphones portables peut servir de substitut à la présence humaine, même dans les zones forestières où aucune autre trace d'empreinte n'est facilement détectable. "Les espèces de grands félins, comme le jaguar (*Panthera onca*), et d'autres mammifères menacés semblaient les plus touchés en raison de leur absence dans les zones étudiées. Les auteurs n'ont pas tenu compte de la radiofréquence (RFR) ni des téléphones cellulaires individuels utilisés, mais uniquement de la possibilité de passer un appel téléphonique.

De nombreuses raisons expliquent l'abandon de ces zones par la faune sauvage, notamment la présence humaine elle-même ainsi que l'augmentation des infrastructures cellulaires, avec l'éclairage, le bruit, les routes d'accès et les connexions aux lignes électriques qui les accompagnent et qui créent des habitats perturbés/cassés depuis les travaux du Human Footprint Index de 2005 mentionnés ci-dessus. L'exploitation minière, l'exploitation forestière, la construction de routes, les barrages et d'autres perturbations humaines peuvent également entraîner l'abandon de la faune. L'étude de Macedo et al. [199] peut être une nouvelle mesure utile pour détecter les interférences humaines, en plus de ce qui est actuellement utilisé dans la planification de la conservation et la prise de décision. La prise en compte de l'introduction de CEM accrus provenant des transmissions, des conduits électriques et des nouveaux courants de terre dans les zones vierges peut créer de nouvelles expositions importantes que la faune peut ressentir (voir la partie 2 pour des informations sur la magnétoréception), entraînant également l'abandon de la faune. Les zones sans couverture de téléphonie cellulaire peuvent fournir un nouvel indicateur important pour les zones nécessitant une protection renforcée avant que la faune ne subisse des dommages [200].

En 2016, le parc national de Yellowstone, dans le Wyoming, disposait de cinq tours qui assuraient une couverture dans certaines des régions les plus reculées, une couverture supplémentaire arrivant dans le parc depuis des tours situées sur tous ses vastes périmètres [201]. Des propositions ont été faites pour le Theodore Roosevelt National Monument, dans le Dakota du Nord, pour installer une tour cellulaire 4G au bord de l'une des plus grandes étendues de nature sauvage. Le parc national du Mont Rainier, dans l'État de Washington, a prévu, malgré l'opposition, d'installer un système cellulaire 4G dans un centre d'accueil qui enverrait des radiofréquences dans la nature sauvage environnante [202]. Le parc national du Mont Rainier a également examiné les demandes de permis de droit de passage de Verizon Wireless et T-Mobile pour installer des installations de communication sans fil dans le centre d'accueil Jackson à Paradise, une zone complètement entourée de nature sauvage. Cette zone sauvage désignée par le gouvernement fédéral bénéficiait déjà d'une couverture importante grâce aux tours situées à sa périphérie.

En l'espace de quelques années, les propositions de pylônes ont augmenté de manière exponentielle, le gouvernement américain, encouragé par l'industrie, ayant fait de la couverture de nos régions les plus reculées sur les terres publiques fédérales une priorité. Si beaucoup considèrent cela comme nécessaire pour la sécurité publique, d'autres y voient une incursion dans nos derniers refuges sacrés sauvages emblématiques. Grand Teton

Le parc national du Wyoming prévoit un réseau tentaculaire de tours cellulaires à l'intérieur de ses limites, sur une longueur de 72 km, qui pourrait permettre une pénétration importante des signaux [203]. Six nouvelles tours ont été autorisées ces dernières années dans le parc national de Yosemite, une nouvelle tour de 42 m dans le parc national de Sequoia, de nouvelles antennes sur un centre d'accueil sur le mont Rainier, cinq nouvelles tours proposées sur le bord du canyon dans le Grand Canyon et une infrastructure améliorée dans le parc Yellowstone qui multiplierait la capacité par 38 [203]. Le fait que le National Park Service promeuve un vaste déploiement technologique de sites sans fil - y compris des petites cellules attachées à des bâtiments existants, des tours et des hubs WiFi améliorés dans un grand nombre des 62 parcs nationaux - est troublant. À lui seul, le parc de Grand Teton devrait accueillir neuf nouvelles tours en plus des deux existantes, ainsi que 100 km de nouveaux câbles en fibre optique pour le raccordement. Le Glacier National Park, dans le Montana, prévoit au moins quatre nouvelles tours ; de nouvelles tours sont également prévues à Olympic et Bryce Canyon, ainsi qu'à Glen Canyon National Recreation Area. À Yellowstone, les utilisateurs de téléphones portables peuvent déjà capter des signaux faibles dans une grande partie de l'arrière-pays du parc, qui s'étend sur 9 065 km (3 500 square-mile)² [204].

Alors que certaines des premières demandes de tours ont fait l'objet d'un examen environnemental minimal, les constructions les plus récentes ont échappé à la surveillance réglementaire parce que le National Park Service a déclaré des propositions spécifiques comme étant catégoriquement exclues, ce qui a empêché l'examen complet du National Environmental Policy Act (NEPA) et la mise en œuvre d'une déclaration d'impact environnemental (EIS) [204]. Tout cela a été facilité par les nouvelles règles de la FCC qui limitaient le contrôle local, l'examen environnemental et le respect de la loi sur la préservation de l'histoire nationale. Cette décision de la FCC a depuis été contestée avec succès devant un tribunal fédéral par le Natural Resources Defense Council [205]. Les effets potentiels de la RFR sur la faune forestière n'ont pas été pris en compte, mais devraient faire partie de toutes les demandes soumises à l'examen NEPA (voir partie 3).

Il est bien connu que la perte de propagation des signaux peut être due à plusieurs facteurs, notamment la hauteur de l'antenne, la dépolarisation, l'humidité/la pluie, les espèces d'arbres et d'autres variables [206]. Toute tentative de diriger intentionnellement de forts signaux RFR vers des zones forestières éloignées à partir d'émetteurs terrestres est compliquée par les feuilles des arbres qui absorbent, déforment et diffusent les signaux dans une myriade de directions, principalement en raison de leur teneur en humidité. Les arbres vivants avec des feuilles humides absorbent le plus efficacement les RFR, tandis que les arbres morts sans feuilles en absorbent le moins [207]. Certaines espèces d'arbres à feuilles persistantes ont également des propriétés résonantes dues à la configuration de leurs aiguilles.

La 5G est particulièrement préoccupante en ce qui concerne la végétation, surtout si elle est basée sur les satellites. Les aspects techniques de la perte de propagation dans les environnements forestiers font donc l'objet d'une attention renouvelée depuis que les zones rurales sont ciblées par les services 5G.

régions pour une utilisation par satellite. Le sujet présente également un intérêt pour le développement de réseaux de capteurs sans fil utilisant des émetteurs-récepteurs de faible puissance dans des régions éloignées à des fins scientifiques et de surveillance [206]. Dès 1997, la Commission fédérale des communications des États-Unis a publié un rapport [208] sur les caractéristiques de propagation des ondes millimétriques (MMW), qui comprenait des informations sur la perte de signal due au feuillage. Dans la gamme de fréquences entre 200 MHz et 95 GHz, la perte de signal due au feuillage à 40 GHz à une pénétration de 32,9 pieds (10 m) - ce qui équivaut à un grand arbre ou à deux en tandem - a été déterminée comme étant d'environ 19 dBm (une unité de mesure des niveaux de puissance des CEM-RFR exprimée en décibels référencés à 1 mW). Le rapport note qu'il ne s'agit pas d'une valeur négligeable de perte de signal. Le rapport traite également des effets d'atténuation du signal dus à la pluie, ainsi que de l'absorption de la vapeur d'eau et de l'oxygène, notant que les fréquences de résonance inférieures à 100 GHz se produisent à 24 GHz pour la vapeur d'eau et à 60 GHz pour l'oxygène. Hakusui [209] a également étudié les propriétés d'absorption de l'oxygène à 60 GHz, comme d'autres l'ont fait. Il peut y avoir des implications pour le changement climatique (voir partie 3).

Une normalisation plus claire de la dosimétrie est demandée pour la mise en place de la 5G en général, y compris dans les zones urbaines, car les arbres peuvent également affecter la conception des réseaux 5G dans ces zones. Les entités gouvernementales publient désormais des rapports sur les impacts sur les performances des réseaux 5G dus à des caractéristiques physiques qui n'étaient pas prises en compte auparavant dans la planification des réseaux, notamment la végétation. L'accumulation de nouvelles données de propagation est désormais considérée comme une condition préalable essentielle à l'utilisation de fréquences plus élevées par la 5G [210].

Malheureusement, ces examens sont menés dans le cadre de la mise en place rentable de la 5G, qui utilisera le spectre à large bande allant des basses fréquences aux ondes moyennes, et non comme un outil permettant d'atténuer les dommages causés à la flore, qui peuvent être considérables. En fin de compte, l'"écologisation" des villes pour compenser les effets du changement climatique pourrait s'avérer incompatible avec la 5G. Et il n'y a aucun moyen de savoir à ce stade ce que l'exposition à la 5G depuis les satellites peut faire aux zones forestières profondes ou aux conditions climatiques compte tenu des facteurs de résonance impliquant les molécules d'eau et d'oxygène.

Entraînement militaire au-dessus de l'Olympic National Forest et de l'Olympic National Marine Sanctuary : une étude de cas

L'une des incursions intentionnelles les plus spectaculaires de RFR dans des terres forestières vierges protégées par le gouvernement a été proposée en 2012 par le programme Northwest Training & Testing du ministère de la Marine des États-Unis [211-213] pour pratiquer des exercices de jeux de guerre électroniques dans l'espace aérien au-dessus du parc national olympique (site du patrimoine mondial de l'UNESCO), de l'île olympique et de l'île de la Réunion.

National Forest, et Olympic National Marine Sanctuary - tous situés dans ou au large de l'Etat de Washington. Le sanctuaire marin est l'habitat clé préféré de 29 espèces de mammifères marins, dont les baleines grises en migration. Le parc national et la forêt nationale sont des habitats clés pour deux espèces d'oiseaux migrateurs inscrites sur la liste des espèces menacées - le guillemot marbré (*Brachyramphus marmoratus*), un oiseau de mer plongeur qui niche dans les forêts anciennes, et la chouette tachetée du Nord (*Strix occidentalis caurina*), qui ne prospère que dans les habitats tranquilles et intacts des forêts anciennes. En fait, toute la côte Pacifique se trouve sur la voie de migration critique du Pacifique pour les oiseaux migrateurs. On estime qu'un milliard d'oiseaux migrent chaque année le long de cette voie [214]. Le parc national olympique est largement considéré comme l'une des plus belles régions sauvages de la planète, où les basses terres de la forêt pluviale tempérée sont surmontées de pics glaciaires majestueux. Désigné autrefois comme "l'endroit le plus calme" d'Amérique par l'écologiste acoustique Gordon Hempton du projet One Square Inch [215-217], il abrite plusieurs espèces végétales et animales qui n'existent nulle part ailleurs sur Terre.

Le projet de grande envergure de la Marine prévoit un entraînement sur terre, dans les airs, en mer et sous l'eau, y compris dans les zones offshore du nord de la Californie, de l'Oregon et de l'Etat de Washington, dans les eaux intérieures de Puget Sound, dans les îles San Juan, dans de nombreuses parties de la péninsule olympique, dans certaines régions du Canada et dans le canal Behm occidental au sud-est de l'Alaska [218, 219]. La marine effectue des exercices similaires - sans toutefois atteindre l'ampleur de la mise à niveau actuelle - dans cette zone depuis des dizaines d'années, car elle comprend les environnements complexes que le personnel des services peut rencontrer [220].

Après d'importants commentaires de la part de la communauté et une longue étude environnementale menée par des experts opposés à la proposition, la marine a publié son projet d'étude d'impact environnemental supplémentaire (DEIS) prévoyant une augmentation des entraînements et des vols au-dessus du parc national olympique [221]. Il ne faut pas sous-estimer les effets négatifs potentiels des CEM résultant des exercices modernisés. La manipulation du spectre électromagnétique est devenue une caractéristique de guerre offensive et défensive prééminente menée sur terre, dans les airs et sur/sous les océans du monde. Les exercices de la marine, menés dans le cadre du programme Northwest Training and Testing [222], n'ont pas donné d'informations (pour des raisons de sécurité) sur toutes les caractéristiques de signalisation, mais pour l'activité terrestre, ils utiliseront des fréquences entre 4 et 8 GHz à une puissance de 90-300 W, 45 minutes par heure, à des intensités thermiques et non thermiques, selon des communications personnelles entre la marine et l'U.S. Fish and Wildlife Service [223, 224].

Alors que la marine exploite depuis la Seconde Guerre mondiale la station aéronautique navale située sur l'île voisine de Whidbey Island, la proposition de création d'un nouveau centre de contrôle de l'aviation civile a été rejetée.

Les mises à niveau pourraient à terme ajouter jusqu'à 160 nouveaux avions de guerre à réaction supersoniques EA-18G "Growler" - les avions les plus bruyants du ciel - au programme de guerre par rayonnement électromagnétique du Nord-Ouest [221, 222, 225]. Les exercices d'entraînement peuvent se dérouler jusqu'à 366 mètres au-dessus du niveau de la mer (AGL), ce qui correspond bien à l'altitude des mouvements migratoires et des vols quotidiens de nombreuses espèces aviaires telles que les oiseaux aquatiques, les oiseaux de rivage, les rapaces et les oiseaux chanteurs, entre autres [226]. Des études menées par les services de la faune de l'USDA/APHIS sur les mouvements du balbuzard pêcheur (*Pandion haliaetus*) autour de la base aérienne de Langley, à Hampton, en Virginie, ont montré que les balbuzards atteignaient fréquemment ces altitudes lors de leurs déplacements pour se nourrir ou pour conquérir leur territoire, et qu'ils migraient à des hauteurs de vol de 396 m AGL en moyenne, à des vitesses d'environ 56 km/h [227].

Sur terre, les exercices comprennent des camions mobiles transportant des émetteurs de radiofréquences montés à 14 pieds de haut le long de chemins de terre éloignés qui peuvent atteindre des sommets élevés ou des lignes de crête au cœur de la forêt pour communiquer avec les avions de guerre. Il existe également de nouvelles tours cellulaires fixes. Il y a 2 900 exercices autorisés au-dessus de la nature sauvage et de certaines communautés, 260 jours par an, d'une durée de 8 à 16 heures par jour. D'autres exercices d'entraînement au-dessus/sous l'eau utilisent des sonars et des lasers susceptibles d'avoir des effets néfastes sur les poissons et les animaux marins [228] ; voir également la partie 2 pour les effets potentiels sur les mammifères aquatiques, les poissons et les tortues).

Les Growlers sont équipés de détecteurs multi-fréquences à très haute intensité et d'une technologie de brouillage radar capable d'avoir des effets thermiques et non-thermiques sur les humains et la faune. Une estimation de l'exposition lors d'exercices a montré que le fait de passer plus de 15 minutes dans les zones désignées pouvait entraîner des dommages thermiques [213]. L'entraînement bidirectionnel en plein vol fait appel à des RFR dirigés d'avion à avion, de sol à air et d'air à sol. Malgré des études environnementales de portée limitée, on ne sait pas exactement quels effets cela peut avoir sur l'environnement [228].

Après un long processus d'examen requis par la loi sur la politique environnementale nationale [229], la marine a publié une déclaration d'impact sur l'environnement (EIS) et une déclaration d'impact sur l'environnement outre-mer (OEIS) finales [230], mais les conclusions finales, qui sont restées les mêmes que dans les versions précédentes, avaient été largement critiquées comme étant inadéquates en raison de ses conclusions générales d'"absence de dommage", de la sous-estimation flagrante des activités actuelles et proposées, de la segmentation inappropriée des activités pour minimiser l'examen des impacts substantiels collectifs en violation de la NEPA qui ne permet pas une telle segmentation, et de l'ignorance des effets potentiels du bruit [225, 231-233]. En mars 2017, l'EPA a demandé davantage d'informations sur les effets potentiels du bruit, mais n'a rien mentionné des effets des CEM sur la faune et la flore ou sur les humains. Le DEIS de la Marine a minimalement

a abordé la question des CEM, mais s'en est tenu à plusieurs reprises à un langage clairsemé de la loi sur les espèces menacées, notant que les dispositifs électromagnétiques utilisés pendant l'entraînement peuvent affecter - mais *ne sont pas susceptibles d'affecter négativement* - les diverses espèces examinées, principalement les animaux marins et certains oiseaux. Leurs conclusions sont restées les mêmes en 2020 [234].

L'accord de l'U.S. Fish and Wildlife Service (FWS) [235, 236] a été obtenu en dépit du fait que d'anciens scientifiques de l'agence avaient demandé plus de prudence [212]. Une attention particulière a été accordée au Guillemot marbré, une espèce en voie de disparition, qui niche à cet endroit, ainsi qu'à la Chouette tachetée, qui serait protégée des expositions aux CEM sous le couvert forestier. Le couvert forestier, cependant, est facilement pénétré par les RFR, même si les arbres sont des atténuateurs efficaces [237, 238]. L'U.S. FWS a noté que la transmission en visibilité directe limiterait les expositions de la faune ; que seuls les oiseaux en vol au-dessus de la canopée des arbres pourraient être affectés. Ils ont constaté que les guillemots marbrés pouvaient être exposés de façon intermittente aux RFR pendant leur vol, mais que les chouettes tachetées sous le couvert forestier ne le sont pas. Ils ont ensuite conclu que les effets d'expositions brèves et intermittentes aux 4-8 GHz seraient probablement insignifiants pour les oiseaux en vol. Ils ont écarté les effets physiques de l'échauffement des tissus et/ou des brûlures [235].

Selon la plupart des critères, la Marine et le FWS ont effectué des examens médiocres [233]. Bien qu'ils aient inclus plusieurs études sur les oiseaux et la faune [9, 15, 20, 22, 95, 239, 240], ils les ont rejetées pour diverses raisons. Seule l'étude de Bruderer et al. [241], portant sur une exposition d'environ 9 GHz, a été jugée applicable, mais elle n'a révélé aucun effet sur les habitudes de vol des oiseaux en présence du radar. D'autres recherches non examinées qui auraient pu être appliquées comprennent des études comportementales sur le terrain concernant les RFR [17, 242], la mortalité [134, 243, 244], les résultats de la reproduction [16, 18] et la recherche de nourriture par les chauves-souris [36] en présence d'un radar. La présence de RFR exogènes pourrait également perturber la magnétoréception sensible de nombreuses espèces, affectant les modèles de migration des oiseaux et des insectes.

Il n'y a toujours pas de surveillance des effets des CEM sur la faune dans les vastes zones d'entraînement terrestres et maritimes, bien que la version finale de l'EIS/OEIS de la Marine ait noté que les sources d'exposition électromagnétique aérienne d'un seul navire fonctionneraient en continu sur une large gamme de fréquences - allant de 2 MHz à 14 500 MHz, avec une puissance moyenne maximale comprise entre 0,25 et 1 280 000 W [234]. Une publication de l'un des auteurs de cet article [96] a été utilisée pour justifier l'approbation du programme en se basant sur les comportements naturels d'évitement des oiseaux en cas d'inconfort physique, comme le chauffage thermique. Les conclusions de la Marine et de l'U.S. FWS selon lesquelles il n'y aura pas d'impact à long terme ou au niveau de la population sur les oiseaux ne sont peut-être pas soutenables.

Bien que la loi permette à l'armée d'utiliser les terres publiques pour s'entraîner, cette incursion profonde dans des terres publiques vierges et protégées de l'État de Washington est une mauvaise nouvelle.

Précédent. Le projet de la Marine est peut-être en violation des lois fédérales, notamment du code américain 475 (LII, 2018), qui décrit les objectifs pour lesquels les forêts nationales ont été créées et la manière dont elles doivent être administrées. Le service forestier américain a néanmoins accordé à la marine un permis d'utilisation spéciale préliminaire. L'Association pour la conservation des parcs nationaux (NPCA) avait soumis en 2016 une demande au titre de la loi sur la liberté d'information (FOIA) à la Marine concernant le bruit des Growler et les perturbations environnementales. Après que la Marine ait retenu à plusieurs reprises des informations critiques en vertu de la FOIA sur l'entraînement au survol des avions, la NPCA a intenté un procès à la Marine à la mi-2019 pour que ces informations soient divulguées. Au moment de la rédaction de ce document, aucune décision de la cour fédérale n'a été prise concernant le procès FOIA.

En 2020, après le début des exercices d'entraînement modernisés, les niveaux sonores des survols ont été jugés par Kuehne et al. [245] à 110 ± 4 dB re 20 μ Pa rms et 107 ± 5 dB A, comme dépassant les seuils connus d'impacts comportementaux et physiologiques pour les humains, ainsi que pour les oiseaux et les mammifères terrestres. Même les niveaux sonores sous-marins de l'avion, à 134 ± 3 dB re 1 μ Pa rms, ont dépassé les seuils connus pour déclencher des changements de comportement chez les poissons, les oiseaux de mer et les mammifères marins, y compris les épaulards résidents du sud (*Orcinus orca*), une espèce menacée. Bien que les ondes sonores ne soient pas strictement considérées comme des CEM, leur inclusion ici illustre les effets anthropiques négatifs dus à une surveillance réglementaire inadéquate.

La marine a été autorisée à introduire l'avion le plus bruyant du ciel dans l'un des endroits les plus calmes des États-Unis, avec les CEM complexes à courte portée qui l'accompagnent. À l'exception de ce programme d'entraînement aux RF de haute intensité dans l'État de Washington, la plupart des études citées tout au long de ces articles consécutifs ont révélé que les expositions ambiantes étaient inférieures à toute directive internationale pour les humains, mais bien en deçà de la gamme observée pour affecter la flore et la faune.

Les nouvelles technologies : 5G et l'internet des objets (IoT)

Nous sommes sur le point d'introduire une nouvelle couche dense et expansive de RFR dans l'environnement bâti mondial et dans les régions rurales en utilisant les ondes millimétriques (MMW) de très haute fréquence (EHF) entre 30 et 300 GHz pour les télécommunications de cinquième génération (5G). Sur le spectre électromagnétique, cette bande se situe entre les bandes de super-hautes fréquences (micro-ondes) et les bandes optiques (infrarouges).

La 5G est un réseau sans fil de communications de machine à machine appelé "Internet des objets" (IoT) qui

permettra des communications à distance entre une multitude de dispositifs et d'appareils, tels que des téléphones portables et des réfrigérateurs, des lampes, des fours, des unités de divertissement, des systèmes de sécurité pour les maisons et les entreprises, des appareils médicaux, des voitures sans conducteur et toutes les choses imaginables et "... encore à imaginer..." [89]. Certaines de ces applications sont déjà disponibles sur la 4G LTE pour les environnements domestiques "intelligents" que les consommateurs peuvent contrôler à distance via leurs propres systèmes WiFi. D'autres sont programmables, comme les thermostats, et ne nécessitent aucune interaction humaine en temps réel au-delà de la configuration. Étant donné que n'importe lequel de ces portails sans fil ouvre l'accès à tous les autres, y compris les systèmes informatiques et les téléphones sans fil, la sécurité est une préoccupation majeure. De nombreux cas de piratage d'appareils domestiques intelligents, tels que des réfrigérateurs et des babyphones, ont déjà été signalés [246]. Alors que la description ci-dessus concerne les applications grand public de la 5G, la 5G est principalement destinée à l'accumulation de données commerciales et à des utilisations telles que le suivi d'Internet et des consommateurs.

Comme la 5G fonctionne dans des fréquences beaucoup plus élevées avec des longueurs d'onde plus courtes que les itérations précédentes des communications sans fil, une vaste nouvelle couche d'infrastructure nécessitant des millions de nouvelles antennes placées très près les unes des autres - selon certaines estimations, toutes les 2 à 5 maisons - sera nécessaire pour fournir une couverture omniprésente. Cette densification s'explique par le fait que les ondes millimétriques sont facilement atténuées et diffractées par les bâtiments, les arbres, d'autres types de végétation, la topographie et les conditions météorologiques (y compris la pluie), ainsi que par le passage à des fréquences plus élevées car il reste peu de place dans les bandes de micro-ondes à ultra-haute fréquence (UHF) actuellement utilisées pour les télécommunications entre 800 MHz et 2 250 GHz. Les réseaux 5G fonctionnent principalement à partir de tours cellulaires plus hautes (macrocellules) via des systèmes d'antennes distribuées (DAS) et/ou des antennes de petites cellules (microcellules) fixées aux bâtiments, aux poteaux électriques et aux lampadaires municipaux à proximité immédiate de la population humaine. Le câble à fibre optique assure la liaison entre les antennes. Les réseaux de fibre optique jusqu'aux locaux, plus sûrs sur le plan environnemental, et les applications sans fil 5G ne peuvent plus être séparés. Là où les réseaux de fibre optique existent, les petites cellules sans fil s'y grefferont [247, 248]. À 28-95+ GHz, cette gamme de fréquences est nettement supérieure aux 2,45 GHz utilisés dans les télécommunications actuelles ou dans des produits comme les fours à micro-ondes. En fait, la véritable 5G est conçue pour être un réseau à ultra-large bande qui peut englober une large bande de fréquences entre la gamme des faibles MHz et éventuellement 95+ GHz. En outre, il existe des catégories générales pour les bandes basses (<1 GHz), moyennes (entre 1 et 6 GHz) et hautes (>24 GHz) qui peuvent être utilisées dans diverses itérations de la 4G LTE et éventuellement de la 5G [247].

Les États-Unis ont été parmi les premiers pays à approuver la mise en place de la 5G avec des ventes aux enchères de licences dans les gammes 24, 28, 37, 39 et 47 GHz jusqu'à présent, des bandes plus élevées s'étendant au-delà de 95 GHz étant allouées pour une utilisation future [89, 249, 250]. À l'heure où nous écrivons ces lignes, la mise en place de véritables réseaux 5G est limitée - certains systèmes annoncés comme 5G sont en réalité des 4G LTE améliorés - dans certaines villes américaines et sur des réserves militaires [251]. D'autres pays ont fait un bond en avant avec la 5G, notamment la Chine, la Corée du Sud, le Royaume-Uni, l'Italie, l'Espagne, l'Allemagne, l'Irlande, l'Australie et les Émirats arabes unis [252]. Mais dans l'ensemble, la mise en place de la 5G à grande échelle a été quelque peu lente à venir pour des raisons - techniques, financières, de santé humaine et sociétales. Certains pays d'Europe, ainsi que le Canada et la Russie, font preuve de prudence [92, 93, 253]. On observe également une résistance à grande échelle des consommateurs dans de nombreux pays et de nombreuses pétitions de professionnels demandant un ralentissement jusqu'à ce que l'on en sache plus sur les impacts de la 5G [254]. Des réseaux 5G basés dans l'espace sont également en cours de construction, renvoyant des ondes millimétriques vers la Terre à partir de milliers de nouveaux satellites en orbite moyenne et basse.

L'ensemble de ce développement a été réalisé sans pratiquement aucune considération ou examen environnemental [89, 249]. À partir de 2017, le Congrès américain a adopté plusieurs projets de loi autorisant la 5G, mais une importante résistance locale et étatique s'est manifestée face à ce qui est largement considéré comme un don de couloirs d'utilité publique (où la plupart des antennes 5G terrestres seront montées) à des entreprises privées sans compensation adéquate ni examen du zonage local [255]. Néanmoins, la pression de l'industrie a réussi à influencer les législateurs américains et la FCC pour contourner l'examen local de l'importance environnementale et historique concernant l'emplacement de l'infrastructure. Aux États-Unis, aucun examen environnemental n'a été recommandé avant la construction [89]. En effet, la FCC a rationalisé l'examen des effets environnementaux et de l'importance historique au niveau local et de l'État en passant outre à la législation fédérale exigeant de tels examens en vertu de la loi nationale sur la protection de l'environnement (NEPA) et de la loi nationale sur la préservation de l'histoire (NHPA). Mais le Natural Resources Defense Council a contesté cette décision devant les tribunaux et a gagné [205], préservant ainsi le NEPA pour l'instant (pour plus d'informations, voir la partie 3).

Utilisation militaire des ondes millimétriques

Les ondes millimétriques sont utilisées par l'armée américaine depuis le début des années 1980 [256, 257]. Les ondes millimétriques sont appelées ainsi car leurs longueurs d'onde sont plus petites (environ 1/8e de pouce ou 3,2-5 mm de long) que les micro-ondes utilisées dans la technologie des téléphones cellulaires/WiFi à 2,4 GHz (6,3 pouces ou 12,5 cm). Plus la longueur d'onde est petite

Plus la longueur d'onde est grande, plus la densité d'énergie par unité de longueur d'onde est élevée. Dans le cas présent, elle est environ 25 fois plus élevée avec les MMW qu'avec les micro-ondes de la technologie cellulaire [258]. Cela signifie que les MMW sont capables d'entraîner des dommages importants dans tout le biome, y compris éventuellement sur l'ensemble de la flore et de la faune présentes, mais pas en raison de la seule longueur d'onde. Les multiples effets biologiques de l'absorption d'énergie intense à de très petites longueurs d'onde, par exemple dans les cellules de la peau humaine ou de toute espèce à la peau fine, et en particulier chez les insectes qui ne disposent pas d'un système efficace de dissipation de la chaleur, peuvent provoquer un échauffement intense avec destruction cellulaire concomitante et mort de l'organisme. Beaucoup de ces effets sont indépendants de la densité de puissance et ne sont donc pas couverts par les réglementations actuelles qui sont basées sur la densité de puissance et/ou le DAS. Il existe cependant une disposition dans les nouvelles normes de l'ICNIRP qui soumet les MMW et 5G à des mesures de dosimétrie en densité de puissance dans les hautes fréquences, et non en DAS (voir partie 3).

Les ondes millimétriques n'ont jamais été utilisées auparavant pour les télécommunications civiles, bien que l'armée américaine ait utilisé des ondes millimétriques à 95 GHz pour le contrôle des foules et la défense des périmètres dans une technologie d'énergie dirigée de chauffage de la peau appelée "Active Denial" dans le cadre du programme américain d'armes non létale [259]. L'armée a déployé la technologie MMW en 2006 en Afghanistan et lors de la deuxième guerre d'Irak avec une arme de déni actif montée sur des Humvees. Nommée Project Sheriff, cette arme est un dispositif conçu par Raytheon dans son système de protection Silent Guardian. Les effets biologiques font l'objet de recherches depuis des décennies au sein de la division des effets biologiques de l'énergie dirigée, direction de l'efficacité humaine, laboratoire de recherche de l'armée de l'air à la base aérienne de Brooks à San Antonio (Texas) [260], ainsi que dans d'autres laboratoires et programmes militaires tels que la Defense Advanced Research Projects Agency [261]. Malheureusement, la plupart de ces recherches financées par les contribuables sont classifiées, alors même que le public a un besoin critique de savoir avec la mise en place de la 5G, la prolifération de la désinformation dans les médias et l'émergence de théories du complot. D'autres pays, comme la Russie et la Chine, ont également adopté des technologies d'énergie dirigée.

L'armement de déni actif a été développé à l'origine par l'armée pour les grands montages sur le toit des véhicules militaires, mais des unités mobiles beaucoup plus petites ont été déployées dans des avions et des véhicules terrestres en mouvement. Raytheon a mis au point une version plus petite de Silent Guardian à l'intention des forces de l'ordre non militaires et d'autres prestataires de services de sécurité. Ce système fonctionne à l'aide d'un joystick et d'un écran de visée qui peut viser des personnes situées à plus de 250 mètres. Une prison du comté de Los Angeles a installé une unité au plafond. Ces systèmes basent leur réponse sur une sensation de chaleur intolérable dans la peau avec le

accompagnant un comportement instinctif d'évitement. La sensation est censée cesser rapidement lorsque le faisceau est éteint ou que la personne se déplace hors de portée. Cependant, plusieurs rapports indiquent que les sensations d'engourdissement peuvent durer des heures et que des cloques se sont formées [262].

L'armée américaine continue de développer son programme d'armes non létale, annonçant en 2019 un contrat de 30,8 millions de dollars américains à General Dynamics pour la recherche sur les systèmes d'énergie dirigée, les biomécanismes, l'analyse de l'efficacité humaine et l'intégration dans le cadre du programme Directed Energy Bio-effects Research (DEBR) de l'armée de l'air américaine. L'objectif est de quantifier les effets des armes à énergie dirigée en utilisant les rayonnements optiques, RFR et MMW, ainsi que les caractéristiques de propagation électromagnétique [263]. Il reste à voir si ces informations seront déclassifiées ou si elles seront appliquées aux impacts sur la faune.

La Russie a adopté une approche différente en utilisant des fréquences plus basses pour la 5G et a installé des moniteurs à Moscou pour mesurer/étudier les effets de la 2G à la 5G sur les citoyens sous l'égide de l'Institut de recherche sur la santé au travail Izmerov. L'institut enverra les résultats au ministère de la santé et au service fédéral de surveillance de la protection des droits des consommateurs et du bien-être humain pour la détermination finale des normes de sécurité humaine [264]. Aucune étude épidémiologique similaire n'est menée aux États-Unis et il reste à voir si la Russie publiera ses résultats ou même les paramètres de ses recherches.

Les adaptations des télécommunications civiles pour la 5G dans des fréquences inférieures à 95 GHz sont théoriquement inférieures aux intensités de puissance thermique [111, 265]. Cependant, cela ne signifie pas que les préoccupations sérieuses ne sont pas fondées. Les récentes mises à jour des normes de l'ICNIRP proposent des autorisations qui permettront aux expositions de dépasser les seuils thermiques dans certaines circonstances (voir partie 3). Il s'agit d'une région du spectre électromagnétique qui a reçu peu d'attention de la part des groupes professionnels civils qui établissent les normes d'exposition, en partie parce que peu d'appareils grand public ont fonctionné dans cette gamme de fréquences auparavant et que les appareils utilisant déjà les MMW ont traditionnellement eu peu d'applications pour des niveaux élevés d'exposition humaine [111, 265]. Tout cela est sur le point de changer. Les nouveaux réseaux 5G utilisent également des caractéristiques de signalisation extrêmement complexes qui ne sont pas bien étudiées ou comprises, notamment l'orientation du faisceau, le MIMO (entrées multiples, sorties multiples) massif et le réseau phasé qui ont des propriétés biologiquement actives uniques.

Certains supposent un risque minimal et/ou réversible pour l'homme en raison de la faible pénétration de l'énergie des MMW, de la courte longueur d'onde et du comportement de fuite rapide induit. Les dommages causés à la faune sont considérés comme collatéraux, s'ils sont pris en compte.

Les ondes millimétriques et les effets biologiques

On sait depuis plus de 100 ans que les ondes millimétriques sont très actives sur le plan biologique [266-268]. Comme l'ont noté Pakhomov et al. [269], les oscillations cohérentes dans cette gamme de fréquences sont pratiquement absentes de l'environnement électromagnétique naturel, ce qui indique des conséquences potentielles importantes puisque les organismes vivants n'ont pas pu développer de mécanismes d'adaptation aux MMW au cours de l'évolution et du développement, contrairement à d'autres domaines du spectre électromagnétique. En outre, Golant [270, 271] et Betskii [272] ont noté que certaines caractéristiques spécifiques du rayonnement MMW, ainsi que l'absence de "bruit" externe MMW de fond, peuvent indiquer que cette bande est importante pour la communication au sein des cellules vivantes et entre elles. En d'autres termes, il peut y avoir une raison à l'absence de MMW dans l'environnement de fond, et plus important encore, à cause de cette absence, les cellules vivantes peuvent avoir développé leurs propres utilisations dédiées dans cette zone du spectre électromagnétique.

Betskii et al. [273] ont également souligné que le rayonnement MMW est pratiquement absent de l'environnement naturel en raison de la forte absorption par l'atmosphère et du fait que les ondes MMW sont facilement absorbées par la vapeur d'eau. Les auteurs ont développé l'hypothèse selon laquelle les ondes électromagnétiques de faible intensité peuvent avoir de larges effets non spécifiques sur les structures/organismes biologiques et que les fonctions cellulaires vitales peuvent être régies par des ondes électromagnétiques cohérentes EHF. Leurs résultats incluent l'alternance des EHF/MMW utilisés pour l'interaction entre les cellules adjacentes, inter reliant/contrôlant ainsi les processus intercellulaires dans l'organisme entier. Les auteurs susmentionnés [269-273] ont noté que, bien que ces idées soient théoriques, elles peuvent plausiblement expliquer la haute sensibilité aux ondes électromagnétiques observée chez les sujets biologiques.

Les expositions ambiantes chroniques à long terme et de faible niveau aux MMW n'ont pas encore été étudiées, mais certaines extrapolations peuvent être faites à partir de la vaste base de données existante. Ces fréquences plus élevées peuvent également avoir des effets biologiques uniques sur les espèces non humaines en raison des différences de taille, des caractéristiques physiologiques distinctes et des divers habitats. Les environnements aqueux et la forte teneur en eau des organismes vivants peuvent rendre les expositions aux MMW particulièrement uniques en raison de la façon dont les MMW se propagent dans l'eau sans pratiquement aucune impédance [274-279]. De plus, contrairement au RFR à des fréquences plus basses, dans la gamme EHF/MMW, une faible densité de puissance peut entraîner un DAS local très élevé en raison de la concentration d'énergie dans un petit volume dans un organisme exposé. L'échauffement peut être inévitable [280].

L'énergie des ondes millimétriques, avec les très petites longueurs d'onde associées à ce type de rayonnement haute fréquence, se couple de manière optimale avec le tissu cutané humain. En raison de

Grâce à ce couplage efficace avec la peau, des effets bénéfiques/thérapeutiques sont connus depuis des décennies, en particulier dans les pays de l'ex-Union soviétique, suite à des expositions de courte durée aux MMW, tandis que des expositions plus longues ont produit des effets potentiellement négatifs [258, 269, 281, 282].

Chez l'homme, Gandhi et Riazi [257] ont estimé que 90 à 95 % de l'énergie incidente des MMW peuvent être absorbés par la peau humaine avec des vêtements secs, avec ou sans lame d'air. En raison des profondeurs de pénétration sub-millimétriques dans les tissus cutanés, des DAS superficiels aussi élevés que 65-357 W/kg sont possibles. Les yeux sont particulièrement concernés. Les fréquences MMW pénètrent à moins de 1/64 de pouce (0,4 mm) - soit l'épaisseur de trois feuilles de papier. À l'exception des paupières des adultes et de l'exposition des nourrissons, les ondes millimétriques sont censées éviter la deuxième couche dermique de la peau [265].

Cependant, le tissu cutané contient des structures critiques comme des vaisseaux sanguins et lymphatiques, des terminaisons nerveuses, du collagène, des fibres d'élastine et des follicules pileux, ainsi que des glandes sudoripares, sébacées et apocrines. On a constaté que les effets des MMW sur la peau étaient considérables dans les tissus glandulaires, avec de multiples effets en cascade dans tout le corps humain, même sans pénétration profonde [283]. Les effets sur les cellules lipidiques ont diminué la perméabilité à l'eau de la membrane cellulaire, avec une déshydratation partielle de la membrane cellulaire, et un épaississement/une rigidité de la membrane cellulaire ont été observés à 52-72 GHz à des densités de puissance incidente de 0,0035-0,010 mW/cm² [284]. Les canaux sudoripares humains, en particulier, peuvent agir comme des antennes hélicoïdales enroulées et propager l'énergie MMW comme un guide d'ondes à ces expositions à des fréquences plus élevées, provoquant des taux d'absorption spécifiques uniquement plus élevés [285] qui ne sont pas pris en compte dans les normes actuelles. Il est clair qu'un nouvel examen approfondi des normes 5G s'impose.

Betskii et al. [273] ont noté qu'en cas d'exposition aux MMW, la peau présentait cinq points d'entrée mécanistiques capables d'affecter un organisme entier. Par exemple, ils ont noté que parce que les MMW pénètrent la peau humaine à une profondeur de 300-500 µm et sont presque complètement absorbés dans l'épiderme et le derme supérieur, les MMW sont donc capables d'influencer directement les récepteurs du système nerveux central. Il s'agit notamment des mécanorécepteurs, des nocicepteurs et des terminaisons nerveuses libres, des cellules APUD telles que les cellules neuroendocrines diffuses, les mastocytes et les cellules de Merkel, et des cellules immunitaires telles que les lymphocytes T. En outre, ils ont noté que les MMW produisent des effets directs sur les microcapillaires et d'autres cellules biologiquement actives. Ces cinq "portes d'entrée" peuvent déterminer les effets thérapeutiques et/ou indésirables en tant que nouveau déclencheur des systèmes de régulation de base, impliquant l'ensemble de l'organisme. Selon les paramètres du stimulus MMW et l'état fonctionnel du sujet exposé, les effets produits peuvent être à la fois non spécifiques et spécifiques.

Dans leur revue, Betskii et Lebedeva [286] ont également discuté des effets des MMW sur des modèles humains et non humains comme dépendant des sites d'exposition et ont noté que ces effets étaient très sensibles à la fréquence. Ils ont également décrit le mécanisme hypothétique complexe que la résonance stochastique (voir partie 2) peut jouer dans les espèces biologiques contenant de l'eau très sensibles aux CEM de très faible intensité (dans des plages de μm), basé sur la génération de fréquences de résonance intrinsèques par les amas d'eau qui se situent entre environ 50 et 70 GHz. Lorsque les espèces biologiques sont exposées à des CEM extrêmement faibles à ces fréquences, leurs oscillateurs à molécules d'eau se verrouillent sur la fréquence du signal externe et amplifient le signal au moyen d'une oscillation synchronisée ou d'une amplification régénérative. Comme les ondes millimétriques traversent les milieux aqueux presque sans perte mais aussi avec une absorption élevée, elles sont capables de pénétrer profondément dans les structures internes des tissus et des organes. Les chercheurs ont résumé ce que l'on sait des effets des MMW. Il s'agit d'une longue liste de résultats obtenus sur des modèles humains et non humains, par exemple, la forte absorption des ondes électromagnétiques par l'eau et les solutions aqueuses de substances organiques et inorganiques ; les effets sur le système immunitaire ; les modifications du métabolisme microbien ; la stimulation de la synthèse de l'ATP (adénosine 5'-triphosphate) dans les cellules des feuilles vertes ; l'augmentation de la capacité des cultures (par ex., - traitement des semences avant le semis) ; modification de certaines propriétés des capillaires sanguins ; stimulation des récepteurs du système nerveux central ; et induction de réponses bioélectriques dans le cortex cérébral. Les effets biologiques dépendent du site d'exposition, de la densité de flux de puissance et de la longueur d'onde de manière très spécifique. En outre, les MMW de faible intensité ont été détectés par 80 % des personnes en bonne santé, mais la perception était asymétrique. On a constaté que les applications périphériques affectaient l'organisation spatio-temporelle des biopotentiels cérébraux, entraînant des réactions d'activation non spécifiques du cortex cérébral. Les effets induits par les MMW sont perçus principalement par le système somatosensoriel avec des liens avec presque toutes les régions du cerveau. Les auteurs ont également abordé le rôle unique de l'eau et des environnements aqueux sur les effets des ondes millimétriques, qui induisent un mouvement convectif dans les couches de fluide volumineuses et minces et peuvent créer un mouvement convectif composé dans le fluide intra- et intercellulaire. Cela peut entraîner un transfert de masse transmembranaire et le transport de charges - peut devenir plus actif. Les FHE peuvent également augmenter l'hydratation des molécules de protéines.

Chez les animaux sauvages, en particulier les petits amphibiens à membrane mince comme les grenouilles et les salamandres, même à une pénétration inférieure à 1/64 de pouce (0,4 mm), il y aurait une pénétration profonde du corps. Les effets sur la faune pourraient être importants. Chez certaines espèces d'insectes, cela équivaudrait à une pénétration mortelle du corps entier.

l'exposition à la résonance [90]. Dans une étude récente, Thielens et al. [287] ont modélisé trois populations d'insectes et ont constaté qu'un déplacement de seulement 10 % de la densité de puissance incidente vers des fréquences supérieures à 6 GHz entraînerait une augmentation de la puissance absorbée comprise entre 3 et 370 % chez certaines espèces d'abeilles, ce qui pourrait entraîner des modifications du comportement, de la physiologie et de la morphologie au fil du temps, et finalement affecter leur survie. Les insectes d'une taille inférieure à 1 cm ont présenté un pic d'absorption à des fréquences supérieures à 6 GHz. Dans une étude de suivi du RFR, Thielens et al. [288] ont utilisé des mesures d'exposition *in situ* près de 10 ruches d'abeilles en Belgique et des simulations numériques dans des modèles d'abeilles domestiques (*Apis mellifera*) exposées à des ondes planes à des fréquences comprises entre 0,6 et 120 GHz - fréquences prévues pour la 5G. Ils ont conclu qu'avec un déplacement supposé de 10 % de la densité de puissance incidente vers des fréquences supérieures à 3 GHz, cela entraînerait une augmentation de l'absorption des RFR chez les abeilles mellifères comprise entre 390 et 570 % - ce qui pourrait avoir des conséquences catastrophiques pour la survie des abeilles.

Chez les oiseaux, les plumes creuses ont des propriétés piézoélectriques qui permettraient aux ondes millimétriques de pénétrer profondément dans la cavité corporelle des oiseaux [26, 27]. Les ondes millimétriques complexes en phase de la 5G pourraient également être capables de perturber des fonctions biologiques essentielles chez d'autres espèces. En théorie, cette technologie a la capacité de perturber des écosystèmes critiques et les organismes vivants qu'ils contiennent, avec des effets étendus sur l'ensemble de leurs réseaux alimentaires. En outre, l'extrémité supérieure de ces gammes atteint des fréquences infrarouges (IR), dont certaines sont en fait visibles pour d'autres espèces, notamment les oiseaux, et pourraient entraver leur capacité à détecter les champs magnétiques naturels nécessaires à la migration [91] ainsi que d'autres aspects cruciaux de la vie aviaire.

Les premières analyses des études sur les MMW ont débuté dans les années 80 et portaient sur des sujets tels que la modélisation théorique et les mécanismes d'interaction possibles [289-293]. - Pakhomov et al. [269] ont également publié une revue exhaustive de la recherche sur les MMW, examinant plus de 300 études du bloc de l'ex-Union soviétique, qui s'étaient principalement concentrées sur les applications thérapeutiques/cliniques des MMW, ainsi qu'environ 50 études d'autres pays qui s'étaient concentrées sur les effets sur la santé publique. Ils cherchaient à combler l'écart entre ces orientations très différentes entre les pays. La plupart des recherches du bloc soviétique n'avaient jamais été vues par les scientifiques occidentaux et, en raison de la barrière de la langue, ainsi que des différences dans les protocoles d'essai, les mesures et les styles de reportage, les scientifiques occidentaux considéraient souvent les recherches russes comme incomplètes. Cette vaste étude porte sur les effets des - expositions de faible intensité (10 mW/cm^2 et moins) sur les molécules, les microbes, les cellules, les qualités uniques de l'eau, la résonance et la thérapie par ondes millimétriques. Les études ont porté sur

les questions de dosimétrie/spectroscopie, ainsi que les systèmes sans cellules, les cellules cultivées et les organes isolés chez les animaux et les humains. Pakhomov et al. [269] ont constaté des effets sur la croissance/prolifération cellulaire, l'activité enzymatique, les structures génétiques, la fonction des membranes excitables, les récepteurs périphériques et d'autres systèmes biologiques. Sur des modèles humains et animaux, les applications thérapeutiques locales des MMW ont stimulé la réparation et la régénération des tissus, atténué les réactions de stress et facilité la guérison d'un large éventail de maladies. Les pays de l'ancien bloc soviétique affirment traiter environ 50 maladies avec les OMM. Les examinateurs ont signalé que de nombreux effets ne pouvaient pas être facilement expliqués par les seuls changements de température.

Parmi les modèles animaux ayant une importance potentielle pour la faune sauvage cités par Pakhomov et al. [269], citons : la levure : *Saccharomyces cerevisiae*, [294-298] ; *Candida albicans* [299] ; graines d'orge [300] ; protozoaires *Spirostomum* spp. [301] ; algues bleues *Spirulina platensis* [302] ; moucherons *Acritotopsis lucidus* [303] ; *Escherichia coli* [304] ; rats [305] ; cellules de grenouille/nerve [306-310] ; résistance aux antibiotiques de *Staphylococcus aureus* [311] et autres.

Les recherches sur les récepteurs nerveux périphériques citées par Pakhomov et al. [269] remettent particulièrement en question la croyance populaire selon laquelle les ondes millimétriques sont "sans danger" en raison de leur pénétration superficielle dans la peau. Akoev et al. [312] ont étudié les effets des ondes millimétriques sur les cellules électroréceptrices spécialisées appelées ampoules de Lorinzini chez des rayons anesthésiés et ont constaté que la décharge spontanée dans la fibre nerveuse afférente des cellules pouvait être augmentée ou inhibée par les ondes millimétriques à 33-55 GHz en ondes continues (CW). Les récepteurs les plus sensibles ont vu leur taux d'excitation augmenter à des intensités de 1 à 4 mW/cm², ce qui a entraîné une augmentation de la température inférieure à 0,1 °C. Des intensités plus élevées (10 mW/cm² et plus) ont provoqué une inhibition retardée de l'excitation, indiquant que la réponse est devenue biphasique. Les auteurs ont souligné qu'ils n'observaient pas seulement un bioeffet MMW mais plutôt une réponse spécifique à cette gamme de fréquences par une cellule électro-réceptrice.

Les travaux également cités dans Pakhomov et al. [269] concernant des cellules/voies nerveuses similaires et l'arythmie induite par les MMW comprennent un article de Chernyakov et al. [307] dans lequel ils ont observé des changements de la fréquence cardiaque induits chez des grenouilles anesthésiées par l'irradiation par MMW de zones cutanées éloignées. Cela suggère un mécanisme réflexe impliquant peut-être des récepteurs périphériques spécifiques. Plus tard, Potekhina et al. [313] ont également constaté que certaines fréquences de la bande 53-78 GHz (CW) modifiaient efficacement la variabilité naturelle de la fréquence cardiaque chez des rats anesthésiés lorsqu'elles étaient appliquées sur les vertèbres thoraciques supérieures pendant 20 minutes à 10 mW/cm² ou moins. Les MMW à 55 et 73 GHz ont provoqué une arythmie prononcée : le coefficient de variation de l'intervalle du rythme régulier (R-R)

a augmenté de 4 à 5 fois, alors que l'exposition à 61 ou 75 GHz n'a eu aucun effet, et que les autres fréquences ont provoqué des changements intermédiaires. Les températures de la peau et du corps entier sont restées inchangées. Une dépendance similaire à la fréquence a été observée dans des expériences supplémentaires avec des expositions de 3 heures. Toutefois, environ 25 % des expériences ont été interrompues en raison de la mort subite des animaux survenue après 2,5 heures d'exposition à 51, 61 et 73 GHz. Cet ensemble de travaux suggère que le lien entre les effets cellulaires superficiels et les effets sur l'organisme entier - l'aspect le moins bien compris des MMW - peut être dû aux récepteurs périphériques et à la signalisation nerveuse afférente, entraînant des réactions systémiques plus importantes à partir de ce que l'on suppose être des expositions superficielles. Cela pourrait s'avérer particulièrement important chez les espèces non humaines.

Bien que certaines des études citées ci-dessus se situent à une densité de puissance plus élevée que la plupart des centres d'intérêt du présent document, en raison de l'omniprésence de millions de nouvelles antennes prévues pour les petites cellules 5G, les expositions en champ proche de la faune, même dans les zones rurales, sont beaucoup plus probables que celles provenant d'infrastructures distantes.

En 2000, l'Agence centrale de renseignement des États-Unis a déclassifié et publié un recueil d'articles théoriques et expérimentaux, principalement en provenance de Russie, dont beaucoup étaient déjà couverts par Pakhomov et al. [269] sur les études relatives aux MMW et ELF à haute fréquence. Parmi les travaux cités, citons l'examen de 6 000 articles par Kholodov [314], paru dans Markov et Blank [315], démontrant les interactions des CEM avec une variété de systèmes biologiques animaux et humains. Des effets ont été observés dans le système nerveux central, le degré de réponse dépendant d'une myriade de paramètres de rayonnement, notamment la fréquence, la forme des impulsions et la durée d'exposition. Des effets très variés ont été documentés, du microbiote aux mammifères. Ils comprennent : les effets des ondes millimétriques sur le système nerveux central et périphérique [316], la majorité (80 %) des sujets humains détectant et ayant une conscience cognitive d'expositions aussi faibles que 10 milliardièmes de W/cm², c'est-à-dire, 10 nW/cm² ; 50 µW ont affecté la bactérie *Proteus* [317] ; des MMW aussi faibles que 1 µW/cm² dans une gamme de fréquences très étroite (51,62 < contre 51,85 GHz) ont induit des changements dans la bactérie *E. coli*, indiquant une réponse de résonance ; et des résonances nettes dans les gammes HF/MMW ont été observées, indiquant que les MMW agissent comme un catalyseur pour la communication intra- et intercellulaire. Les HF/MMW peuvent déclencher des oscillations non linéaires complexes capables d'affecter les processus fondamentaux de systèmes vivants entiers [270, 271, 318-324]. Voir ci-dessous pour plus d'informations sur les ondes millimétriques et les effets non linéaires.

Il existe d'autres études actualisées de la gamme de fréquences MMW [273, 325], les plus récentes étant celles de Simko et Mattson [326] et d'Alekseev et Ziskin [327].

Simko et Mattson [326] se sont concentrés sur la sécurité potentielle de la 5G et les effets non thermiques. Ils ont examiné les travaux (entre 6 et 100 GHz MMW divisés en sept gammes) pour les impacts sur la santé, en analysant 94 études, caractérisées pour le type (*in vivo, in vitro*) ; le matériel biologique (espèce, type de cellule, etc.) ; les paramètres biologiques ; les paramètres d'exposition (fréquence, durée, densité de puissance) ; les résultats ; et la qualité critique des études. Ils ont constaté que 80% des études *in vivo* et 58% des études *in vitro* ont montré des effets, avec des réponses affectant tous les paramètres biologiques étudiés. Ils ont également constaté qu'il n'y avait pas de relation cohérente entre la densité de puissance, la durée d'exposition et la fréquence avec les effets de l'exposition dans toutes les études examinées, bien qu'il y ait eu des cohérences au sein de certains groupes pour les effets qui dépendaient de la fréquence. Ils ont conclu que, dans l'ensemble, les études n'ont pas fourni d'informations suffisantes pour déterminer des évaluations de sécurité significatives ou pour répondre aux questions sur les effets non thermiques, ajoutant qu'il est nécessaire de mener des recherches sur les développements de l'échauffement local de petites surfaces (par exemple, la peau ou les yeux) et sur les impacts environnementaux. Ils ont appelé à une amélioration significative de la qualité dans la conception et la mise en œuvre des études futures. Ils ont également noté qu'il n'existe pas d'études épidémiologiques pour ces gammes de fréquences - une observation importante - et qu'il est important d'étudier les effets sur la faune, car la profondeur de pénétration des ondes millimétriques dans les très petits organismes peut entraîner un échauffement potentiellement important.

Alekseev et Ziskin [327] ont passé en revue les gammes MMW, sub-MMW et THz en accordant une attention particulière aux propriétés et à la permittivité de la peau ainsi qu'à d'autres paramètres physiologiques dans les premières publications. Ils se sont principalement concentrés sur les intensités thermiques, bien que certains travaux non thermiques aient été inclus. Ils ont conclu que les effets en dessous des intensités thermiques étaient négligeables.

Une étude américaine sur les MMW réalisée par Siegel et Pikov [328] à très faible intensité a produit des effets bien inférieurs aux normes réglementaires. Les auteurs ont noté le besoin croissant de - comprendre les mécanismes d'interaction des MMW avec les systèmes biologiques, tant pour les effets indésirables que pour les utilisations thérapeutiques, et ont déclaré qu'indépendamment des effets sur la santé de l'exposition à long terme à de fortes doses de MMW sur des organismes entiers, il existe également des effets subtils potentiels sur des tissus ou des organes spécifiques. Ils se sont concentrés sur la quantification des changements en temps réel de la fonction cellulaire lors de l'application de l'énergie dans une série d'expériences. Les effets ont révélé des changements dans le potentiel de la membrane cellulaire et dans le taux de déclenchement du potentiel d'action des neurones corticaux lors de courtes expositions (1 min) à un rayonnement continu de 60 GHz à des niveaux de puissance de mW/cm^2 plus de 1 000 fois inférieurs à l'exposition maximale admissible (EMT) de la FCC. Après avoir passé en revue les articles sur l'activité neuronale dans les fréquences d'ondes millimétriques à faible intensité, Siegel et Pikov [328] ont examiné l'activité neuronale induite par les ondes millimétriques.

l'apoptose et la perméabilité membranaire transitoire dans des cellules épithéliales *in vitro*, ainsi que des changements en temps réel de l'activité et de la perméabilité membranaire de neurones pyramidaux individuels dans des tranches de cortex sondées par patch-clamp. Une étude, utilisant des tranches de cortex cérébral *in vitro* provenant de rats âgés de 13 à 16 jours, a été exposée au MMW 60 GHz (à des expositions de 7,5, 15, 30, 60, 120 et 185 mW) introduites dans des séquences aléatoires, maintenues fixes pendant 1 min pour trois cycles de courant, puis éteintes. La température du bain était constamment surveillée avec une augmentation de la température entre 0,1 et 3 °C. Ils ont constaté des changements dans le tir à des niveaux de puissance de $0,3 \mu\text{W/cm}^2$ et plus après quatre niveaux de puissance MMW différents à environ $0,1-1 \text{ mW/cm}^2$. Les pentes de montée et de descente des potentiels d'action individuels et la résistance de la membrane étaient également fortement corrélées aux niveaux de puissance MMW, indiquant l'ouverture des canaux ioniques membranaires. Ils ont conclu qu'à des niveaux de puissance d'environ 300 nW/cm^2 et plus, il existait une forte inhibition du taux de déclenchement du potentiel d'action dans certains neurones, ainsi qu'une augmentation du déclenchement dans d'autres. Cela indique une possible hétérogénéité fonctionnelle dans la population neuronale étudiée. Ils ont ajouté que l'augmentation de la température du bain ne pouvait pas expliquer entièrement des changements aussi spectaculaires de la perméabilité de la membrane. Ces résultats sont considérés comme les premières mesures corrélatives positives des changements en temps réel de l'activité neuronale avec des expositions aux ondes millimétriques de très faible puissance. Ils ont déclaré que, malgré le manque de données SAR de haute précision pour chaque échantillon, des recherches plus approfondies étaient justifiées car les effets enregistrés étaient à des niveaux bien inférieurs aux MPE recommandés. Leurs résultats ont également des implications thérapeutiques pour la stimulation sans contact et le contrôle de la fonction neurologique dans la suppression de la - douleur neuropathique périphérique et d'autres troubles neurologiques centraux.

Il existe des centaines d'études sur les ondes millimétriques à des intensités élevées qui ne sont pas incluses dans cet article et qui peuvent également être pertinentes du point de vue environnemental pour les expositions ambiantes à la 5G en champ proche.

Caractéristiques de signalisation inhabituelles de la 5G : réseau phasé, MIMO, précurseurs Sommerfeld et Brillouin.

La 5G utilise des caractéristiques de signalisation inhabituelles qui n'ont pas été largement déployées jusqu'à présent. Les réseaux phasés (plusieurs antennes qui émettent à des rythmes différents) sont utilisés depuis des décennies dans les radars militaires et quelques autres applications industrielles. Les réseaux phasés peuvent augmenter la puissance du signal, ce qui permet aux signaux de pénétrer plus profondément dans les bâtiments. Dans son adaptation aux réseaux sans fil civils, le réseau phasé est considéré comme une caractéristique unique qui

n'a pas été bien étudiée en tant qu'entité biologiquement active spécifique, bien que cela ait été demandé il y a plus de 20 ans [329, 330]. Cependant, il existe suffisamment de recherches sur des fréquences similaires pour soulever des questions de sécurité. Pourtant, toutes les extrapolations de sécurité concernant les conceptions de transmission 5G ont été faites à partir de modèles de rayonnement différents et inapplicables pour des formes d'onde continues (toujours actives) ou pulsées (actives par intermittence) utilisant des systèmes à élément unique ou non phasés. Si le réseau phasé est pulsé, il s'agit d'un système dans lequel les impulsions se chevauchent (d'où le terme "phasé"), ce qui constitue une exposition biologique unique puisqu'il n'y a pas de temps de récupération cellulaire entre les expositions. Il est donc, par essence, toujours "en marche".

Bien que tout le monde ne soit pas d'accord sur le fait qu'il s'agit d'une caractéristique suffisamment unique pour justifier des recherches plus approfondies ou des considérations de sécurité différentes de celles qui ont été traditionnellement utilisées [111, 112, 130, 131, 331, 332], il existe néanmoins de sérieuses préoccupations concernant le phasage car il interagit avec les cellules vivantes de manière extrêmement complexe qui n'a rien à voir avec les seuils thermiques traditionnels. La forme d'onde elle-même est le composant biologiquement actif [329, 330, 333-338].

La mise en phase est créée par de multiples antennes et sous-antennes émettant simultanément ou à des intervalles légèrement différents à des fréquences différentes, créant ce qui peut devenir des bancs d'ondes abrupts qui interagissent avec les cellules vivantes sous de nombreux angles et séquences temporelles différents. En raison des facteurs d'impédance variables du rayonnement se déplaçant dans l'air et des différences de taux de transmission de l'ordre de la microseconde, chaque antenne d'un élément rayonnant multiple atteint le corps - humain ou non - à des moments légèrement différents, créant ainsi de multiples fronts d'ondes qui se chevauchent. Chaque front d'onde frappe à partir d'un endroit et/ou d'un angle légèrement différent, créant ainsi une séquence caractéristique de modulation en couches, différente de toute autre source de propagation électromagnétique. Rien de tel n'existe dans la nature. Bien que les réseaux à commande de phase existent depuis les années 1940, ils n'ont jamais été utilisés jusqu'à présent dans les infrastructures civiles de télécommunications à large bande ou dans les appareils grand public.

La 5G est une combinaison de transmission en visibilité directe et d'expositions phasées pulsées simultanées au niveau du sol, impliquant une infrastructure incroyablement compliquée, accompagnée d'expositions ambiantes importantes dues à ce qui devrait être des millions de nouvelles antennes rien qu'aux États-Unis. La 5G utilisera des signaux phasés à large bande émis sous la forme d'ondes pulsées constantes qui se chevauchent et augmentent progressivement en fréquence, transmises simultanément à partir d'emplacements et d'angles légèrement différents qui s'accumulent en quelque sorte en escalier. Telle qu'elle est conçue, la 5G utilisera des éléments composés MIMO (entrées multiples, sorties multiples) "massifs".

émetteurs-récepteurs - plus de 100 par boîtier d'antenne physique - pour l'envoi et la réception simultanés de signaux/données. La fréquence EHF étant plus élevée sur le spectre électromagnétique avec des longueurs d'onde plus courtes, les éléments d'antenne individuels - sont plus petits, ce qui permet de placer plus d'éléments au même endroit. Des éléments d'antenne multiples sont également nécessaires pour la mise en phase. À terme, les appareils des utilisateurs contiendront également la technologie MIMO EHF et la technologie des réseaux phasés intégrée dans des appareils comme les iPhones, qui contiennent déjà des antennes multiples. La technologie 4G LTE utilise déjà des éléments composés et, même si les deux systèmes seront interdépendants dans un avenir proche, la 5G telle qu'elle est conçue est suffisamment différente pour que de nouveaux téléphones soient éventuellement nécessaires.

En outre, la 5G utilisera une technologie de guidage de faisceau (dont il existe plusieurs types) qui permet aux antennes de produire et de concentrer des faisceaux très étroits dans une direction spécifique. En concentrant et en focalisant le signal, la puissance rayonnée effective est augmentée, ce qui signifie que les signaux étroits peuvent voyager plus loin et pénétrer plus efficacement les bâtiments et autres obstacles. L'orientation du faisceau permet également aux antennes de diriger les signaux vers les dispositifs de l'utilisateur plutôt que vers les schémas de rayonnement à 360° des antennes omnidirectionnelles couramment utilisées dans les infrastructures de télécommunications. La direction du faisceau est réalisée en changeant les phases et/ou en commutant les éléments d'antenne. Pour tracer la meilleure route entre le signal et l'utilisateur, des algorithmes de traitement du signal très avancés sont nécessaires.

Les partisans de la 5G sont enthousiasmés par la brillante ingénierie RF du réseau et supposent que la 5G augmentera l'efficacité du système, réduira les interférences RF provenant d'autres sources, réduira les expositions ambiantes globales car il s'agit d'un réseau hautement dirigé, et sera plus rapide et plus économique en énergie. Cependant, l'ampleur même de la 5G rendra certaines de ces projections erronées. Selon une estimation de l'industrie, la 5G nécessitera 10 fois plus d'énergie que celle utilisée aujourd'hui pour les télécommunications [340]. De plus, la direction du faisceau ne réduit pas les expositions ambiantes avec des systèmes à une telle échelle. Cependant, avec la densification de l'infrastructure, il crée une toute nouvelle couche d'exposition aux RFR.

Toutes les normes d'exposition en place aujourd'hui et appliquées à la 5G contrôlent principalement les expositions en champ proche. Mais le phasage crée des effets biologiques imprévisibles en champ lointain. Avec la transmission par réseau phasé, le taux d'arrivée et l'accumulation du front d'onde peuvent augmenter à mesure qu'il s'éloigne de la source rayonnante, créant des dispersions/expositions à large bande à facettes multiples ([341], voir les figures 1 et 2 ci-dessous), ce qui rend les expositions potentiellement plus complexes dans les environnements de champ lointain dans de nombreuses gammes de fréquences différentes.

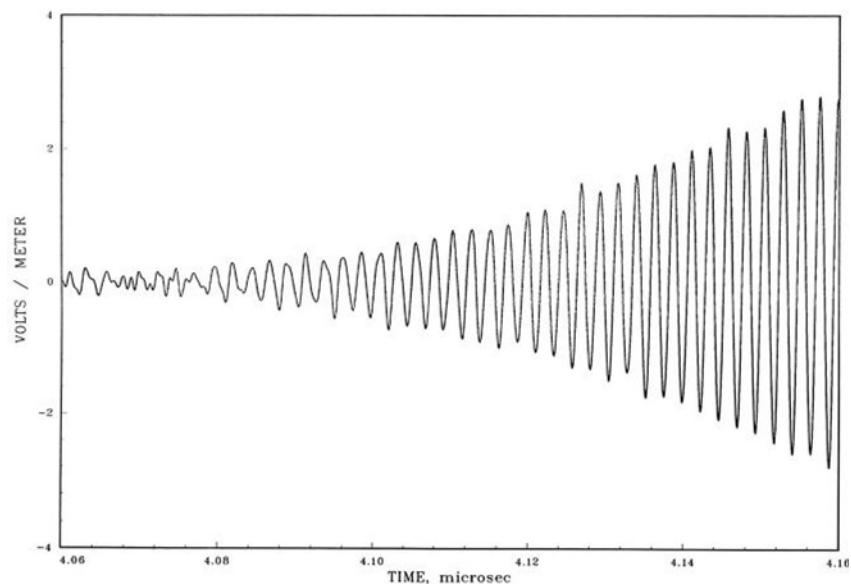


Figure 1 : La transmission par réseau phasé peut créer une dispersion à large bande.

Près de la normale à la face du réseau, une accumulation peut se produire lorsque le signal s'éloigne de la source génératrice. L'illustration montre comment l'accumulation des signaux d'un radar à commande de phase se produit dans les fréquences radar comprises entre 420 et 450 MHz [341]. Extrait du National Research Council, 2005. An Assessment of Potential Health Effects from Exposure to PAVE PAWS Low-Level Phased-Array Radiofrequency Energy, p 63. <https://doi.org/10.17226/11205>. Reproduit avec la permission de la National Academy of Sciences, Courtesy of the National Academies Press, Washington, D.C.

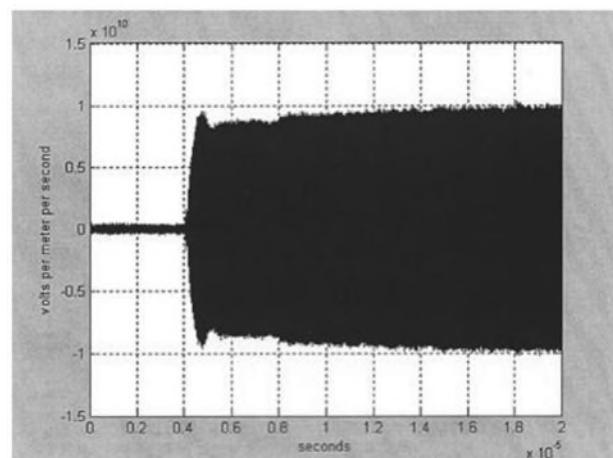


Figure 2 : L'accumulation de bancs d'ondes millimétriques peut également être quasi instantanée. À 500 m : la variation des pentes ou des temps de montée rencontrés au cours d'une impulsion, de nombreuses pentes étant nettement supérieures à ± 1 V par mètre et par nanoseconde. Utilisé avec la permission de Richard Albanese. Apparu dans, An Assessment of Potential Health Effects from Exposure to PAVE PAWS Low-Level Phased-Array Radiofrequency Energy. National Research Council, 2005 p. 70. <https://doi.org/10.17226/11205> [341].

La raison pour laquelle le phasage peut avoir un impact biologique unique est que les pics d'impulsions de rayonnement très rapides génèrent des rafales d'énergie qui peuvent donner lieu à ce que l'on appelle des précurseurs de Sommerfeld et de Brillouin dans les cellules vivantes, qui peuvent à leur tour pénétrer et se disperser beaucoup plus profondément que les cellules vivantes.

Les modèles traditionnels le prévoient [333-338, 339, 342-347]. Les précurseurs Sommerfeld/Brillouin se forment notamment lors d'expositions à très large bande, comme le propose la 5G.

Les écrits d'Arnold Sommerfeld [348] et de Léon Brillouin [349] sur la façon dont les fronts d'onde pénètrent et se déplacent à travers des matériaux "à pertes" (matériaux qui absorbent les rayonnements comme le sol, l'eau ou les tissus vivants) remontent à au moins 100 ans, mais leur intérêt portait sur la pénétration et le mouvement de l'énergie, et non sur les effets biologiques, et leur orientation était la physique, et non la médecine. Les travaux de Sommerfeld et Brillouin ont noté qu'avec le mouvement d'une onde sinusoïdale à travers un milieu de Lorentz, deux transitoires se formaient. Le premier - appelé aujourd'hui le précurseur de Sommerfeld - se déplace à la vitesse de la lumière et oscille à des fréquences très élevées, tandis que le second - appelé aujourd'hui le précurseur de Brillouin - suit le premier à une vitesse plus lente. Oughstun et Sherman [339] ont établi un modèle mathématique plus actuel pour la formation des précurseurs. Les précurseurs de Sommerfeld et de Brillouin ont été observés dans un appareil à guide d'ondes par Plesko et Palotz [350]. On estime que le précurseur de Sommerfeld a une faible amplitude dans les matériaux à base d'eau comme les cellules et les tissus, mais il n'a pas été réellement observé dans ces matériaux, tandis que les précurseurs de Brillouin ont été observés dans des matériaux à base d'eau. On a constaté que les grandes largeurs de bande en général - comme la large bande 5G qui utilise plusieurs fréquences - produisent plus de précurseurs que les largeurs de bande étroites ; la formation de précurseurs est directement liée à la largeur de bande (ou temps de montée) et à la dispersion,

mais pas toujours à la pente du champ électrique (V/m/nsec). Une fois générées, les impulsions peuvent se propager sans grande atténuation et on pense qu'elles ne se désintègrent lentement qu'après une atténuation importante dans le milieu cellulaire. Cela signifie que les précurseurs ont une longue durée de vie dans les tissus. Les précurseurs peuvent apparaître à tout moment pendant l'exposition [341].

Dans le cas de la formation de précurseurs, le facteur le plus important est la vitesse à laquelle l'énergie est introduite. Une introduction lente dans le matériau n'entraînera pas la formation de précurseurs. Les précurseurs résultent de l'introduction d'un champ externe à une vitesse supérieure aux temps de réponse du milieu lui-même [329, 351]. Alors que les ondes sinusoïdales continues typiques et les expositions pulsées ne créent pas de fronts d'onde mais sont capables de provoquer des changements thermorégulateurs et d'autres effets, la séquence de fronts d'onde d'un réseau phasé peut, dans certaines circonstances, être capable de provoquer des changements thermorégulateurs et des perturbations électrostrictives, créant ainsi une boucle de rétroaction non linéaire imprévisible dans les systèmes vivants [329, 333-338, 351]. En d'autres termes, avec la 5G fonctionnant dans les gammes EHF avec des signaux de réseaux phasés, il ne s'agit plus simplement de théories de physique. Les précurseurs sont capables de submerger les cellules vivantes selon des schémas non linéaires hautement imprévisibles, provoquant potentiellement une fatigue cellulaire structurelle et des changements matériels dans tout l'organisme.

Selon Richard A. Albanese, M.D., (per. comm. 4/5/2021), lorsque les pentes des bords d'attaque ou de fuite (temps de montée) sont de ± 1 V par mètre par nanoseconde ou plus, un précurseur se produit. De même, lorsque le signal monte ou descend de telle manière que la différence absolue entre les pentes/temps de montée est de

± 1 V par mètre par nanoseconde ou plus, un précurseur se produira. Un exemple de précurseur est illustré ci-dessous à la figure 3.

Notez également dans la figure 3 que le temps de pente/de montée causé par le précurseur dépasse fréquemment ± 5 V par mètre par nanoseconde - un facteur très préoccupant. Il est tout aussi préoccupant de constater que lorsque de telles expositions sont moyennées comme le font actuellement les normes de l'ICNIRP et de la FCC (voir partie 3), les temps de montée et de descente disparaissent théoriquement, mais pas l'exposition biologiquement pertinente dans les conditions ambiantes du terrain.

Avec les réseaux phasés, les fronts d'onde de pointe arrivent avec des différentiels de temps de l'ordre de la pico- et de la nanoseconde depuis des angles et des distances multiples. Lorsque les fronts d'onde sont suffisamment nets, il est prouvé qu'une ré-émission moléculaire peut se produire lorsque les potentiels de la membrane cellulaire changent. En d'autres termes, les cellules peuvent fonctionner comme de petites - antennes internes [333, 339, 352, 353]. On pense que les fronts d'onde placent rapidement de l'énergie dans les molécules. Lorsque cela se produit, il est démontré que les molécules rediffusent de l'énergie plutôt que de produire de la chaleur selon les modèles thermorégulateurs classiques, et se déplacent donc profondément dans un organisme vivant [339, 344, 347]. Rogers et al [354] ont découvert que de courtes impulsions de 5 ns stimulaient la contraction de muscles de grenouille excisés, démontrant ainsi que les fronts d'onde peuvent dépolarisier les - potentiels de membrane. D'Ambrosio et al. [355] ont comparé des ondes continues à des signaux GMSK en phase à 1,7 GHz et ont constaté une augmentation statistiquement significative de la génotoxicité aux mêmes niveaux de DAS avec la mise en phase mais pas avec les ondes continues.

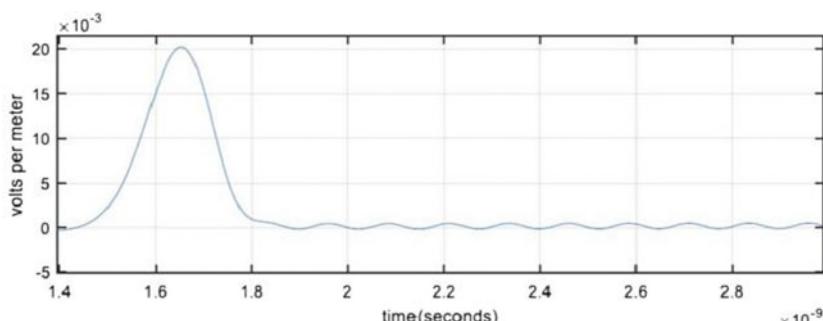


Figure 3 : L'illustration ci-dessus montre un précurseur de 20 mV provenant d'une onde sinusoïdale carrée de 1 V par mètre modulée à ~ 8 GHz. Ce qui importe, c'est la pente ou le temps de montée mesuré en volts par mètre par nanoseconde, et non la fréquence de la porteuse. Le graphique ci-dessus montre que la faible amplitude de l'onde porteuse dans les tissus et les précurseurs qui se forment peuvent être transportés dans le milieu à un niveau de courant continu de courte durée. Cependant, si une séquence de ceux-ci se produit - comme dans les expositions en phase - et si les amplitudes incidentes sont de plus grande ampleur, un sujet vivant recevra une exposition au courant continu qui peut dépolariser les membranes cellulaires. Utilisé avec l'autorisation de Richard A. Albanese.

Oughstun et ses collègues ont publié de nombreux articles mathématiques et expérimentaux prédictifs sur les précurseurs,¹ en particulier ceux qui se produisent dans les formes d'onde laser infrarouge (IR). L'infrarouge est visible pour certaines espèces, notamment les oiseaux, pour lesquels on pense qu'il est lié à la vigueur de la reproduction. Bien que la 5G ne soit pas encore autorisée à utiliser les bandes d'ondes IR, les plages supérieures des ondes électromagnétiques allouées à la 5G sont proches de la plage IR, avec des effets biologiques très similaires ; d'autres technologies prévoient d'utiliser l'IR à des fins de communication.

Des observations similaires à celles décrites ci-dessus concernant des caractéristiques de propagation inhabituelles à ces fréquences nettement plus élevées ont récemment été faites dans des études sur les ondes THz (entre 0,3 et 30 THz dans le domaine de l'infrarouge lointain) par Yamazaki et al. [356]. Ils ont constaté que malgré une forte absorption par les molécules d'eau, l'énergie des impulsions THz (250 μ J/cm²) se transmet à un millimètre d'épaisseur dans une solution aqueuse, probablement sous forme d'onde de choc, et démolit les filaments d'actine cellulaires. L'effondrement des filaments d'actine induit par l'irradiation THz a également été observé dans des cellules vivantes sous un milieu aqueux. Ils ont constaté que si la viabilité de la cellule n'était pas affectée par les impulsions THz, le potentiel des ondes THz en tant que méthode invasive pour modifier la structure des protéines dans les cellules vivantes existait toujours.

Bien que notre présent document n'inclue pas d'études dans la gamme THz, elle est brièvement mentionnée ici car la technologie dans la gamme THz est déjà déployée dans les scanners d'aéroport et est prévue pour être utilisée dans les futures applications sans fil Li-Fi et certaines applications 5G [357]. L'étude de Yamazaki et al. [356] dans la gamme THz mentionnée ci-dessus remet en question les hypothèses populaires selon lesquelles les effets du rayonnement THz sont négligeables sur les tissus profonds en raison de la forte absorption par les molécules d'eau. Les chercheurs ont trouvé le contraire potentiel.

Satellites

L'utilisation des satellites pour les communications bidirectionnelles à large bande remonte aux années 1960 pour les applications militaires, la recherche universitaire/gouvernementale et les prévisions météorologiques. Les adaptations à grande échelle pour un usage civil n'ont commencé qu'à la fin des années 1980 et dans les années 1990 pour la diffusion radio/TV et la connectivité Internet. Aujourd'hui, l'utilisation civile a explosé, avec des préoccupations importantes.

Les satellites couvrent des régions entières, émettant principalement en direction de la Terre, à la fois en réseau en visibilité directe et en réseau large.

1 Pour une liste des 30 études de Oughstun en cours jusqu'en 2005, voir *An Assessment of Potential Health Effects from Exposure to PAVE PAWS Low-Level Phased-Array Radiofrequency Energy PAVE PAWS 2005*, annexe 5-5, pp. 90-93. <http://www.nap.edu/catalog/11205.html> et le site Web du Dr Oughstun, www.emba.uvm.edu/~oughstun.

Les modèles de rayonnement ressemblent au faisceau d'une lampe de poche. Plus le satellite est éloigné, plus le faisceau est large et plus la densité de puissance nécessaire pour atteindre la Terre est élevée ; certains satellites émettent à des millions de watts de puissance rayonnée effective. Les satellites ont la capacité d'atteindre les zones rurales et éloignées d'une manière que les réseaux terrestres ne peuvent pas faire, et donc d'affecter la faune sauvage d'une manière qui pourrait ne jamais être détectée.

Des milliers de satellites circulent déjà sur la Terre aujourd'hui. Comme les systèmes terrestres, les bandes de fréquences radio traditionnellement utilisées pour les satellites sont devenues si encombrées que les ingénieurs se tournent vers des systèmes bidirectionnels utilisant des fréquences laser. En 2013, le Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer de la NASA américaine a utilisé un faisceau laser pulsé pour transmettre des données sur plus de 384 633 km entre la Lune et la Terre, à un taux de téléchargement record de 622 Mo/s [358]. Les fréquences laser sont proches des gammes supérieures prévues pour la 5G, et sont visibles pour de nombreuses espèces qui voient des spectres lumineux bien plus larges que ceux des humains.

Il existe trois catégories générales de satellites en fonction de leur hauteur au-dessus de la surface de la Terre [359]. La première catégorie est celle des satellites en orbite basse (LEO), à environ 180-2 000 km (111-1 243 mi) au-dessus de la Terre, utilisés pour l'observation de la surface terrestre, à des fins militaires et pour les données météorologiques. L'orbite terrestre moyenne (MEO) se trouve à une altitude d'environ 2 000 à 36 000 km (1 243 à 22 223 mi) et est utilisée pour la navigation (GPS) et les télécommunications. L'orbite terrestre haute se situe à une altitude supérieure à 36 000 km (22 223 mi). Les orbites terrestres hautes sont également appelées orbites géosynchrones (GEO). Les satellites y effectuent une orbite toutes les 24 heures, soit la même période que la rotation de la Terre. Les GEO peuvent être fixes au-dessus d'un point ou décrire un cercle elliptique. Certains sont alignés avec l'équateur de la Terre, d'autres non. Il existe plusieurs centaines de satellites de télévision, de communication et de météorologie en orbite géostationnaire.

L'espace au-dessus de nos têtes est désormais très encombré. La taille, la conception et la construction des satellites varient énormément en fonction de leur objectif. Ils sont utilisés pour la collecte de données météorologiques, les communications (cellulaires/Internet), la radiodiffusion/télévision, la recherche scientifique, la navigation, le sauvetage d'urgence, l'observation de la Terre et à des fins militaires. De nombreux satellites météorologiques et certains satellites de communication, mais pas tous, sont en orbite terrestre haute ; les satellites en orbite terrestre moyenne comprennent les satellites de navigation et les satellites spécialisés utilisés pour surveiller une région particulière, tandis que la plupart des satellites scientifiques, y compris la flotte du système d'observation de la Terre de la NASA, sont en orbite terrestre basse. Un petit nombre de satellites tournent leur attention (et leur rayonnement) vers l'espace à des fins de recherche.

Il existe de nombreuses sociétés de satellites, qui proposent toutes des modèles et des configurations différents en fonction de leurs objectifs. Historiquement, les satellites s'appuient sur les fréquences de la bande C

entre la partie de la gamme des micro-ondes comprise entre 4 et 8 GHz, qui présente le moins d'atténuation à travers l'atmosphère terrestre, ce qui est idéal pour les transmissions à longue distance. Mais cette gamme traditionnelle a une capacité de transport de données inférieure aux exigences actuelles, de sorte que la bande Ku entre 12 et 18 GHz et la bande Ka entre 26 et 40 GHz sont de plus en plus utilisées. La bande 60 GHz a été utilisée par les militaires pour les communications entre satellites. De plus en plus, les systèmes satellitaires comme Telstar utiliseront une combinaison : La bande C pour une couverture de zone étendue mélangée à des bandes Ku et Ka de plus haute fréquence pour des faisceaux ponctuels plus focalisés, également appelés faisceaux à haute capacité. Pour illustrer cette combinaison, on peut comparer l'œil humain à une "vue large", alors que l'œil d'un insecte est une structure composée, comme les faisceaux ponctuels capables de pointer dans différentes directions.

Les nouveaux réseaux complexes de satellites multifréquences se multiplient et, par conséquent, l'exposition de la Terre aussi. Qu'ils soient grands ou petits, la plupart des satellites communiquent avec des stations terrestres à des puissances de sortie importantes.

Augmentation récente du nombre de satellites

Les entrepreneurs d'aujourd'hui - dont Elon Musk avec SpaceX/Starlink, Jeff Bezos avec le projet Kuiper d'Amazon, Mark Zuckerberg avec Athena de Facebook, Telesat au Canada, OneWeb au Royaume-Uni, le Roscosmos russe, le projet Hongyun en Chine et plusieurs autres - étendent la communication par satellite à la technologie 5G, en utilisant des milliers de nouveaux satellites en orbite basse ou moyenne qui créeront une autre couche de bas niveau d'expositions nouvelles qui n'existent pas actuellement. Aucune évaluation environnementale (EE) ou déclaration d'impact environnemental (EIS) n'a été examinée au titre de la NEPA par la FCC, qui a déterminé en 1986 que les satellites étaient catégoriquement exclus ([360] ; voir également la partie 3).

D'ici 2021, Musk prévoit d'avoir lancé 1 584 satellites, et 11 943 autres d'ici 2025, contrairement aux quelque 1 500 en orbite aussi récemment qu'en 2019 [361]. Le plan ultime, si la FCC l'autorise, est de 42 000 satellites Starlink couvrant le globe (placés à trois strates atmosphériques différentes : 211 mi/340 km, 342 mi/550 km, et 715 mi/1 150 km). En octobre 2019, Musk a demandé l'autorisation d'en placer 30 000 autres, en orbite entre 203 mi/328 km et 380 mi/614 km, en utilisant des fréquences comprises entre 10,7 et 86 GHz dans des cellules à réseaux phasés qui se chevauchent - et ce n'est qu'un seul fournisseur [362]. À l'heure où nous écrivons ces lignes, SpaceX/Starlink a déployé 597 satellites et 14 autres lancements multi-satellites sont prévus d'ici 2021. Environ 500 d'entre eux fonctionnent et sont prêts à fournir de l'Internet à certains endroits sur Terre [363].

La FCC a également accordé à Starlink une licence de 15 ans permettant à un maximum d'un million de terminaux d'utilisateurs terrestres fixes de communiquer.

avec le réseau Starlink [364], et la FCC a accordé une autorisation temporaire pour des stations d'essai dans six États (Californie, Minnesota, Idaho, Alabama, Géorgie et Montana) comme preuve de concept avant l'ouverture commerciale officielle de Starlink d'ici la fin de 2020. La société a l'intention d'utiliser les spectres 28,6-29,1 et 29,5-30,0 GHz pour le téléchargement des données des stations terrestres vers les satellites Starlink, et les spectres 17,8-18,6 et 18,8-19,3 GHz pour les liaisons descendantes [365]. En plus de Starlink, Kuiper Systems d'Amazon a obtenu l'aval du président de la FCC, Ajit Pai, en juillet 2020 pour 3 236 nouveaux satellites [366].

La transmission par satellite dans la haute atmosphère a toujours souffert d'interférences dues à la couverture nuageuse et d'une latence élevée (le temps que met le signal à se rendre d'un endroit à un autre). Le concept d'orbite terrestre 5G de SpaceX contourne certains de ces problèmes en plaçant les satellites en orbite basse et très basse au-dessus de la Terre, contrairement aux satellites Internet typiques en orbite géostationnaire à 35 405 km (22 000 mi) ou plus [367]. Le fait d'être plus proche du sol signifie que davantage de satellites seront nécessaires, car chaque satellite couvrira une zone plus petite. Si SpaceX prévoit de créer une couverture Internet mondiale grâce à ses déploiements initiaux en orbite terrestre basse aux États-Unis, elle comblera ensuite les lacunes avec des milliers d'autres satellites en orbite terrestre très basse (VLEO) à environ 340 km d'altitude. SpaceX prévoit de couvrir d'abord les zones rurales, ce qui pourrait théoriquement affecter la faune et la flore sauvages qui passeront probablement inaperçues.

Les États-Unis mettent également en œuvre la nouvelle force spatiale américaine sous l'égide du ministère de la Défense (DOD) et déployeront cinq nouveaux satellites d'alerte aux missiles d'ici 2029 sur des orbites stationnaires à haute altitude [368]. En outre, le ministère de la Défense ajoutera des satellites en orbite basse pour la défense contre les missiles hypersoniques [369]. SpaceX devrait prendre en charge 40 % des satellites de sécurité nationale qui seront déployés au cours de la prochaine décennie [370].

De nombreux commentaires négatifs ont été adressés à la FCC par des ONG, des entreprises, des agences gouvernementales et des législateurs au sujet de cette augmentation sans précédent du nombre de satellites commerciaux, notamment en ce qui concerne les projets destinés aux communications civiles 5G en raison des interférences potentielles avec l'utilisation par d'autres agences de bandes de fréquences similaires pour les prévisions météorologiques critiques, les communications GPS et l'astronomie, entre autres. L'accent a été mis sur l'octroi par la FCC, en 2020, d'une licence à Ligado Networks (anciennement LightSquared) pour l'utilisation de la bande L dans le cadre d'un réseau national civil à large bande. La bande L est le spectre du GPS utilisé par l'armée, les entreprises et les consommateurs. Le Pentagone, de nombreuses agences américaines, dont le ministère des Transports, des organisations professionnelles comme l'Air Line Pilots Association et l'International Air Transport Association, et des industries comme Iridium Communications et Lockheed Martin s'opposent à la décision de la FCC. Trente-deux sénateurs américains ont également demandé à la FCC de recon siderer sa décision [371].

Parmi les commentaires adressés à la FCC figurent ceux de la National Oceanic and Atmospheric Administration (concernant les prévisions et la recherche météorologiques) et du ministère de l'Énergie (concernant la sécurité du réseau électrique), entre autres. En janvier 2020, l'appel des astronomes internationaux a été déposé auprès de la FCC, faisant état d'une "préoccupation extrême" concernant des dizaines de milliers de satellites dépassant largement en nombre les 9 000 étoiles visibles à l'œil nu, bloquant définitivement la visibilité et altérant à jamais la recherche astronomique. Ils ont averti qu'il pourrait y avoir plus de 50 000 petits satellites encerclant la Terre à différentes altitudes à des fins de télécommunications, principalement la connectivité Internet 5G. Les espèces qui migrent la nuit utilisent également les étoiles pour s'orienter. Cette soudaine infusion d'"étoiles" artificielles pourrait avoir des effets négatifs encore indéterminés.

Aucune de ces agences ou entreprises ne semble s'inquiéter de l'infusion massive de nouveaux RFR dans diverses strates de l'environnement atmosphérique ou terrestre, et l'Agence américaine de protection de l'environnement - l'agence ayant la primauté sur les effets des rayonnements sur l'environnement - n'est plus financée pour la recherche sur les rayonnements non ionisants et la surveillance réglementaire depuis 1996 [372].

L'ionosphère étant un système dynamique capable d'être excité de façon non linéaire par une stimulation externe, on peut raisonnablement craindre que les satellites contribuent à la perturbation de l'atmosphère, au changement climatique et à l'instabilité météorologique [373, 374]. En outre, les molécules d'oxygène (O₂) absorbent facilement la gamme de fréquences de 60 GHz et la pluie atténue facilement les signaux [208, 209, 375]. À 60 GHz, 98 % de l'énergie transmise est absorbée par l'oxygène atmosphérique. Ce spectre de fréquences est donc idéal pour les transmissions à courte distance, mais personne ne comprend comment une forte infusion de RFR dans cette bande - ou dans toute autre - peut affecter l'atmosphère. Elle pourrait être hautement déstabilisante [376].

La FCC a alloué des MMW de 57,05 à 64 GHz pour une utilisation sans licence. Bien que tous les équipements sans fil fonctionnant à 60 GHz doivent obtenir une certification de la FCC, une fois certifiés, les produits peuvent être déployés sans licence sur tout le territoire des États-Unis [209]. Cette bande de fréquences peut s'avérer populaire pour une myriade d'utilisations. Elle pourrait également être capable de déstabiliser à la fois les systèmes météorologiques microclimatiques locaux et les événements atmosphériques plus larges en raison du couplage maximal avec l'oxygène et des facteurs de résonance avec les molécules d'eau [208].

Lorsque les transmissions par satellite atteignent la surface de la Terre, la densité de puissance est faible, mais avec les signaux de réseaux phasés de la 5G, la composante biologiquement active se trouve dans la forme d'onde, et non dans la seule densité de puissance. Aucune recherche ne permet de prédire comment cela affectera la faune dans les zones reculées, mais étant donné ce que l'on sait de l'extrême sensibilité aux CEM de nombreuses espèces, il est probable que des effets se produiront et passeront probablement inaperçus. Étant donné qu'une grande partie de la recherche sur les réseaux phasés

et des précurseurs a été réalisée dans des matériaux à pertes comme l'eau, nous disposons de modèles qui suggèrent que la 5G pourrait avoir des effets particuliers non seulement sur les populations d'insectes (en raison des facteurs de résonance) et d'amphibiens (en raison de la finesse des membranes et de la pénétration profonde du corps) mais aussi sur certaines espèces aqueuses, l'eau étant un milieu hautement conducteur. Même les signaux faibles émis par les satellites utilisant des caractéristiques de réseaux phasés peuvent contribuer de manière significative aux effets sur les espèces dans les régions éloignées.

Aucune EE ou EIS n'a été réalisée dans le cadre des examens NEPA pour étudier cette question [377]. La FCC a exempté les satellites de l'examen de la NEPA en 1986 [360], en grande partie sur la base du fait que la NEPA s'applique à l'environnement humain et que les satellites sont très éloignés. Il semble qu'il n'y ait aucune mention spécifique de l'exemption des satellites de la NEPA, mais la tradition d'exemption se poursuit aujourd'hui [378], bien qu'il soit demandé à la FCC de reconsidérer sa position [379].

Conclusion

Les niveaux ambients de CEM ont fortement augmenté au cours des quatre dernières décennies, créant une nouvelle exposition énergétique qui n'existe pas auparavant à la surface de la Terre, aux niveaux atmosphériques inférieurs ou aux environnements sous-marins. Les dernières décennies ont vu des augmentations exponentielles dans presque tous les environnements, y compris les régions éloignées. Il existe des données de base complètes, mais obsolètes, datant des années 1980, auxquelles il est possible de comparer de nouvelles études importantes réalisées dans d'autres pays, qui ont révélé une augmentation des niveaux de RFR dans les zones urbaines, suburbaines et éloignées, principalement en raison de l'exposition à l'infrastructure cellulaire/aux téléphones/WiFi. Une comparaison indicative de sites similaires entre 1980 et aujourd'hui a révélé une augmentation de 70 fois (7 000 %) du RFR ambiant [149]. L'infrastructure accrue requise pour les réseaux 5G infusera largement l'environnement avec de nouvelles expositions atypiques, tout comme l'augmentation des systèmes satellitaires communiquant avec les réseaux civils au sol. Les nouvelles informations offrent une perspective plus large avec des données plus précises sur les expositions transitoires et chroniques potentielles pour la faune et les habitats. Des effets biologiques ont été observés sur l'ensemble des taxons à des intensités extrêmement faibles, comparables aux expositions ambiantes actuelles, comme le montre la deuxième partie. La principale question présentée dans la partie 1 était de savoir si l'augmentation des CEM anthropogéniques dans l'environnement pouvait avoir des effets biologiques sur la faune sauvage, ce qui pourrait devenir plus urgent avec les technologies 5G, en plus des préoccupations concernant les autorisations potentiellement plus clémentes envisagées par les principaux comités de normalisation de la FCC et de l'ICNIRP (examinées dans la partie 3). Il existe des caractéristiques de signalisation uniques inhérentes à la transmission 5G telle qu'elle est actuellement conçue, qui sont particulièrement préoccupantes pour les espèces non humaines. Contexte

continuent d'augmenter, mais personne n'étudie les effets cumulatifs sur les espèces non humaines.

Financement de la recherche : Aucun n'a été déclaré.

Contributions des auteurs : Tous les auteurs ont accepté la responsabilité de l'ensemble du contenu de ce manuscrit et a approuvé sa soumission.

Intérêts concurrents : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

intérêt.

Consentement éclairé : Non applicable.

Approbation éthique : Non applicable.

Références

1. Organisation mondiale de la santé, Centre international de recherche sur le cancer, CIRC 2002. Monographies sur l'évaluation des risques cancérogènes pour l'homme, rayonnements non ionisants, partie 1, champs électriques et magnétiques statiques et d'extrêmement basse fréquence (ELF). Lyon, France : IARC Press ; 2002, vol 80:338 p.
2. Organisation mondiale de la santé, Centre international de recherche sur le cancer, CIRC 2012. Monographies sur l'évaluation des risques cancérogènes pour l'homme, rayonnements non ionisants, rayonnements non ionisants, partie 2 : champs électromagnétiques radiofréquences. Lyon, France : IARC Press ; 2012, vol 102:419 p.
3. Balmori A. Les effets du rayonnement micro-ondes sur la faune sauvage, résultats préliminaires ; 2003. Disponible sur : http://www.emrpolicy.org/litigation/case_law/beebe_hill/balmori_wildlife_study.pdf.
4. Balmori A. La pollution électromagnétique des antennes de téléphonie. Effets sur la faune. Pathophysiologie 2009;16:191-9.
5. Balmori A. L'incidence de la pollution électromagnétique sur les mammifères sauvages : un nouveau "poison" à effet lent sur la nature ? Environmentalist 2010;30:90-7.
6. Balmori A. L'electrosmog et la conservation des espèces. Sci Total Environ 2014;496:314-6. [10.1016/j.scitotenv.2014.07.061](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.061).
7. Balmori A. Les champs électromagnétiques radiofréquences anthropiques comme une menace émergente pour l'orientation de la faune. Sci Total Environ 2015;518-519:58-60.
8. Balmori A. Radiotélémétrie et faune sauvage : mise en évidence d'une lacune dans les connaissances sur les effets des rayonnements radiofréquences. Sci Total Environ 2016;543:662-9.
9. Cucurachi S, Tamis WLM, Vijver MG, Peijnenburg WLGM, Bolte JFB, de Snoo GR. Une revue des effets écologiques des champs électromagnétiques de radiofréquence (RF-EMF). Environ Int 2013;51:116-40.
10. Everaert J. Les rayonnements électromagnétiques (REM) dans notre environnement ; 2016. Disponible à l'adresse : www.livingplanet.be.
11. Krylov VV, Izumov Yu G, Izekov EI, Nepomnyashchikh VA. Champs magnétiques et comportement des poissons. Biol Bull Rev 2014;4 : 222-31.
12. Panagopoulos DJ, Margaritis LH. Effets des rayonnements de la téléphonie mobile sur les organismes vivants. Dans : Harper AC, Buress RV, éditeurs. Mobile telephones. Hauppauge, NY, USA : Nova Science Publishers, Inc ; 2008, Chapitre 3:107-49 pp.
13. Sivani S, Sudarsanam D. Impacts du champ électromagnétique de radiofréquence (RF-EMF) des tours de téléphonie cellulaire et des appareils sans fil sur le biosystème et l'écosystème - une revue. Biol Med 2013;4:202-16.
14. Tricas T, Gill A. Effects of EMFs from undersea power cables on elasmobranchs and other marine species. Camarillo, CA : Normandean Associates, Exponent ; U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Regulation, and Enforcement, Pacific OCS Region ; 2011 (OCS Study BOEMRE 201109).
15. Balmori A. Possible effects of electromagnetic fields from phone masts on a population of white stork (*Ciconia ciconia*). Electromagn Biol Med 2005;24:109-19.
16. Balmori A, Hallberg O. The urban decline of the house sparrow (*Passer domesticus*) : a possible link with electromagnetic radiation. Electromagn Biol Med 2007;26:141-51.
17. Engels S, Schneider NL, Lefeldt N, Hein CM, Zapka M, Michalik A, et al. Le bruit électromagnétique anthropique perturbe l'orientation de la boussole magnétique chez un oiseau migrateur. Nature 2014;509 : 353-6.
18. Everaert J, Bauwens D. Un effet possible du rayonnement électromagnétique des antennes relais de téléphonie mobile sur le nombre de moineaux domestiques (*Passer domesticus*) en période de reproduction. Electromagn Biol Med 2007;26:63-72.
19. Fernie KJ, Bird DM. Evidence of oxidative stress in American kestrels exposed to electromagnetic fields. Environ Res 2001;86 : 198-207.
20. Fernie KJ, Reynolds SJ. The effects of electromagnetic fields from power lines on avian reproductive biology and physiology : a review. J Toxicol Environ Health B Crit Rev 2005;8:127-40.
21. Fernie KJ, Bird DM, Petitclerc D. Effects of electromagnetic fields on photophasic circulating melatonin levels in American kestrels. Environ Health Perspect 1999;107:901-4.
22. Fernie KJ, Bird DM, Dawson RD, Lague PC. Effects of electromagnetic fields on the reproductive success of American kestrels. Physiol Biochem Zool 2000;73:60-5.
23. Fernie KJ, Leonard NJ, Bird DM. Behavior of free-ranging and captive American kestrels under electromagnetic fields. J Toxicol Environ Health, Part A 2000;59:597-603.
24. Ritz T, Thalau P, Phillips JB, Wiltschko R, Wiltschko W. Resonance effects indicate a radical pair mechanism for avian magnetic compass. Nature 2004;429:177-80.
25. Ritz T, Wiltschko R, Hore PJ, Rodgers CT, Stapput K, Thalau P, et al. La boussole magnétique des oiseaux est basée sur une molécule à sensibilité directionnelle optimale. Biophys J 2009;96:3451-7.
26. Tanner JA. Effet des radiations micro-ondes sur les oiseaux. Nature 1966 ; 210:636.
27. Tanner JA, Romero-Sierra C, Davie SJ. Effets non thermiques du rayonnement micro-ondes sur les oiseaux. Nature 1967;216:1139.
28. Wiltschko R, Wiltschko W. Capter les directions magnétiques chez les oiseaux : processus de paire radicale impliquant le cryptochrome. Biocapteurs 2014 ; 4:221-43.
29. Wiltschko W, Wiltschko R. Magnétoréception chez les oiseaux : deux récepteurs pour deux tâches différentes. J Ornithol 2007;148:S61-76.
30. Wiltschko W, Munro U, Beason RC, Ford H, Wiltschko R. A magnetic pulse leads to a temporary deflection in the orientation of migratory birds. Experientia 1994;50:697-700.

18. Wiltschko W, Freire R, Munro U, Ritz T, Rogers L, Thalau P, et al. La boussole magnétique des poulets domestiques, *Gallus gallus*. *J Exp Biol* 2007;210:2300-10.
19. Wiltschko R, Thalau P, Gehring D, Nießner C, Ritz T, Wiltschko W. Magnétoréception chez les oiseaux : l'effet des champs de radiofréquence. *J R Soc Interface* 2015;12:20141103.
20. Fedrowitz M. Les vaches : un grand modèle pour la recherche sur les CEM, quelque part entre les revues vétérinaires et la "nature". Société de bioélectromagnétisme. Disponible à l'adresse : <https://www.bems.org/node/14835>.
21. Löscher W. Survey of effects of radiofrequency electromagnetic fields on production, health and behavior of farm animals. *Der Prakt Tierarzt* 2003;84:11 (en allemand).
22. Löscher W, Käs G. Behavioral abnormalities in a dairy cow herd near a TV and radio transmitting antenna. *Der Prakt Tierarzt* 1998 ; 79:437-44 (en allemand).
23. Nicholls B, Racey PA. Les chauves-souris évitent les installations radar : les champs électromagnétiques pourraient-ils dissuader les chauves-souris d'entrer en collision avec les éoliennes ? *PLoS One* 2007;2:e297.
24. Nicholls B, Racey PA. L'effet aversif du rayonnement électromagnétique sur les chauves-souris en quête de nourriture : un moyen possible de décourager les chauves-souris de s'approcher des éoliennes. *PLoS One* 2009;4:e6246.
25. Rodriguez M, Petitclerc D, Burchard JF, Nguyen DH, Block E, Downey BR. Réponses du cycle oestral chez les vaches laitières exposées à des champs électriques et magnétiques (60 Hz) pendant des photopériodes de 8 heures. *Anim Reprod Sci* 2003;15:11-20.
26. Balmori A. Le rayonnement électromagnétique comme facteur émergent du déclin des insectes. *Sci Total Environ* 2021;767:144913.
27. Cammaerts MC, De Doncker P, Patris X, Bellens F, Rachidi Z, Cammaerts D. Le rayonnement GSM 900 MHz inhibe l'association des fourmis entre les sites de nourriture et les indices rencontrés. *Electromagn Biol Med* 2012;31:151-65.
28. Cammaerts MC, Rachidi Z, Bellens F, De Doncker P. Collecte de nourriture et réponse aux phéromones chez une espèce de fourmis exposée aux rayonnements électromagnétiques. *Electromagn Biol Med* 2013;32:315-32.
29. Cammaerts MC, Vandenbosch GAE, Volski V. Effet du rayonnement GSM à court terme à des niveaux représentatifs de la société sur un modèle biologique : la fourmi *Myrmica sabuleti*. *J Insect Behav* 2014;27:514-26.
30. Greggers U, Koch G, Schmidt V, Dürr A, Floriou-Servou A, Piepenbrock D, et al. Réception et apprentissage des champs électriques chez les abeilles. *Proc R Soc B Biol Sci* 2013;280:20130528.
31. Guerra P, Gegear RJ, Reppert SM. Une boussole magnétique facilite la migration des papillons monarques. *Nat Commun* 2014;5:4164.
32. Kirschvink JL, Padmanabha S, Boyce CK, Oglesby J. Measurement of the threshold sensitivity of honeybees to weak, extremely low-frequency magnetic fields. *J Exp Biol* 1997;200:1363-8.
33. Kumar NR, Sangwan S, Badotra P. L'exposition aux radiations des téléphones portables produit des changements biochimiques chez les abeilles ouvrières. *Toxicol Int* 2011;18:70-2.
34. Lazaro A, Chroni A, Tscheulin T, Devalez J, Matsoukas C, Petanidou T. Le rayonnement électromagnétique des antennes de télécommunication mobile affecte l'abondance et la composition des pollinisateurs sauvages. *J Insect Conserv* 2016;20 : 315-24.
35. Odemer R, Odemer F. Effets du rayonnement électromagnétique de radiofréquence (RF-EMF) sur le développement de la reine des abeilles domestiques et le succès de l'accouplement. *Sci Total Environ* 2019;661:553-62.
36. Panagopoulos DJ, Margaritis LH. Effets des champs électromagnétiques sur la capacité de reproduction de *D. melanogaster*. In : Stavroulakis P, éditeur. *Biological effects of electromagnetic fields*. New York, NY, USA : Springer International Publishing ; 2003:545-78 pp.
13. Panagopoulos DJ, Karabarounis A, Margaritis LH. Effet du rayonnement du téléphone mobile GSM 900-MHz sur la capacité de reproduction de *Drosophila melanogaster*. *Electromagn Biol Med* 2004;23:29-43.
14. Sutton GP, Clarke D, Morley EL, Robert D. Les poils mécanosensoriels des bourdons (*Bombus terrestris*) détectent les champs électriques faibles. *Proc Natl Acad Sci USA* 2016;113:7261-5.
15. Vácha M, Puzová T, Kvícalová M. Les champs magnétiques à radiofréquence perturbent la magnéto-réception de la blatte américaine. *J Exp Biol* 2009;212:3473-7.
16. Vargová B, Kurimský J, Cimbala R, Kosterec M, Majláth I, Pipová N, et al. Tiques et signaux de radiofréquence : réponse comportementale des tiques (*Dermacentor reticulatus*) dans un champ électromagnétique de 900 MHz. *Syst Appl Acarol* 2017;22:683-93.
17. Vargová B, Majláth I, Kurimský J, Cimbala R, Kosterec M, Tryjanowski P, et al. Rayonnement électromagnétique et réponse comportementale des tiques : un test expérimental. *Exp Appl Acarol* 2018;75 : 85-95.
18. Cammaerts MC, Debeir O, Cammaerts R. Changes in *Paramecium caudatum* (Protozoa) near a switched-on GSM telephone. *Electromagn Biol Med* 2011;30:57-66.
19. Cellini L, Grande R, Di Campli E, Di Bartolomeo S, Di Giulio M, Robuffo L, et al. Réponse bactérienne à l'exposition de champs électromagnétiques de 50 Hz. *Bioelectromagnetics* 2008;29:302-11.
20. Movahedi MM, Nouri F, Golpaygani AT, Aataee L, Amani S, Taheri M. Modèle de sensibilité antibactérienne du *Pseudomonas aeruginosa* et du *Staphylococcus aureus* après exposition aux ondes électromagnétiques émises par le simulateur de téléphone mobile. *J Biomed Phys Eng* 2019;9:637-46.
21. Potenza L, Ubaldi L, De Sanctis R, De Bellis R, Cuccharini L, Dachà M. Effects of a static magnetic field on cell growth and gene expression in *Escherichia coli*. *Mutat Res* 2004;561:53-62.
22. Rodriguez-de la Fuente AO, Gomez-Flores R, Heredia-Rojas JA, Garcia-Munoz EM, Vargas-Villarreal J, Hernandez-Garcia ME, et al. Altération de la croissance de *Trichomonas vaginalis* et *Giardia lamblia* par les champs électromagnétiques de basse fréquence. *Iran J Parasitol* 2019;14:652-6.
23. Said-Salman IH, Jebaï FA, Yusef HH, Moustafa ME. Évaluation des effets du rayonnement Wi-Fi sur la sensibilité aux antibiotiques, l'activité métabolique et la formation de biofilms par *Escherichia coli* 0157H7, *Staphylococcus aureus* et *Staphylococcus epidermidis*. *J Biomed Phys Eng* 2019;9:579-86.
24. Salmen SH, Alharbi SA, Faden AA, Wainwright M. Évaluation de l'effet du champ électromagnétique à haute fréquence sur la croissance et la sensibilité aux antibiotiques des bactéries. *Saudi J Biol Sci* 2018;25:105-10.
25. Balmori A. Mobile phone mast effects on common frog (*Rana temporaria*) tadpoles : the city turned into a laboratory. *Electromagn Biol Med* 2010;29:31-5.
26. Balmori A. L'incidence de la pollution électromagnétique sur le déclin des amphibiens : est-ce une pièce importante du puzzle ? *Toxicol Environ Chem* 2006;88:287-99.
27. Komazaki S, Takano K. Induction d'une augmentation de la concentration de calcium intracellulaire des cellules embryonnaires et accélération des mouvements cellulaires morphogénétiques pendant la gastrulation des amphibiens par un champ magnétique de 50 Hz. *J Exp Zool* 2007;307A:156-62.
28. Phillips JB, Deutschlander ME, Freake MJ, Borland SC. The role of extraocular photoreceptors in newt magnetic compass orientation : evidence for parallels between light-dependent

- magnétoréception et détection de la lumière polarisée chez les vertébrés. *J Exp Biol* 2001;204:2543-52.
37. Phillips JB, Jorge PE, Muheim R. Light-dependent magnetic compass orientation in amphibians and insects : candidate receptors and candidate molecular mechanisms. *J R Soc Interface* 2010;7(2 Suppl):S241-56.
38. Shakhpashov VV, Ogurtsov SV. Les grenouilles des marais, *Pelophylax ridibundus*, déterminent la direction migratoire par le champ magnétique. *J Comp Physiol A* 2017;203:35-43.
39. Josberger E, Hassanzadeh P, Deng PY, Sohn J, Rego M, Amemiya C, et al. Conductivité protonique dans les ampoules de la gelée de Lorenzini. *Sci Adv* 2016;2:e1600112.
40. Landler L, Painter MS, Youmans PW, Hopkins WA, Phillips JB. Alignement magnétique spontané par les tortues serpentines d'un an : association rapide du modèle d'entrée magnétique dépendant de la radiofréquence avec un nouvel environnement. *PloS One* 2015;10 : e0124728.
41. Lohmann KJ, Lohmann CMF. Détection de l'intensité des champs magnétiques par les tortues de mer. *Nature* 1966;380:59-61.
42. Lohmann KJ, Lohmann CMF. Orientation et navigation en haute mer chez les tortues de mer. *J Exp Biol* 1996;199:73-81.
43. Lohmann KJ, Lohmann CMF. Mécanismes de guidage migratoire chez les tortues marines. *J Avian Biol* 1998;29:585-96.
44. Lohmann KJ, Witherington BE, Lohmann CMF, Salmon M. Orientation, navigation, and natal beach homing in sea turtles. In : Lutz P, Musick J, éditeurs. *The biology of sea turtles*. Boca Raton : CRC Press ; 1997:107-35 pp.
45. Luschi P, Benhamou S, Girard C, Ciccone S, Roos D, Sudre J, et al. Les tortues marines utilisent des signaux géomagnétiques pendant la recherche de leur habitat en haute mer. *Curr Biol* 2007;17:126-33.
46. Merrill MW, Salmon M. Magnetic orientation by hatchling loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) from the Gulf of Mexico. *Mar Biol* 2010;158:101-12.
47. Naisbett-Jones LC, Putman NF, Stephenson JF, Ladak S, Young KA. Une carte magnétique conduit les anguilles européennes juvéniles vers le Gulf Stream. *Curr Biol* 2017;27:1236-40.
48. Naisbett-Jones LC, Putman NF, Scanlan MM, Noakes DL, Lohmann KJ. Magnéto-réception chez les poissons : l'effet des impulsions magnétiques sur l'orientation des saumons juvéniles du Pacifique. *J Exp Biol* 2020;223 : jeb222091.
49. Putman NF, Jenkins ES, Michielsens CG, Noakes DL. L'empreinte géomagnétique prédit la variation spatio-temporelle de la migration de homing des saumons roses et rouges. *J R Soc Interface* 2014;11 : 20140542.
50. Putman NF, Meinke AM, Noakes DL. L'élevage dans un champ magnétique déformé perturbe le " sens de la carte " de la truite steelhead juvénile. *Biol Lett* 2014;10:20140169.
51. Putman NF, Scanlan MM, Billman EJ, O'Neil JP, Couture RB, Quinn TP, et al. La carte magnétique héritée guide la navigation océanique chez les saumons juvéniles du Pacifique. *Curr Biol* 2014;24 : 446-50.
52. Putman NF, Williams CR, Gallagher EP, Dittman AH. Un sens du lieu : les saumons roses utilisent une carte magnétique pour s'orienter. *J Exp Biol* 2020;223:jeb218735.
53. Quinn TP, Merrill RT, Brannon EL. Détection des champs magnétiques chez le saumon rouge. *J Exp Zool* 2005;217:137-42.
54. Belyavskaya NA. Ultrastructure and calcium balance in meristem cells of pea roots exposed to extremely low magnetic fields. *Adv Space Res* 2001;28:645-50.
55. Vian A, Roux D, Girard S, Bonnet P, Paladian F, Davies E, et al. Microwave irradiation affects gene expression in plants. *Plant Signal Behav* 2006;1:67-70.
56. Vian A, Davies E, Gendraud M, Bonnet P. Réponses des plantes aux champs électromagnétiques de haute fréquence. *BioMed Res Int* 2016;2016 : 1830262.
57. NRDc. La promesse du réseau intelligent : les objectifs, les politiques et les mesures doivent soutenir les avantages de la durabilité. Dossier thématique, Ralph Cavanagh ; 2012. Disponible sur : <https://www.nrdc.org/resources/promise-smart-grid-goals-policies-and-measurement-must-support-sustainability-benefits>.
58. Sierra Club. Le comité de l'énergie éduque le public avec un forum sur le réseau intelligent, par rick nunn et amy weinfurter ; 2013. Disponible sur : <https://www.sierraclub.org/dc/blog/2013/10/energy-committee-educes-public-smart-grid-forum>.
59. Département de l'énergie et de la protection de l'environnement du Connecticut. Comprehensive energy strategy, CT general statutes section 16a-3d, Connecticut department of energy and environmental protection, draft ; 2017. Disponible sur : http://www.ct.gov/deep/lib/deep/energy/ces/2017_draft_comprehensiveenergystrategy.pdf.
60. Wheeler T. Remarques préparées du président de la FCC Tom Wheeler, l'avenir du sans fil : une vision pour le leadership des États-Unis dans un monde 5G. Washington, D.C. : National Press Club ; 2016:3 p.
61. Michaelson SM, Lin JC. Biological effects and health implications of radiofrequency radiation. New York et Londres : Plenum Press ; 1987:272-7 pp.
62. Yong E. Les Robins peuvent littéralement voir les champs magnétiques, mais seulement si leur vision est nette. *DiscoverMagazine.com*. Disponible sur : <http://blogs.discovermagazine.com/notrocketscience/2010/07/08/robins-can-literally-see-magnetic-fields-but-only-if-their-vision-is-sharp/#.WIU2d3IG3Z4>.
63. Conseil de l'Europe, Assemblée parlementaire, Résolution 1815. Version finale : les dangers potentiels des champs électromagnétiques et leurs effets sur l'environnement. Origine - texte adopté par la commission permanente, agissant au nom de l'assemblée, le 27 mai 2011 (voir doc. 12608, rapport de la commission de l'environnement, de l'agriculture et des questions territoriales, rapporteur : M. Huss) ; 2011. Disponible sur : <http://assembly.coe.int/nw/xml/XRef/Xref-XML2HTML-en.asp?fileid=17994&>.
64. Conseil de la santé des Pays-Bas. Rapport 2020. 5G et santé à : le président de la chambre des représentants des Pays-Bas. La Haye ; 2020, n° 2020/16e.
65. Manville AM II. Recommandations pour des recherches et des financements supplémentaires afin d'évaluer les impacts des rayonnements non ionisants sur les oiseaux et autres espèces sauvages. Mémorandum au Dr J. McGlade, conseiller scientifique du Programme des Nations unies pour l'environnement, principaux besoins de recherche affectant la faune et la flore suggérant l'attention immédiate du PNUE ; 2015:2 p.
66. Manville AM II. Impacts sur les oiseaux et les chauves-souris dus aux collisions et aux électrocutions de certaines structures de grande taille aux États-Unis - fils, tours, turbines et panneaux solaires : état des lieux pour résoudre les problèmes. Dans : Angelici FM, éditeur. *Problematic wildlife : a cross-disciplinary approach*. New York, NY, USA : Springer International Publishing ; 2016, Chap. 20 : 415-42 pp.
67. Manville AM II. Un mémo d'information : ce que nous savons, pouvons déduire et ne savons pas encore sur les impacts des rayonnements non ionisants thermiques et non thermiques sur les oiseaux et autres espèces sauvages - pour une diffusion publique. Note d'information évaluée par les pairs ; 2016:12 p.

0. Manville, AM II. Recommandations pour des recherches et des financements supplémentaires afin d'évaluer les impacts des rayonnements non ionisants sur les oiseaux et autres espèces sauvages. Mémorandum au Dr J. McGlade, conseiller scientifique du Programme des Nations unies pour l'environnement, principaux besoins de recherche touchant la faune et la flore sauvages suggérant l'attention immédiate du PNUE ; 2015:2 p.
1. Manville AM II. Protocole de surveillance des impacts des tours de communication cellulaire sur les oiseaux migrateurs dans les forêts nationales de Coconino, Prescott et Kaibab, Arizona. Protocole de surveillance de la recherche évaluée par les pairs, demandé par et préparé pour le Service forestier des États-Unis. Division of Migratory Bird Management, USFWS ; 2002:9 p.
2. Manville AM II. Anthropogenic-related bird mortality focusing on steps to address human-caused problems. In : Livre blanc invité pour le panel anthropique, 5e conférence internationale partners in flight, 27 août 2013. Division de la gestion des oiseaux migrateurs, USFWS, Snowbird, Utah ; 2013:16 p. livre blanc revu par les pairs.
3. Levitt BB, Lai H. Biological effects from exposure to electromagnetic radiation emitted by cell tower base stations and other antenna arrays. *Environ Rev* 2010;18:369-95.
4. Sage C, Carpenter DO, éditeurs. Rapport BioInitiative : a rationale for a biologically-based public exposure standard for electromagnetic fields (ELF and RF). Rapport mis à jour : 2014-2020 ; 2012. Disponible sur : www.bioinitiative.org.
5. McKinley GM, Charles DR. Certains effets biologiques des champs de haute fréquence. *Science* 1930;71:490.
6. Ark PA, Parry W. Application of high-frequency electrostatic fields in agriculture. *Q Rev Biol* 1940;16:172.
7. McRee DI. Une revue technique des effets biologiques des rayonnements non ionisants. Washington, DC : Office of Science and Technology Policy ; 1978.
8. Massey K. Le défi des rayonnements non ionisants : une proposition de législation. *Duke Law J* 1979:105. <https://doi.org/10.2307/1372226>.
9. BENER. Rayonnement électromagnétique non ionisant (D-300 GHz). Rapport préparé pour la National Telecommunications and Information Administration par l'Interagency Task Force on biological effects of nonionizing electromagnetic radiation ; 1979.
10. Havas M. Des archives de Zory Glaser ; 2010. Disponible à l'adresse : <http://www.magdahavas.com/introduction-to-from-zorys-archive/>.
11. Foster KR, Morrissey JJ. Aspects thermiques de l'exposition à l'énergie de radiofréquence : rapport d'un atelier. *Int J Hyperther* 2011;27:307-9.
12. Foster KR, Kritikos HN, Schwan HP. Effet du refroidissement de surface et du flux sanguin sur le chauffage des tissus par micro-ondes. *IEEE Trans Biomed Eng* 1978;25:313-6.
13. Foster KR, Ziskin MC, Balzano QR. Réponse thermique de la peau humaine à l'énergie des micro-ondes : une revue critique. *Health Phys* 2016 ; 111:528-41.
14. Foster KR, Ziskin MC, Balzano QR. Modélisation thermique pour la prochaine génération de limites d'exposition aux radiofréquences : commentaire. *Health Phys* 2017;113:41-53.
15. Foster KR, Ziskin MC, Balzano Q, Bit-Babik G. Modélisation de l'échauffement des tissus dû à l'exposition à l'énergie de radiofréquence et pertinence de l'échauffement des tissus par rapport aux limites d'exposition : facteur de chauffage. *Health Phys* 2018;115:295-307.
16. Justesen DR, Ragan HA, Rogers LE, Guy WA, Hjeresen DL, Hinds WT, et al. Compilation et évaluation des bioeffets des micro-ondes : A selective review of the literature on biological effects of microwaves in relation to the satellite power system, no PNL-2634 (Revision). Washington, DC : Department of Energy ; 1978.
17. Glasser ZR, Cleveland RF, Keilman JK. Bioeffects, chapitre 3, NIOSH draft criteria document on radio-frequency and microwave radiation. Washington, DC [Projet du directeur] : National Institute for Occupational Safety and Health ; 1979 : 29-330 pp.
18. American National Standards Institute, ANSI C95.1. American national standard safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 300 kHz to 100 GHz. ANSI C95.1 - 1982 ; 1982. Disponible sur : <https://ehtrust.org/wp-content/uploads/2015/11/ANSI-National-standards-1982-safety-levels-for-human-exposure.pdf>.
19. Commission fédérale des communications. Evaluating compliance with FCC-specified guidelines for human exposure to radiofrequency radiation, 97-101th ed. Washington, DC : U.S. Federal Communications Commission. Office of Engineering and Technology, OET Bulletin 65 ; 1997. Disponible sur : https://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Documents/bulletins/oet65/oet65.pdf.
20. Commission fédérale des communications des États-Unis. Exposition humaine aux champs électromagnétiques de radiofréquence et réévaluation des limites et des politiques d'exposition aux radiofréquences de la FCC. Une règle de la commission fédérale des communications le 04/01/2020 publiée dans : the federal register ; 2020. Disponible sur : <https://www.federalregister.gov/documents/2020/04/01/2020-02745/human-exposure-to-radiofrequency-electromagnetic-fields-and-reassessment-of-fcc-radiofrequency>.
21. Commission fédérale des communications des États-Unis. (Federal register, human exposure to radiofrequency electromagnetic fields ; correction, A proposed rule by the federal communications commission on 05/04/2020 ; 2020. Disponible sur : <https://www.federalregister.gov/documents/2020/05/04/2020-08738/human-exposure-to-radiofrequency-electromagnetic-fields-correction>.
22. ICNIRP. Lignes directrices pour limiter l'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques variant dans le temps (jusqu'à 300 GHz). Allemagne : Conseil international des rayonnements non ionisants (ICNIRP). Oberschleissheim ; 1998.
23. ICNIRP. Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants, 2020 ICNIRP guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 KHZ TO 300GHZ), publié avant impression dans health physics ; 2020. Disponible sur : <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrgdl2020.pdf>.
24. Magras IN, Xenos TD. RF-induced changes in the prenatal development of mice. *Bioelectromagnetics* 1997;18:455-61.
25. Schwarze S, Schneibdr NL, Reichl T, Dreyer D, Lefeldt N, Engels S, et al. Les faibles champs électromagnétiques à large bande perturbent davantage l'orientation de la boussole magnétique chez un oiseau chanteur migrateur nocturne (*Erythacus rubecula*) que les forts champs à bande étroite. *Front Behav Neurosci* 2016;10:55.
26. Zosangzuali M, Lalremruati M, Lalmuansangi C, Nghakliana F, Pachuau L, Bandara P, et al. Effets du rayonnement électromagnétique de radiofréquence émis par une station de base de téléphonie mobile sur l'homéostasie redox dans différents organes de Suisses.

- souris albinos. *Electromagn Biol Med* 2021 Mar 9. <https://doi.org/10.1080/15368378.2021.1895207> [Epub avant impression].
27. Adey WR. Tissue interactions with nonionizing electromagnetic fields. *Physiol Rev* 1981;61:435-514.
 28. Adey WR. Phénomènes de non-équilibre ionique dans les interactions des tissus avec les champs électromagnétiques. In : Illinger KH, éditeur. *Biological effects of nonionizing radiation*. Washington, D.C. : American Chemical Soc. ; 1981:271-97 pp.
 29. Adey WR. Nonlinear, nonequilibrium aspects of electromagnetic field interactions at cell membranes. In : Adey WR, Lawrence AF, éditeurs. *Nonlinear electrodynamics in biological systems*. New York : Plenum Press ; 1984:3-22 pp.
 30. Adey WR. Effets biologiques des champs électromagnétiques. *J Cell Biochem* 1993;51:410-6.
 31. Gandhi OP. The ANSI radio frequency safety standard : its rationale and some problems. *IEEE Eng Med Biol Mag* 1987;6 : 22-5.
 32. Frey AH, éditeur. *Sur la nature des interactions des champs électromagnétiques avec les systèmes biologiques*. Austin, TX : R.G. Landes Company ; 1994:5-6 pp.
 33. Adair RK. Environmental objections to the PAVE PAWS radar system : a scientific review. *Radiat Res* 2003;159:128-34.
 34. Adair RK. Limites biophysiques des effets athermiques des rayonnements RF et micro-ondes. *Bioelectromagnetics* 2003;24:39-48.
 35. Bruno WJ. Que nous apprend l'énergie des photons sur la sécurité des téléphones portables ? 2011. *arXiv preprint arXiv:1104.5008*. Disponible à l'adresse : <https://arxiv.org/abs/1104.5008> [mise à jour 2017].
 36. Becker RO. *Cross currents, the perils of electropollution, the promise of electromedicine*. Los Angeles : Jeremy Tarcher ; 1990 : 67-81 pp.
 37. DiCarlo A, White N, Guo F, Garrett P, Litovitz T. Chronic electromagnetic field exposure decreases HSP70 levels and lowers cytoprotection. *J Cell Biochem* 2002;84:447-54.
 38. Blank M. *Overpowered, what science tells us about the dangers of cell phones and other Wi-Fi-age devices*. New York : Seven Stories Press ; 2014:28-9 pp.
 39. Marino A. *Évaluation des risques sanitaires des tours de téléphonie mobile*. In : Levitt BB, éditeur. *Tours cellulaires, commodité sans fil ? Or environmental hazard ? Safe Goods/New Century*, 2001. Bloomingtoin, IN : iUniverse, Inc ; 2011:87-103 pp.
 40. Lorenz EN. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci* 1963;20 : 130-41.
 41. Lorenz EN. La prévisibilité de l'écoulement hydrodynamique. *Trans NY Acad Sci* 1963;25:409-32.
 42. Lorenz EN. Predictability. In : 139e réunion de l'AAAS ; 1972.
 43. Peleg M. Les phénomènes biologiques sont affectés par des agrégats de nombreux photons de radiofréquence. In : Conférence internationale sur les indicateurs environnementaux (ISEI), 11-14 sept. 2011 à Haifa ; 2011.
 44. Kostoff RN, Lau CGY. Effets modifiés sur la santé des rayonnements électromagnétiques non ionisants combinés à d'autres agents rapportés dans la littérature biomédicale. Chapitre 4. In : Geddes CD, éditeur. *Microwave effects on DNA and proteins*. New York, NY, États-Unis : Springer International Publishing ; 2017.
 45. Peleg M. Perspective thermodynamique sur l'interaction des rayonnements de radiofréquence avec les tissus vivants. *Int J Biophys* 2012 ; 2:1-6.
 46. Panagopoulos DJ. Considérer les photons comme des paquets d'ondes confinés dans l'espace. Dans : Reimer A, éditeur. *Horizons dans la physique du monde*. New York, NY, USA : Nova Science Publishers ; 2015, vol 285.
 47. Panagopoulos DJ. Le rayonnement électromagnétique produit par l'homme n'est pas quantifié. Dans : Reimer A, éditeur. *Horizons dans la physique du monde*. New York, NY, USA : Nova Science Publishers, Inc ; 2018:296 p.
 48. Panagopoulos D, Karabarbounis A. Commentaire sur "Behavior of charged particles in a biological cell exposed to AC-DC electromagnetic fields" et sur "Comparison between two models for interactions between electric and magnetic fields and proteins in cell membranes". *Environ Eng Sci* 2011;28 : 749-51.
 49. Panagopoulos DJ, Margaritis LH. Considérations théoriques sur les effets biologiques des champs électromagnétiques. In : Stavroulakis P, éditeur. *Biological effects of electromagnetic fields*. New York, NY, USA : Springer Publisher ; 2003:5-33 pp.
 50. Tell RA, Kavet R. Une enquête sur l'environnement urbain des radiofréquences (RF). *Radiat Protect Dosim* 2014;162:499-507.
 51. Sagar S, Dongus S, Schoeni A, Roser K, Eeftens M, Struchen B, et al. Exposition aux champs électromagnétiques de radiofréquence dans les micro-environnements quotidiens en Europe : une revue systématique de la littérature. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 2017;28:147-60.
 52. Sagar S, Adem SM, Struchen B, Loughran SP, Brunjes ME, Arangua L, et al. Comparaison des niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques de radiofréquences dans différents micro-environnements quotidiens dans un contexte international. *Environ Int* 2018;114:297-306.
 53. Gonzalez-Rubio J, Najera A, Arribas E. Carte complète de l'exposition personnelle aux RFEMF et son utilisation potentielle dans les études épidémiologiques. *Environ Res* 2016;149:10512.
 54. Tell RA, Mantiply ED. Population exposure to VHF and UHF broadcast radiation in the United States. *Proc IEEE* 1980;68 : 6-12.
 55. Moskowitz J. Une nouvelle étude montre que les tours de téléphonie cellulaire sont le plus grand contributeur à l'exposition aux radiofréquences environnementales ; 2018. Disponible à l'adresse : <https://www.saferemr.com/2018/03/cell-phone-towers-are-largest.html>.
 56. Estenberg J, Augustsson T. Mesures extensives sélectives en fréquence des champs de radiofréquences dans des environnements extérieurs réalisées avec un nouveau système de surveillance mobile. *Bioelectromagnetics* 2014;35:227-30.
 57. Hardell L, Koppel T, Carlberg M, Ahonen M, Hedendahl L. Rayonnement de radiofréquence à la gare centrale de Stockholm en Suède et quelques aspects médicaux sur l'exposition du public aux champs RF. *Int J Oncol* 2016;49:1315-24.
 58. Hardell L, Carlberg M, Koppel T, Hedendahl L. Rayonnement à haute radiofréquence dans la vieille ville de Stockholm : une étude à l'aide d'un exposimètre incluant le château royal, la Cour suprême, trois places principales et le parlement suédois. *Mol Clin Oncol* 2017;6:462-76.
 59. Bolte JF, Eikelboom T. Mesures du champ électromagnétique de radiofréquences personnelles aux Pays-Bas : niveau d'exposition et variabilité pour les activités quotidiennes, les moments de la journée et les types de zone. *Environ Int* 2012;48:133-42.
 60. Frei P, Mohler E, Neubauer G, Theis G, Bürgi A, Fröhlich J, et al. Temporal and spatial variability of personal exposure to radio frequency electromagnetic fields. *Environ Res* 2009;109 : 779-85.
 61. Joseph W, Frei P, Roösl M, Thuróczy G, Gajsek P, Trcek T, et al. Comparaison de l'exposition personnelle aux champs électromagnétiques de radiofréquence dans différentes zones urbaines d'Europe. *Environ Res* 2010;110:658-63.

62. Markakis I, Samaras T. Exposition aux radiofréquences dans les environnements intérieurs grecs. *Health Phys* 2013;104:293-301.
63. Rowley JT, Joyner KH. Analyse internationale comparative des enquêtes sur l'exposition aux radiofréquences des stations de base de radiocommunication mobile. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 2012;22 : 304-15.
64. Rowley JT, Joyner KH. Observations du réseau national italien de surveillance de la radiofréquence fixe. *Bioelectromagnétique* 2016 ; 37:136-9.
65. Urbinello D, Huss A, Beekhuizen J, Vermeulen R, Röösli M. Utilisation d'appareils de mesure d'exposition portables pour comparer le rayonnement des stations de base de téléphonie mobile dans différents types de zones dans les villes de Bâle et d'Amsterdam. *Sci Total Environ* 2014;468-469 : 1028-33.
66. Viel JF, Cardis E, Moissonnier M, de Seze R, Hours M. Exposition aux radiofréquences dans la population générale française : variabilité de la bande, du temps, du lieu et de l'activité. *Environ Int* 2009;35 : 1150-4.
67. Viel JF, Clerc S, Barrera C, Rymzhanova R, Moissonnier M, Heures M, et al. Residential exposure to radiofrequency fields from mobile phone base stations, and broadcast transmitters : a population-based survey with personal meter. *Occup Environ Med* 2009;66:550-6.
68. Viel JF, Tiv M, Moissonnier M, Cardis E, Hours M. Variabilité de l'exposition aux radiofréquences selon les jours de la semaine : une étude en population. *Environ Res* 2011;111:510-3.
69. Kasevich RS. Bref aperçu des effets des champs électromagnétiques sur l'environnement. In : Levitt BB, éditeur. *Tours cellulaires, commodité sans fil ou risques environnementaux ? Proceedings of the "cell towers forum" state of the science/state of the law*. Bloomington, IN : iUniverse, Inc ; 2011:170-5 pp.
70. Angleis L, Benedetto A, Bonino A, Colla D, Martire F, Fusette S, et al. Population exposure to electro-magnetic fields generated by radio base stations : evaluation of the urban background by using provisional model and instrumental measurements. *Radiat Protect Dosim* 2001;97:355-8.
71. Hardell L, Carlberg M, Hedendahl LK. Le rayonnement radiofréquence des stations de base à proximité donne des niveaux élevés dans un appartement à Stockholm, en Suède : un rapport de cas. *Oncol Lett* 2018;15 : 7871-83.
72. Rinebold JM. Emplacement centralisé par l'Etat des installations de télécommunications et efforts de coopération avec les villes du Connecticut. Dans : Levitt BB, éditeur. *Tours cellulaires, commodité sans fil ? Or environmental hazard ? Proceedings of the cell towers forum, state of the science/state of the law*. Bloomington, IN : iUniverse, Inc ; 2001:129-41 pp.
73. Santini R, Santini P, Danze JM, Le Ruz P, Seigne M. Enquête sur la santé de riverains de stations relais de tél'phonie mobile : incidences de la distance et du sexe. *Pathol Biol* 2002;50 : 369-73.
74. Manville AM II. Impact humain sur l'ours noir dans la péninsule inférieure du Michigan. *Int Conf Bear Res Manag* 1983;5:20-33.
75. Lohmann KJ. Sea turtles : navigating with magnetism. *Curr Biol* 2007;17:R102-4.
76. Barron DG, Brawn JD, Weatherhead PJ. Méta-analyse des effets des émetteurs sur le comportement et l'écologie des oiseaux. *Methods Ecol Evol* 2010;1:180-7.
77. Albrecht K. Microchip-induced tumors in laboratory rongeurs and dogs : a review of the literature 1990-2006. *IEEE Int Symp Technol Soc* 2010;2010:337-49.
78. Blanchard KT, Barthel C, French JE, Holden HE, Moretz R, Pack FD, et al. Transponder-induced sarcoma in the heterozygous p53+/- mouse. *Toxicol Pathol* 1999;27:519-27.
79. Elcock LE, Stuart BP, Wahle BS, Hoss HE. Tumeurs dans les études à long terme sur les rats associées aux dispositifs d'identification des animaux par micropuce. *Exp Toxicol Pathol* 2001;52:483-91.
80. Johnson K. Tumorigénèse à corps étranger : sarcomes induits chez les souris par des transpondeurs implantés par voie sous-cutanée. *Toxicol Popul* 1996;33:619.
81. Le Calvez S, Perron-Lepage M-F, Burnett R. Subcutaneous microchip-associated tumours in B6C3F1 mice : a retrospective study to attempt to determine their histogenesis. *Exp Toxicol Pathol* 2006;57:255-65.
82. Palmer TE, Nold J, Palazzolo M, Ryan T. Fibrosarcomas associated with passive integrated transponder implants. Dans : 16ème symposium international de la société de pathologie toxicologique. *Toxicol Pathol* 1998;26:165-76.
83. Tillmann T, Kamino K, Dasenbrock C, Ernst H, Kohler M, Morawetz G, et al. Subcutaneous soft tissue tumours at the site of implanted microchips in mice. *Exp Toxicol Pathol* 1997;49 : 197-200.
84. Vascellari M, Mutinelli F, Cossettini R, Altinier E. Liposarcome au site d'une puce électronique implantée chez un chien. *Vet J* 2004;168 : 188-90.
85. Vascellari M, Mutinelli F. Fibrosarcome avec caractéristiques typiques de sarcome post-injection au site d'implantation d'une puce électronique chez un chien : étude histologique et immunohistochimique. *Vet Pathol* 2006 ; 43:545-8.
86. Paik MJ, Kim HS, Lee YS, Choi HD, Pack JK, Kim N, et al. Étude métabolomique des polyamines urinaires chez le rat exposé au signal d'identification par radiofréquence de 915 MHz. *Amino Acids* 2016;48 : 213-7.
87. Ball DJ, Argentieri G, Krause R, Lipinski M, Robison RL, Stoll RE, et al. Evaluation of a microchip implant system used for animal identification in rats. *Lab Anim Sci* 1991;41:185-6.
88. Darney K, Giraudin A, Joseph R, Abadie P, Aupinel P, Decourtey A, et al. Effet des radiations à haute fréquence sur la survie de l'abeille domestique (*Apis mellifera* L.). *Apidologie* 2015;47:703-10.
89. Murasugi E, Koie H, Okano M, Watanabe T, Asano R. Histological reactions to microchip implants in dogs. *Vet Rec* 2003;153 : 328-30.
90. Rao GN, Edmondson J. Tissue reaction to an implantable identification device in mice. *Toxicol Catholique* 1990;18:412-6.
91. Raybuck DW, Larkin JL, Stoleson SH, Boves TJ. Effets mixtes des géolocaliseurs sur la reproduction et la survie des parulines céruleennes, un migrateur longue distance vivant dans la canopée. *Condor* 2017;119 : 289-97.
92. Calvente I, Fernández MF, Pérez-Lobato R, Dávila-Arias C, Ocón O, Ramos R, et al. Caractérisation extérieure des champs électromagnétiques de radiofréquence dans une cohorte de naissance espagnole. *Environ Res* 2015;138:136-43.
93. Lahham A, Ayyad H. Exposition personnelle aux champs électromagnétiques de radiofréquence chez les adultes palestiniens. *Health Phys* 2019;117:396-402.
94. Hamnerius Y, Uddmar T. Microwave exposure from mobile phones and base stations in Sweden. In : Proceedings of the international conference on cell tower sitting ; 2000:52-63 pp.
95. Gryz K, Karpowicz J. Exposition aux rayonnements électromagnétiques de radiofréquence à l'intérieur de l'infrastructure des tubes du métro de Warszawa. *Electromagn Biol Med* 2015;34:265-73.

96. Joyner KH, Van Wyk MJ, Rowley JT. Enquêtes nationales sur les intensités de champ de radiofréquences des stations de base radio en Afrique. *Radiat Protect Dosim* 2014;158:251-62.
97. Sagar S, Struchen B, Finta V, Eeftens M, Röösli M. Utilisation d'exposimètres portables pour surveiller l'exposition aux champs électromagnétiques de radiofréquences dans l'environnement quotidien. *Environ Res* 2016;150:289-98.
98. Stribbe M. Les dirigeables de Google vont apporter l'internet sans fil en Afrique. *Forbes* 2013;15:757.
99. CBS News, Associated Press. Les États-Unis testent des dirigeables espions à la frontière mexicaine, 22 août 2012, 21 h 17 ; 2012. Disponible sur : <http://www.cbsnews.com/news/us-tests-spy-blimps-on-mexico-border/>.
100. NASA. National Aeronautics and Space Administration. Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). The Last of the Wild Project, version 2, 2005 (LWP-2) : Ensemble de données sur l'empreinte humaine mondiale (Geographic), v2 (1995-2004) ; 2018. Disponible sur : <https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C179001808-SEDAC.html>.
101. Centre pour le réseau d'information sur les sciences de la Terre (CIESN). The last of the wild project, version 2, 2005 (LWP-2) : global human footprint dataset (Geographic), v2 (1995- 2004) ; 2018. <https://doi.org/10.7927/H4M61H5F>.
102. Macedo L, Salvador CH, Moschen N, Monjeau A. Les mammifères de la forêt atlantique ne trouvent pas de couverture cellulaire. *Biol Conserv* 2018 ; 220:201-8.
103. Platt JR. Pas de réception de téléphone portable ? C'est une bonne nouvelle pour les jaguars, une nouvelle étude révèle que les grands félins et autres animaux en voie de disparition se portent mieux dans les endroits où il n'y a pas de couverture téléphonique. *Le Révélateur* ; 2018. Disponible sur : <http://therevicator.org/phones-vs-jaguars/>.
104. PEER. Les employés publics pour la responsabilité environnementale. L'arrière-pays de Yellowstone couvert d'une couverture cellulaire, les coins les plus reculés sont désormais connectés malgré les promesses de couverture limitée du parc ; 2016. Disponible sur : <https://www.peer.org/news/news-releases/yellowstone-backcountry-blanketed-with-cell-coverage.html>.
105. PEER. Employés publics pour la responsabilité environnementale. Mount rainier wilderness slated for cell coverage, proposed cellular antennas in Paradise Visitor Center will wire wilderness ; 2016. Disponible sur : <http://www.peer.org/news/news-releases/mount-rainier-wilderness-slated-for-cell-coverage.html>.
106. Tobias J. Le service des parcs se vend aux géants des télécommunications. Avec la bénédiction de Trump, les tours de téléphonie cellulaire s'infiltrent dans les terres publiques protégées de l'Ouest. *High Country News* ; 2020. Disponible sur : <https://www.hcn.org/issues/52.3S/special-technology-the-park-service-is-selling-out-to-telecom-giants>.
107. Ketcham C. Câbler la nature sauvage, le NP S fait la course pour étendre le service de téléphonie cellulaire dans les parcs du pays. Voulons-nous vraiment une nature sauvage connectée ? *Sierra* ; 2020. Disponible sur : https://digital.sierramagazine.org/publication/?i=664414&article_id=3702685&view=articleBrowser.
108. NRDC. Bande unie des Indiens Cherokee de l'Oklahoma. V. FCC, 933 F.3d 728 (D.C. Cir. 2019) ; 2019.
109. Meng YS, Lee YH, Ng BC. Étude de la perte de propagation en milieu forestier. *Prog Electromagn Res B* 2009;17:117-33.
110. Kingsley D. Can't hear the conversation for the trees, News in Science, ABC Science Online ; 2002. Disponible sur : <http://www.abc.net.au/science/articles/2002/06/12/578753.htm>.
111. Commission fédérale des communications des États-Unis. Federal Communications Commission Office of Engineering and Technology bulletin number 70 July, 1997, millimeter wave propagation : spectrum management implications. Federal Communications Commission Office of Engineering and Technology, New Technology Development Division ; 1997. Disponible sur : <https://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering..Technology/Documents/bulletins/oet70/oet70a.pdf>.
112. Hakusui SS Communications fixes sans fil à 60 GHz : propriétés uniques d'absorption de l'oxygène, RF globalnet, news ; 2001. Disponible sur : <https://www.rfglobalnet.com/doc/fixed-wireless-communications-at-60ghz-unique-0001>.
113. Ordnance Survey 2018. Fifth generation mobile communications the effect of the built and natural environment on millimetric radio waves, Ordnance Survey 2018, pour le Department of Digital, Culture, Media and Sport février 2018 rapport final. Disponible à l'adresse suivante : <http://bit.ly/Arbres..5G>.
114. U.S. NWTT. Entraînement et essais du nord-ouest de la marine (NWTT 2021) ; 2021. Disponible sur : <https://nwtties.com/>.
115. Jamail D. La marine prévoit des jeux de guerre électromagnétiques au-dessus d'un parc national et d'une forêt dans l'Etat de Washington ; 2014. Disponible sur : <http://www.truth-out.org/news/item/27339-navy-plans-electromagnetic-war-games-over-national-park-and-forest-in-washington-state>.
116. Jamail D. Des documents montrent que l'entraînement à la guerre électromagnétique de la marine nuirait aux humains et à la faune ; 2014. Disponible à l'adresse : <http://www.truth-out.org/news/item/28009-documents-show-navy-s-electromagnetic-warfare-training-would-harm-humans-and-wildlife>.
117. Oiseaux vulnérables de la voie de migration du Pacifique ; 2021. Formulaire disponible : <https://www.audubon.org/climate/survivalbydegrees/flyway/pacific>.
118. O'Rourke M. Leçons de calme depuis l'un des endroits les plus tranquilles de la planète, dans la nature sauvage de la forêt tropicale de Hoh, dans l'Etat de Washington, un poète recherche la paix rare que le vrai silence peut offrir. *New York Times Magazine*, numéro consacré aux voyages ; 2017. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.nytimes.com/2017/11/08/t-magazine/hoh-rain-forest-quietest-place.html>.
119. Hempton G. Un pouce carré, un sanctuaire pour le silence au parc national olympique ; 2018. Disponible sur : <http://onesquareinch.org/>.
120. Association pour la conservation des parcs nationaux (NPCA). New studies find navy growler jet noise around Olympic National Park harmful to humans and orcas ; 2020. Disponible sur : <https://www.npca.org/articles/2776-new-studies-find-navy-growler-jet-noise-around-olympic-national-park>.
121. Entraînement et test du nord-ouest de la marine américaine (NWTT). Mise à jour pour : Olympic Coast National Marine Sanctuary (OCNMS) Advisory Council, 20 janvier 2017, John Mosher, flotte américaine du Pacifique, Dawn Grebner, Naval Undersea Warfare Center, Keyport, Jackie Queen, Naval Facilities Engineering Command NW ; 2017. Disponible sur : <https://nmsolympiccoast.blob.core.windows.net/olympiccoast-prod/media/archive/involved/sac/nwtt..update-for-ocnms..advisory..council-20jan2017b.pdf>.
122. U.S. Navy Northwest Training & Testing (NWTT). U.S. Navy Northwest Training and Testing (NWTT) 2017a. Public scoping summary report, Northwest Training and testing supplemental environmental impact statement/overseas environmental impact statement, Final 14 décembre 2017 ; 2017. Disponible sur

- à partir de : https://nwtteis.com/portals/nwtteis/files/public_information/NWTT_SEIS_OEIS-Scoping_Summary_Report.pdf.
123. Formation et essais dans le nord-ouest de la marine américaine (NWTTEIS). Déclaration d'impact environnemental supplémentaire/déclaration d'impact environnemental en mer (EIS/OEIS) ; 2017. Disponible sur : <https://www.nwtteis.com/FAQs>.
124. Formation et essais dans le nord-ouest de la marine américaine (NWTTEIS). Projet d'évaluation environnementale pour l'entraînement des opérations spéciales de la marine dans l'ouest de l'État de Washington, janvier 2018 ; 2018.
125. Formation et essais de la marine américaine du Nord-Ouest ; 2018. Disponible sur : <http://nwtteis.com/SearchResults.aspx?Search=Northwest+Electromagnetic+Radiation+Warfare+program>.
126. Service des poissons et de la faune sauvage des États-Unis. Activités de formation et d'essai de la Marine dans le Nord-Ouest au large des eaux de la Californie du Nord, de l'Oregon et de Washington, des eaux intérieures de puget sound et de certaines parties de la péninsule olympique ; 2016. Disponible sur : https://nwtteis.com/portals/nwtteis/files/2015-2016/NWTT_Final_USFWS_Biological_Opinion_7-21-2016.pdf.
127. Service des poissons et de la faune des États-Unis. Ibid 10.4.7.2.1.1, tableau 47, pp. 228 (Mosher, pers comm 2015 ; Navy 2014) ; 2016.
128. Sierra Club (groupe North Olympic). Lettre à : EA 18G EIS Project Manager, Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC) Atlantic, Attn : Code EV21/SS, 6506 Hampton Blvd., Norfolk, VA 23508, Re : Projet d'EIS pour les opérations d'aérodrome des growlers EA-18G à la station aérienne navale (NAS) Whidbey Island ; 2017. Disponible sur : <https://www.sierraclub.org/sites/www.sierraclub.org/files/sce/north-olympic-group/NOG%20letter%20re%20Growler%20Draft%20EIS%202-18-17.pdf>.
129. Comité d'interaction aviaire avec les lignes électriques (APLIC). Réduire les collisions aviaires avec les lignes électriques : l'état de l'art en 2012. Washington, DC : Edison Electric Institute et APLIC ; 2012:159 p.
130. Washburn BE. Des outils de suivi performants permettent de réduire les conflits entre rapaces. Wildl Prof 2015;9:34-7.
131. Jamail D. Les courriels révèlent l'intention de la marine d'enfreindre la loi, menaçant la faune et la flore en danger. Truthout, lundi. Disponible sur : <http://www.truth-out.org/news/item/35954-exclusive-emails-reveal-navy-s-intent-to-break-law-threatening-endangered-wildlife>.
132. Résumé de la loi sur la politique environnementale nationale 42 U.S.C. §4321 et seq. ; 1969. Disponible sur : <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-national-environmental-policy-act>.
133. Formation et essais de la marine américaine dans le nord-ouest. Final supplemental EIS/OEIS. NWTT supplemental EIS/OEIS/documents/2020, northwest training and testing final supplemental EIS/OEIS/ final supplemental EIS/OEIS ; 2020.
134. Save the Olympic Peninsula (SOP). Les jets de la marine tentent une manœuvre d'évitement autour de NEPA ; 2016. Disponible sur : <http://www.savetheolympicpeninsula.org/assets/update-navy-jets-attempt-evasive-maneuver.pdf>.
135. Save the Olympic Peninsula (SOP). Une fois de plus - nous devons nous opposer à l'entraînement militaire dans les parcs de l'État de Washington ; 2016. Disponible sur : <http://www.savetheolympicpeninsula.org/>.
136. Sierra Club (groupe North Olympic). Entraînement de guerre de la marine sur la péninsule olympique ; 2017. Disponible sur : <https://www.sierraclub.org/washington/north-olympic/navy-warfare-training-olympic-peninsula>.
137. Formation et essais de la marine américaine dans le nord-ouest. Final supplemental EIS/OEIS. NWTT supplemental EIS/OEIS/documents/2020, northwest training and testing final supplemental EIS/OEIS/
- EIS/OEIS supplémentaire final 3.6.2.3.2 à 3.6.2.3.3.2, pp. 3.6-9 à 3.6.7.1 ; 2020.
138. U.S. Fish and Wildlife Service. Activités de formation et d'essai de la marine dans le nord-ouest au large des eaux du nord de la Californie, de l'Oregon et de Washington, des eaux intérieures de Puget sound et de certaines parties de la péninsule olympique, 10.4.7.2.1.3., pp. 231 ; 2016. Disponible sur : https://nwtteis.com/portals/nwtteis/files/2015-2016/NWTT_Final_USFWS_Biological_Opinion_7-21-2016.pdf.
139. U.S. Fish and Wildlife Service. Endangered species act - section 7 consultation, biological opinion, navy's northwest training and testing activities offshore waters of Northern California, Oregon, and Washington, the inland waters of puget sound, and portions of the Olympic Peninsula, référence U.S. Fish and Wildlife Service : 01EWFW00-2015-F-0251-R001; 2018. Disponible sur : https://www.nwtteis.com/portals/nwtteis/files/2015-2016/U.S._Fish_and_Wildlife_Service_Reinitiated_Biological_Opinion_for_NWTT_Activities_%28Dec_2018%29.pdf.
140. Karam MA, Fung K, Antar YMM. Electromagnetic wave scattering from some vegetation samples. IEEE Trans Geosci Rem Sens 1988;26:799-807.
141. Karam MA, Fung AK, Amar F. Electromagnetic wave scattering from a forest or vegetation canopy : ongoing research at the University of Texas at Arlington. IEEE Antenn Propag Mag 1993 ; 35:18-26.
142. Pall ML. Les champs électromagnétiques agissent via l'activation des canaux calciques voltage-gated pour produire des effets bénéfiques ou néfastes. J Cell Mol Med 2013;17:958-65.
143. Steiner I, Bruderer B. Anfangsorientierung und Heimkehrverhalten von Brieftauben unter dem Einfluss von Kurzwellen. J Ornithol 1999;140:34-41.
144. Bruderer B, Peter D, Steuri T. Behavior of migrating birds exposed to X-band radar and a brightlight beam. J Exp Biol 1999 ; 202:1015-22.
145. Wasserman FE, Dowd C, Schlinger BA, Byman D, Battista SP, Kunz TH. The effects of microwave radiation on avian dominance behavior. Bioelectromagnetics 1984;5:331-9.
146. Grigor'ev I. Biological effects of mobile phone electromagnetic field on chick embryo (risk assessment using the mortality rate). Radiat Biol Radioecol 2003;43:541-3.
147. Xenos TD, Magras LN. Effets du rayonnement RF à faible densité de puissance sur les embryons et les foetus d'animaux de laboratoire. In : Stavroulakis P, éditeur. Biological effects of electromagnetic fields. New York, NY, USA : Springer ; 2003:579-602 pp.
148. Kuehne LM, Erbe C, Ashe E, Bogaard LT, Collins MS, Williams R. Above and below : Le bruit des avions militaires dans l'air et sous l'eau à Whidbey Island, Washington. J Mar Sci Eng 2020;8:923.
149. NBC News. Des réfrigérateurs intelligents piratés pour envoyer des spams : rapport, 18 janvier 2014/4:46 PM ET/Updated Jan.18.2014/5:20 PM ET. Disponible sur : <https://www.nbcnews.com/tech/internet/smart-refrigerators-hacked-send-out-spam-report-n11946>.
150. Bureau de la responsabilité du gouvernement américain (GAO). Déploiement de la 5G, la FCC a besoin d'une planification stratégique complète pour guider ses efforts, GAO-20-468 : Publié : 12 juin 2020. Publiée : 12 juin 2020 : 29 juin 2020 ; 2020. Disponible sur : <https://www.gao.gov/products/GAO-20-468>.
151. Levitt BB. Fibre haut débit et petites cellules : une alliance municipale impie, Counterpunch ; 2019. Disponible sur : <https://www.levittbb.com/>.

- counterpunch.org/2019/05/13/fiber-broadband-and-small-cells-an-unholy-municipal-alliance/.
152. Pai A. Déclaration du président Ajit Pai, Commission fédérale des communications, audition sur la surveillance de la Commission fédérale des communications, devant le Comité américain du commerce, des sciences et des transports. Washington, D.C. ; 2018.
153. Pai A. Remarques du président de la FCC Ajit Pai lors du webinaire du Conseil américain de la technologie et du Conseil consultatif de l'industrie (ACT-IAC) sur "5G : l'avenir de la connectivité et du commerce numériques" ; 2020. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.fcc.gov/document/pai-act-iac-webinar-5g-future-digital-connectivity>.
154. Dinucci M. 5G, la nouvelle piste de la course aux armements. Recherche mondiale ; 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.globalresearch.ca/5g-arms-race/5715138>.
155. Déclaration de Jessica Rosenworcel, Commissaire, Commission fédérale des communications. Audience sur la surveillance de la Commission fédérale des communications devant le Comité américain du commerce, des sciences et des transports. Washington, D.C. ; 2018.
156. Leszczynski D. Une action collective contre le déploiement de la 5G en Australie ; 2018. Disponible sur : <https://www.emfacts.com/2018/07/a-class-action-against-5g-deployment-in-australia/>.
157. Hardell L, Nyberg R. Commentaire : appels qui comptent ou non sur un moratoire sur le déploiement de la cinquième génération, 5G, pour les micro-ondes. Mol Clin Oncol 2020;12:247-57.
158. Seipel T. Californie : Le gouverneur Jerry Brown oppose son veto à un projet de loi assouplissant les permis sur les tours de téléphonie cellulaire. The Mercury News ; 2017. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.mercurynews.com/2017/10/16/california-gov-jerry-brown-vetoes-bill-easing-permits-on-cell-phone-towers/>.
159. Erwin DN, Hurt WD. Évaluation des dangers possibles associés aux applications des systèmes à ondes millimétriques. Revue aéromédicale USAF-SAM 2-81. USAF School of Aerospace Medicine, Aerospace Medical Division, Brooks AFB, TX 1981.
160. Gandhi O, Riazi A. Absorption of millimeter waves by human beings and its biological implications. IEEE Trans Microw Theor Tech 1986;34:228-35.
161. Marshall TG, Rumann Heil TJ. Electrosomog et maladies auto-immunes. Immunol Res 2017;65:129-35.
162. Joint Intermediate Force Capabilities Office, U.S. Department of Defense Non-Lethal Weapons Program, Fact Sheets ; 2020. Disponible sur : <https://jnlwp.defense.gov/Press-Room/Fact-Sheets/Article-View-Fact-sheets/Article/577989/active-denial-technology/>.
163. Jauchem J. Bibliographie de la Radio Frequency Radiation Branch, Directed Energy Bioeffects Division, Human Effectiveness Directorate, Air Force Research Laboratory : 1997-2003 ; 2004. Disponible à l'adresse suivante : https://www.researchgate.net/publication/235019072_Bibliography_of_the_Radio_Frequency_Radiation_Branch_Directed_Energy_Bioeffects_Division_Human_Effectiveness_Directorate_Air_Force_Research_Laboratory_1997-2003.
164. Le DARPA cherche à améliorer les communications militaires avec des réseaux phasés numériques à ondes millimétriques. Le nouveau programme vise à créer une technologie de réseaux phasés numériques à faisceaux multiples, fonctionnant à 18-50 GHz, afin d'améliorer les communications sécurisées entre les plateformes militaires. Disponible sur : <https://www.darpa.mil/news-events/2018-01-24>.
165. Kenney JM, Ziskin M, Adair RA, Murray B, Farrer D, Marks L, et al. Résumé narratif et évaluation indépendante du système de déni actif. The Human Effects Advisory Panel (HEAP), Penn State Applied Research Lab, 11 février 2008. Soumis en exécution du contrat USMC n°. M67854-05-D-5153-0007, Joint Non-Lethal Weapons Directorate, U.S. Department of Defense, pp. 23-26 ; 2008. Disponible sur : https://jnlwp.defense.gov/Portals/50/Documents/Future_Non-Lethal_Weapons/HEAP.pdf.
166. Malyaso D. L'armée de l'air américaine va dépenser 31 millions de dollars pour la recherche sur les " bioeffets " des armes à énergie dirigée, Defense Blog ; 2019. Disponible sur : <https://defence-blog.com/news/u-s-air-force-to-spend-31million-for-research-bioeffects-of-directed-energy-weapons.html>.
167. TASS. Agence de presse russe Des experts confirment l'état de préparation technique pour l'étude des effets de la 5G sur les habitants de Moscou. L'étude prévue doit révéler, quel niveau de radiation de différentes normes est sans danger pour les humains 8 Jul, 2020 10:58 ; 2020. Disponible sur : <https://tass.com/society/1176193>.
168. Bushberg JT, Chou CK, Foster KR, Kavet R, Maxson DP, Tell RA, et al. IEEE committee on man and radiation-comar technical information statement : health and safety issues concerning exposure of the general public to electromagnetic energy from 5G wireless communications networks. Health Phys 2020;119 : 236-46.
169. Bose JC. Sur la détermination de la longueur d'onde du rayonnement électrique par un réseau de diffraction. Proc Roy Soc Lond 1897;60 : 167-78.
170. Bose JC. On the change of conductivity of metallic particles under cyclic electromotive variation. In : Bose JC, éditeur. Originellement présenté à la British Association à Glasgow, septembre 1901, reproduit dans collected physical papers. New York, N.Y. : Longmans, Green and Co. 1927.
171. Emerson DT. Le travail de Jagadis Chandra Bose : 100 years of millimeter-wave research. IEEE Trans Microw Theor Tech 1997 ; 45:2267-73.
172. Pakhomov AG, Akyel Y, Pakhomova ON, Stuck BE, Murphy MR. Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves : a review of the literature. Bioelectromagnetics 1998;19:393-413.
173. Golant MB. Problème de l'action de résonance des radiations électromagnétiques cohérentes de la gamme des ondes millimétriques sur les organismes vivants. Biophysique 1989;34:370-82.
174. Golant MB. Effet de résonance des ondes électromagnétiques cohérentes en bande millimétrique sur les organismes vivants. Biofizika 1989;34 : 1004-14 (en russe). Traduction anglaise : Biophysics 1989;34 : 1086-98.
175. Betskii OV. Utilisation des ondes électromagnétiques millimétriques de faible intensité en médecine. Millimetrovye Volni v Biologii i Medecine 1992;1:5-12 (en russe).
176. Betskii OV, Devyatkov ND, Kislov VV. Les ondes millimétriques de faible intensité en médecine et en biologie. Crit Rev Biomed Eng 2000;28 : 247-68.
177. Berezhinskii LL, Gridina NI, Dovbeshko GI, Lisitsa MP, Litvinov GS. Visualisation des effets des radiations millimétriques sur les radiations électromagnétiques à très haute fréquence sur la fonction plasma sanguin. Biofizika 1993;38 : 378-84 (en russe).

178. Fesenko EE, Gluvstein AY. Changes in the state of water induced by radiofrequency electromagnetic fields. *FEBS Lett* 1995;367 : 53-5.
179. Khizhnyak EP, Ziskin MC. Temperature oscillations in liquid media caused by continuous (nonmodulated) millimeter wavelength electromagnetic irradiation. *Bioelectromagnetics* 1996;17:223-9.
180. Kudryashova VA, Zavizion VA, Khurgin YV. Effets de la stabilisation et de la destruction de la structure de l'eau par les acides aminés. In : Moscou, Russie : 10e symposium russe "ondes millimétriques en médecine et en biologie" (Digest of papers). Moscou : IRE RAN ; 1995:213-5 pp. (en russe).
181. Litvinov GS, Gridina NY, Dovbeshko GI, Berezhinsky LI, Lisitsa MP. Millimeter wave effect on blood plasma solution. *Electro-Magnetobiol* 1994;13:167-74.
182. Zavizion VA, Kudriashova VA, Khurgin YI. Effet des acides alpha-aminés sur l'interaction du rayonnement à ondes millimétriques avec l'eau. *Millimetetrovye Volni v Biologii i Meditsine* 1994;3:46-52 (en russe).
183. Ryakovskaya ML, Shtemler VM. Absorption des ondes électromagnétiques de la gamme millimétrique dans les préparations biologiques avec une structure en couches planes. In : Devyatkov ND, éditeur. *Effet de l'action non thermique du rayonnement millimétrique sur les sujets biologiques*. Moscow : Académie des Sciences de l'URSS ; 1983:172-81 pp. (en russe).
184. Pakhomov A, Murphy MR. Un examen complet de la recherche sur les effets biologiques des radiations de radiofréquence pulsée en Russie et dans l'ancienne Union soviétique. Dans : Lin J, éditeur. *Advances in electromagnetic fields in living systems*. Plenum : Kluwer Academic Press ; 2000, vol 3:265-90 pp.
185. Yanenko OP, Peregudov SN, Fedotova IV, Golovchanska OD. Équipements et technologies de la thérapie millimétrique de faible intensité ; 2014. Numéro 59 103ISSN 621.317 (en russe). Disponible sur : <https://cyberleninka.ru/article/n/equipment-and-technologies-of-low-intensity-millimeter-therapy>.
186. Betzalel N, Feldman Y, Ishai B. La modélisation de l'absorbance du rayonnement sub-THz par la peau humaine. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol* 2018;7:521-8.
187. Cosenzino K, Beneduci A, Ramundo-Orlando A, Chidichimo G. L'influence des ondes millimétriques sur les propriétés physiques des vésicules unilamellaires grandes et géantes. *J Biol Phys* 2013;39 : 395-410.
188. Betzalel N, Ishai P, Feldman Y. La peau humaine en tant que récepteur sub-THz - la 5G représente-t-elle un danger pour elle ou non ? *Environ Res* 2018 ; 163:208-16.
189. Betskii OV, Lebedeva NN. Low-intensity millimeter waves in biology and medicine, access through ; 2000. Disponible sur : <https://stopsmartmetersbc.com/wp-content/uploads/2020/07/Low-intensity-Millimeter-Waves-in-Biology-and-Medicine-by-O.V.-Betskii-and-N.N.-Lebedeva-Moscow-Russia-2000.pdf>.
190. Thielens A, Bell D, Mortimore DB, Greco MK, Martens L, Joseph W. Exposition d'insectes à des champs électromagnétiques de radiofréquences de 2 à 120 GHz. *Sci Rep* 2018;8:3924.
191. Thielens A, Greco MK, Verloock L, Martens L, Joseph W. Exposition des abeilles domestiques occidentales aux champs électromagnétiques de radiofréquence. *Sci Rep* 2020;10:461.
192. Frohlich H. The biological effects of microwaves and related questions. *Adv Electron Electron Phys* 1980;53:85-152.
193. Frohlich H, éditeur. *Cohérence biologique et réponse aux stimuli externes*. Berlin : Springer-Verlag ; 1988:265 p.
194. Gandhi OP. Some basic properties of biological tissues for potential biomedical applications of millimeter-waves. *J Microw Power* 1983;18:295-304.
195. Grundler W. Effets biologiques de l'énergie RF et MW au niveau moléculaire et cellulaire. In : Rindi A, Grandolfo M, Michaelson SM, éditeurs. *Biological effects and dosimetry of radiation. Energies de radiofréquence et de micro-ondes*. New York : Plenum Press ; 1983:299-318 pp.
196. Postow E, Swicord ML. Champs modulés et effets de "fenêtre". Dans : Polk C, Postow E, éditeurs. *Handbook of biological effects of electromagnetic fields*. Boca Raton, FL : CRC Press, Inc ; 1986 : 425-60 pp.
197. Grundler W, Keilman F, Froehlich H. Resonant growth rate response of yeast cells irradiated by weak microwaves. *Phys Lett* 1977;62A:463-6.
198. Grundler W, Keilman F, Putterlik V, Strube D. Resonant-like dependence of yeast growth rate on microwave frequencies. *Br J Canc* 1982;45:206-8.
199. Grundler W, Jentzsch U, Keilmann F, Putterlik V. Resonant cellular effects of low intensity microwave. In : Froehlich H, éditeur. *Biological coherence and response to external stimuli*. Berlin : Springer-Verlag ; 1988:65-85 pp.
200. Golant MB, Kuznetsov AP, Boszhanova TP. Mécanismes de synchronisation de la culture de cellules de levure par l'action du rayonnement EHF. *Biofizika* 1994;39:490-5 (en russe).
201. Pakhomova ON, Pakhomov AG, Akyel Y. Effect of millimeter waves on UV-induced recombination and mutagenesis in yeast. *Bioelectrochem Bioenerg* 1997;43 : 227-32.
202. Dardanoni L, Torregrossa MV, Zanforlin L. Millimeter wave effects on *Candida albicans* cells. *J Bioelectr* 1985;4:171-6.
203. Shestopalova NG, Makarenko BI, Golovina LN, Timoshenko YP, Baeva TI, Vinokurova LV, et al. Modification de l'effet synchronisant des ondes millimétriques sur les premières mitoses par différents régimes de température de germination. Dans : Moscow, Russia : 10th Russian symposium "millimeter waves in medicine and biology" April, 1995 (Digest of papers). Moscou : IRE RAN ; 1995 : 236-7 pp. (en russe).
204. Levina MZ, Veselago IA, Belya TI, Gapochka LD, Mantrova GM, Yakovleva MN. Influence de l'irradiation VHF de faible intensité sur la croissance et le développement des cultures de protozoaires. In : Devyatkov ND, éditeur. *Millimeter waves in medicine and biology*. Moscow : Radioelectronica ; 1989:189-95 pp. (en russe).
205. Tambiev AK, Kirikova NN, Lapshin OM, Betzkii OV, Novskova TA, Nechaev VM, et al. The combined effect of exposure to EMF of millimeter and centimeter wavelength ranges on productivity of microalgae. In : Devyatkov ND, éditeur. *Millimeter waves in medicine and biology*. Moscow : Radioelectronica ; 1989:183-8 pp. (en russe).
206. Kremer F, Santo L, Poglitsh A, Koschnitzke C, Behrens H, Genzel L. The influence of low intensity millimetre waves on biological systems. In : Froehlich H, éditeur. *Cohérence biologique et réponse aux stimuli externes*. Berlin : Springer-Verlag ; 1988 : 86-101 pp.
207. Rojavin MA, Ziskin MC. Application médicale des ondes millimétriques. *Q J Med* 1998;91:57-66.
208. Brovkovich VM, Kurilo NB, Barishpol's VL. Action of millimeter-range electromagnetic radiation on the Ca pump of sarcoplasmic reticulum. *Radiobiologija* 1991;31:268-71 (en russe).

209. Burachas G, Mascoliunas R. Suppression du potentiel d'action nerveux sous l'effet des ondes millimétriques. In : Devyatkov ND, éditeur. *Millimeter waves in medicine and biology*. Moscow : Radioelectronics ; 1989:168-75 pp. (en russe).
210. Chernyakov GM, Korochkin VL, Babenko AP, Bigdai EV. Réactions des systèmes biologiques de complexité diverse à l'action du rayonnement EHF de faible niveau. In : Devyatkov ND, éditeur. *Millimeter waves in medicine and biology*. Moscow : Radioelectronics ; 1989:141-67 pp. (en russe).
211. Pakhomov AG, Prol HK, Mathur SP, Akyel Y, Campbell CBG. Search for frequency-specific effects of millimeter-wave radiation on isolated nerve function. *Bioelectromagnetics* 1997 ; 18:324-34.
212. Pakhomov AG, Prol HK, Mathur SP, Akyel Y, Campbell CBG. Effets spécifiques de fréquence du rayonnement électromagnétique de longueur d'onde millimétrique dans un nerf isolé. *Electro-Magnetobiol* 1997;16:43-57.
213. Pakhomov AG, Prol HK, Mathur SP, Akyel Y, Campbell CBG. Role of field intensity in the biological effectiveness of millimeter waves at a resonance frequency. *Bioelectrochem Bioenerg* 1997;43:27-33.
214. Bulgakova VG, Grushina VA, Orlova TL, Petrykina ZM, Polin AN, Noks PP, et al. Effect of millimeter-band radiation of nonthermal intensity on the sensitivity of *Staphylococcus* to various antibiotics. *Biofizika* 1996;41:1289-93 (en russe).
215. Akoev GN, Avelev VD, Semen'kov PG. Perception du rayonnement électromagnétique millimétrique de faible niveau par les électrorécepteurs du rayon. *Dokl Akad Nauk* 1992;322:791-4 (en russe).
216. Potekhina IL, Akoyev GN, Yenin LD, Oleyner VD. Effets des radiations électromagnétiques de faible intensité dans la gamme millimétrique sur le système cardio-vasculaire du rat blanc. *Fiziol Zh* 1992;78 : 35-41 (en russe).
217. Kholodov YA. Problèmes fondamentaux de la biologie électromagnétique. Dans : Markov M, Blank M, éditeurs. *Champs électromagnétiques et biomembranes*. Boston, MA : Springer ; 1988:109-16 pp.
218. Markov M, Blank M, éditeurs. *Champs électromagnétiques et biomembranes*. Boston, MA : Springer-Verlag US ; 1988.
219. Levedeva NN. Mécanismes neurophysiologiques des effets biologiques de l'action périphérique des champs électromagnétiques non ionisants de faible intensité chez l'homme. Dans : Moscou, Russie : 10e symposium russe "ondes millimétriques en médecine et en biologie" (Digest of papers). Moscou : IRE RAN ; 1995:138-40 pp. (en russe).
220. Kolbun ND, Lobarev VE. Bioinformation interactions : EMF-waves. *Kibern Vychislitel'naya Tekhnika* 1988;78:94-9.
221. Betskii OV. On the mechanisms of interaction of low-intensity millimeter waves with biological objects. *Radiophys Quantum Electron* 1994;37:16-22.
222. Betskii OV, Putvinskii AV. Action biologique du rayonnement de faible intensité de la bande millimétrique. *Izv Vyssh Uchebn Zaved Radioelektron* 1986;29:4 (en russe).
223. Chukova YP. Fonctions dissipatives des processus d'interaction du rayonnement électromagnétique avec les objets biologiques. *Biophysique* 1989;34:975-8.
224. Devyatkov ND, Goland MB. Nature informative des effets non thermiques et de certains effets énergétiques des ondes électromagnétiques sur un organisme vivant. *Pis'ma Zh Tekh Fiz* 1982;8 : 39-41.
225. Devyatkov ND, Goland MB, Trager AC. Role of synchronization in the impact of weak electromagnetic signals in the millimeter wave range on living organisms. *Biophysics* 1983;28:953-4.
226. Golant MB, Poruchikov PV. Rôle des ondes cohérentes dans la reconnaissance des formes et l'utilisation des informations intracellulaires. *Pis'ma Zh Tekh Fiz* 1989;15:67-70.
227. Golant MB, Rebrova TB. Similitudes entre les organismes vivants et certains appareils à micro-ondes. *Izv Vyssh Uchebn Zaved Radioelektron* 1986;29:10-19.
228. Ramundo-Orlando A. Effets du rayonnement des ondes millimétriques sur la membrane cellulaire - un bref examen. *J Infrared, Millim Terahertz Waves* 2010;31:1400-11.
229. Simkó M, Mattsson MO. Communication sans fil 5G et effets sur la santé - une revue pragmatique basée sur les études disponibles concernant 6-100 GHz. *Int J Environ Res Publ Health* 2019;16 : 3406.
230. Alekseev SL, Ziskin MC. Effets biologiques des ondes millimétriques et submillimétriques. In : Greenebaum B, Barnes F, éditeurs. *Handbook of biological effects of electromagnetic fields*, 4th ed. Boca Raton, FL : CRC Press ; 2019, Chapitre 6:179-242 pp.
231. Siegel PH, Pikov V. Impact of low intensity millimetre waves on cell functions. *Electron Lett* 2010;46:70-2.
232. Albanese RA. Le rayonnement des réseaux phasés est-il une catégorie distincte qui nécessite des tests de sécurité ? Article non publié soumis à la revue Air Force, sept. 2000.
233. Albanese R. Pourquoi un médecin du Texas s'inquiète-t-il du système radar PAVE PAWS à Cape Cod ? *Cape Cod Times*, Lettre à l'éditeur, 27 janvier 2002.
234. Erdreich L, Gandhi OP, Lai H, Ziskin MC. Assessment of public health concerns associated with PAVE PAWS radar installations. Rapport préparé pour le ministère de la Santé publique du Massachusetts ; 1999. Disponible à l'adresse : https://www.globalsecurity.org/space/library/report/1999/cape-cod_pavepaws-assess.htm.
235. Moulder J, Rockwell S. Critiquer les théories non publiées. *Radiat Res* 2003;159:1-2.
236. Albanese R, Penn J, Medina R. Short-rise-time microwave pulse propagation through dispersive biological media. *J Opt Soc Am A* 1989;6:1441-6.
237. Albanese RA, Penn JW, Medina RL. Un problème électromagnétique inverse dans le domaine médical. In : Coronas JP, Nelson P, Kristensson editor G, éditeurs. *Invariant imbedding and inverse problems*. Philadelphie : Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) ; 1992:30-41 pp.
238. Albanese R, Penn J, Medina R. Ultrashort pulse response in nonlinear dispersive media. In : Bertoni HL, Carin L, Felsen LB, éditeurs. *Ultra-wideband, short-pulse electromagnetics*. New York, NY, USA : Plenum Publishing ; 1993:259-65 pp.
239. Albanese R, Blaschak J, Medina R, Penn J. Ultrashort electromagnetic signals : biophysical questions, safety issues, and medical opportunities. *Aviat Space Environ Med* 1994 ; 65(Suppl):A116-20.
240. Albanese RA, Medina RL, Penn JW. Mathématiques, médecine et micro-ondes. *Inverse Probl* 1994;10:995-1007.
241. Moten K, Durney CH, Stockham TG. Propagation des impulsions électromagnétiques dans les diélectriques planaires dispersifs. *Bioelectromagnetics* 1989;10:35-49.
242. Oughstun KE, Sherman GC. Electromagnetic pulse propagation in causal dielectrics, Springer series on wave phenomena. Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag ; 1994, vol 16.

243. Hill K. Transition vers un monde 5G. RCR wireless ; 2017. Disponible à l'adresse [suivante](http://bit.ly/5Ghype) : <http://bit.ly/5Ghype>.
244. Conseil national de la recherche. Une évaluation des effets potentiels sur la santé de l'exposition à l'énergie de radiofréquence à réseau phasé de faible niveau PAVE PAWS. National Research Council ; 2005:68-93 pp.
245. Blaschak JG, Franzen J. Precursor propagation in dispersive media from short-rise-time pulses at oblique incidence. *J Opt Soc Am A* 1995;12:1501-12.
246. Oughstun KE. Noninstantaneous, finite rise-time effects on the precursor field formation in linear dispersive pulse propagation. *J Opt Soc Am A* 1995;12:1715-29.
247. Oughstun KE. Dynamical evolution of the Brillouin precursor in the Rocard-Powles-Debye model dielectrics. *IEEE Trans Antenn Propag* 2005;53:1582-90.
248. Oughstun K. Electromagnetic and optical pulse propagation 1 : temporal pulse dynamics in dispersive, attenuative media. New York, NY, USA : Springer International Publishing ; 2006.
249. Palombini C, Oughstun K. Reflection and transmission of pulsed electromagnetic fields through multilayered biological media. In : Proceedings - 2011 international conference on electromagnetics in advanced applications, ICEAA'11 ; 2011.
250. Xu X, Chen P. Étude sur la possibilité d'appliquer les ondes précurseurs à l'imagerie par pénétration. Dans : IEEE 2010 international conference on electromagnetics in advanced applications (ICEAA) - Sydney, Australie (2010.09.20-2010.09.24) ; 2010.
251. Sommerfeld A. Über die Fortpflanzung des Lichtes in dispergierenden medien. *Ann Phys* 1914;44:177-202. [Traduction anglaise disponible dans Brillouin, L, 1960 : A propos de la propagation de la lumière dans les milieux dispersifs. *Wave Propagation and Group Velocity*, Pure Appl Phys 1960;8:17-42].
252. Brillouin L. Über die Fortpflanzung des Lichtes in dispergierenden medien Ann Phys 1914;44:203-240. [Traduction anglaise disponible dans Brillouin L. About the propagation of light in dispersive media. *Wave Propagation and Group Velocity*, Pure Appl Phys 1960;8:43-83].
253. Plesko P, Palocz I. Experimental observation of the Sommerfeld and Brillouin precursors in the microwave domain. *Phys Rev Lett* 1969;22:1201-4.
254. Albanese RA. Problèmes inverses de propagation d'ondes en médecine et en santé environnementale. In : Chavent G, Sacks P, Papanicolaou G, Symes WW, éditeurs. *Inverse problems in wave propagation. The IMA volumes in mathematics and its applications*. New York, NY : Springer ; 1997, vol 90:1-11 pp.
255. Albanese RA, Bell EL. Radiofréquence et dynamique des réactions chimiques. In : Adey WR, Lawrence AF, éditeurs. *Nonlinear electrodynamics in biological systems*. New York, NY, USA : Plenum Publishing ; 1984:277-85 pp.
256. Albanese RA, Bell EL. Distorsion des impulsions électromagnétiques par un demi-espace. In : Abstracts of the seventh annual meeting of the bioelectromagnetics society ; 1985:40 p.
257. Rogers W. Extension de la courbe de durée de l'intensité de la stimulation par contact à impulsion unique jusqu'à 5 nanosecondes. Poster 116. Québec, Canada : Bioelectromagnetics Society ; 2002.
258. D'Ambrosio R, Massa M, Scarfi R, Zeni O. Cytogenetic damage in human lymphocytes following GMSK phase modulated microwave exposure. *Bioelectromagnetics* 2002;23:7-13.
259. Yamazaki S, Harata M, Ueno Y, Tsubouchi M, Konagaya K, Ogawa Y, et al. Propagation de l'énergie de l'irradiation THz à travers couches aqueuses : démolition des filaments d'actine dans les cellules vivantes. *Sci Rep* 2020;10:9008.
0. Haas H. Le LiFi est une technologie 5G qui change de paradigme. *Rev Phys* 2018;3:26-31.
1. Buck J. Le système de communication laser de la NASA établit un record de transmission de données vers et depuis la lune. NASA. Disponible sur : <http://www.nasa.gov/press/2013/october/nasa-laser-communication-system-sets-record-with-data-transmissions-to-and-from/#.UnayBpRAQcx>.
2. Riebeek H. Catalog of earth satellite orbits, NASA earth observatory ; 2009. Disponible à l'adresse : <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog>.
3. Commission fédérale des communications des États-Unis. Public notice : further guidance for broadcasters regarding radiofrequency radiation and the environment ; 1986. Disponible sur : <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-8507A1.pdf>.
4. O'Callaghan J. L'approbation par la FCC de la méga constellation Starlink de SpaceX peut avoir été illégale. *Scientific American Space* ; 2020. <https://www.scientificamerican.com/article/the-fccs-approval-of-spacexs-starlink-mega-constellation-may-have-been-unlawful/>.
5. Lehoucq R, Graner F. The costly collateral damage from Elon Musk's Starlink satellite fleet, *Phys.org* ; 2020. Disponible à l'adresse [suivante](https://phys.org/news/2020-05-costly-collateral-elonmusk-starlink-satellite.html) : <https://phys.org/news/2020-05-costly-collateral-elonmusk-starlink-satellite.html>.
6. Cao S. SpaceX Starlink tracker : tous les satellites lancés et comment les voir dans le ciel. *Observateur* 08/08/20 8:11 am ; 2020. Disponible à l'adresse : <https://observer.com/2020/08/spacex-starlink-satellite-launch-tracker-how-to-see-in-sky/>.
7. Commission fédérale des communications des États-Unis (FCC). Public notice, Federal Communications Commission, 445 12th street S.W.Washington D.C. 20554, news media information 202-4180500 internet : <http://www.fcc.gov> (or <ftp://ftp.fcc.gov>) TTY (202) 4182555 Wednesday March 18, 2020 Report No. SES-02250 re : actions taken satellite communications services information ; 2020. Disponible sur : https://licensing.fcc.gov/ibfsweb/ib_page.FetchPN?report_key=2225961.
8. Zafar R. SpaceX wins FCC approval to test Starlink ground stations in 6 states, WCCFTech ; 2020. Disponible sur : <https://wccftech.com/spacex-starlink-ground-stations-test/>.
9. Shields T. Amazon's kuiper satellite plan wins backing of FCC chair, bloomberg technology, July 10, 2020, 5:59 PM EDT Updated on July 10, 2020, 9:30 PM EDT ; 2020. Disponible sur : <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-07-10/amazon-s-kuiper-satellite-plan-wins-backing-of-fcc-chairman>.
10. Commission fédérale des communications des États-Unis. Bureau international FCC selected application listing BY file number report WR07 - wed aug 22 16:16:00 US/eastern 2018. Numéro de dossier = SATLOA2016111500118 ; 2018. Disponible sur : https://licensing.fcc.gov/cai-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.htm?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ_file_numberC/File+Number/%3D/SATLOA2016111500118&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ_file_numberC/File+Number&utm_content=bufferda647.
11. Erwin S. GAO flags concerns about procurement of DoD's early warning satellites, Space News ; 2020. Disponible sur : <https://spacenews.com/gao-flags-concerns-about-procurement-of-dods-early-warning-satellites/>.
12. Erwin S. SATELLITES : sur la sécurité nationale, la promesse et les périls des constellations LEO. Space News ; 2020. Disponible auprès de :

- <https://spacenews.com/the-promise-and-perils-of-leo-constellations/>.
260. Wattles J. SATELLITES : SpaceX et ULA remportent une compétition de lancement militaire d'une valeur de 653 millions de dollars - et ce n'est que le début. CNN Business, Mis à jour à 7:46 PM ET ; 2020. Disponible sur : <https://www.cnn.com/2020/08/07/tech/spacex-ula-military-national-security-contract-scn/index.html>.
261. Shepardson D. Un républicain clé du Sénat américain met en attente la nomination de la FCC au sujet de Ligado. Reuters U.S. 28 juillet 2020/3:48 PM ; 2020. Disponible sur : <https://www.reuters.com/article/us-usa-telecom-wireless-idUSKCN24T2QO>.
262. NRDC. Mémoire : Natural Resources Defense Council et al. as Amici Curiae in support of Petitioners, Envtl. Health Trust et al. v. FCC, D.C. Circuit Nos. 20-1025 20-1025, 20-1138 (5 août 2020) ; 2020. Disponible sur : <https://www.nrdc.org/sites/default/files/amicus-brief-fcc-20200805.pdf>.
263. Raghuram R, Bell TF, Helliwell RA, Katsufakis JP. A quiet band produced by VLF transmitter signals in the magnetosphere. *Geophys Res Lett* 1977;4:199-202.
264. Robinson TR, Yeoman TK, Dhillon RS. Environmental impact of high power density microwave beams on different atmospheric layers. Radio and Space Plasma Physics Group, Department of Physics and Astronomy, University of Leicester, Leicester LE1 7RH, UK. Numéro de contrat ESA : 18156/04/NL/MV ; 2004. Disponible sur : <http://www.esa.int/gsp/ACT/doc/ARI/ARI%20Study%20Report/ACT-RPT-NRG-ARI-04-9102-Environmental%20impacts%20of%20microwave%20beams-Report.pdf>.
265. Koh C. The benefits of 60 GHz unlicensed wireless communications. Commentaires déposés à la FCC ; 2004. Disponible sur : <https://www.fcc.gov/file/14379/download>.
266. Helliwell RA. Whistlers and related ionospheric phenomena. Mineola, N.Y. : Dover Publications ; 1965.
267. Ryan K. The fault in our stars : challenging the FCC's treatment of commercial satellites as categorically excluded from review under the national environmental policy act ; 2020. Disponible sur : www.jetlaw.org/wp-content/uploads/2020/05/22.4-Ryan.pdf.
268. Code des règlements fédéraux des États-Unis, Registre fédéral. § 1.1306 actions qui sont catégoriquement exclues du traitement environnemental, mis à jour le 19/08/2020 ; 2020. Disponible sur : <https://ecfr.federalregister.gov/current/title-47/chapitre-I/sous-chapitre-A/partie-1/sous-partie-I/section-1.1306>.
269. Foust J. Senators ask GAO to review FCC oversight of satellite constellations, Space News ; 2020. Disponible sur : <https://spacenews.com/senators-ask-gao-to-review-fcc-oversight-of-satellite-constellations/>.

Matériel supplémentaire : La version en ligne de cet article propose des documents supplémentaires (<https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0026>).