

## 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 2 : impacts : comment les espèces interagissent avec les CEM naturels et artificiels

<https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0050>

Reçu le 20 avril 2021 ; accepté le 26 mai 2021 ;  
publié en ligne le 8 juillet 2021.

**Résumé :** Les niveaux ambiants de champs électromagnétiques non ionisants (CEM) ont fortement augmenté au cours des cinq dernières décennies pour devenir un polluant environnemental omniprésent, continu et biologiquement actif, même dans les zones rurales et éloignées. De nombreuses espèces de flore et de faune, en raison de leur physiologie et de leur habitat uniques, sont sensibles aux CEM exogènes d'une manière qui dépasse la réactivité humaine. Cela peut conduire à des réactions endogènes complexes, très variables, en grande partie invisibles, qui peuvent contribuer à l'extinction d'espèces, parfois localisées. Les mécanismes de magnétoréception non humains sont explorés. De nombreuses études portant sur toutes les fréquences et tous les taxons indiquent que les CEM anthropiques actuels de faible niveau peuvent avoir une myriade d'effets négatifs et synergiques, notamment 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, ainsi que sur la vitalité, la longévité et la survie elles-mêmes. Des effets ont été observés chez des mammifères tels que les chauves-souris, les cervidés, les cétacés et les pinnipèdes, entre autres, ainsi que chez les oiseaux, les insectes, les amphibiens, les reptiles, les microbes et de nombreuses espèces de flore. Les effets cytotoxiques et génotoxiques observés depuis longtemps en laboratoire sur des modèles animaux peuvent être extrapolés à la faune sauvage. Des mécanismes multi-systèmes inhabituels peuvent entrer en jeu chez les espèces non humaines - y compris dans les environnements aquatiques - qui dépendent des champs géomagnétiques naturels de la Terre pour obtenir des informations essentielles au maintien de leur vie. La deuxième partie de cette série de trois articles comprend quatre tableaux supplémentaires en ligne sur les effets observés chez les animaux des ELF et des RFR, à l'adresse suivante

des intensités extrêmement faibles. Pris dans leur ensemble, ces éléments indiquent suffisamment d'informations pour susciter des inquiétudes quant aux expositions ambiantes aux rayonnements non ionisants au niveau des écosystèmes. La perte de faune et de flore est souvent invisible et non documentée jusqu'à ce que les points de basculement soient atteints. Il est temps de reconnaître les CEM ambiants 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. Les normes d'exposition chronique à long terme aux CEM de faible niveau, qui n'existent pas actuellement, devraient être fixées en conséquence pour la faune et la flore, et les lois environnementales devraient être strictement appliquées - un sujet exploré dans la troisième partie.

**Mots clés :** tours/mâts/stations de base de téléphonie cellulaire ; champs géomagnétiques de la Terre ; magnétoréception, rayonnement de radiofréquence (RFR) ; champs électromagnétiques non ionisants (CEM) ; plantes ; faune.

## Introduction : les champs électromagnétiques naturels et artificiels

Dans la première partie de cette série de trois articles, nous avons examiné l'augmentation des niveaux de CEM ambiants. La deuxième partie se concentre spécifiquement sur les physiologies de magnétoréception uniques que l'on trouve chez les animaux sauvages, ainsi que sur les mécanismes par lesquels ils interagissent avec les champs géomagnétiques naturels de la Terre et les CEM d'origine humaine à des intensités aujourd'hui courantes dans l'environnement. Les suppléments de la partie 2 contiennent des tableaux d'études montrant les effets d'expositions à des intensités extrêmement faibles, comparables aux niveaux ambiants actuels.

L'énergie fait partie de la nature et affecte tout être vivant de manière positive, négative ou neutre. La Terre elle-même est un aimant dipôle avec un pôle nord et un pôle sud. Tous les êtres vivants ont évolué dans le berceau protecteur des champs géomagnétiques naturels de la Terre. En fait, les oscillations magnétiques émanent du noyau de fer fondu de la Terre environ 10 fois par seconde (10 Hz), alors que les ondes cérébrales/pensées humaines détendues mais alertes se produisent entre 8 et 14 Hz.

Outre les émanations naturelles de la Terre, les vastes résonances de Schumann (SR) qui font constamment le tour du globe

\*Auteur correspondant : B. Blake Levitt, P.O. Box 2014, New Preston, CT, 06777, USA, E-mail : [blakelevitt2@gmail.com](mailto:blakelevitt2@gmail.com) et [blakelevitt@cs.com](mailto:blakelevitt@cs.com)  
Henry C. Lai, Département de bio-ingénierie, Université de Washington, Seattle, WA, USA, E-mail : [hlai@uw.edu](mailto:hilai@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, États-Unis,  
Courriel : [amanvil1@jhu.edu](mailto:amanvil1@jhu.edu)

ont été théorisés en 1952 par le physicien Windfried Otto Schumann et mesurés de manière fiable dans les années 1960 [1, 2]. Les SR sont un phénomène électromagnétique mondial causé par une relation complexe entre la foudre à la surface de la Terre et l'ionosphère. Excité par les 2 000 orages qui se produisent dans le monde à un moment donné et par environ 50 éclairs par seconde, l'espace entre la Terre et l'ionosphère située à 97 km au-dessus d'elle forme une cavité résonante et un guide d'ondes fermé [3]. Les résonances de Schumann se produisent dans les bandes ELF entre 3 et 60 Hz avec des pics fondamentaux distincts autour de 7,83 Hz. Depuis les années 1960, les scientifiques ont découvert que les variations des résonances correspondent aux changements saisonniers de l'activité solaire, de l'environnement magnétique de la Terre, des aérosols d'eau atmosphériques et de divers autres phénomènes terrestres, y compris l'augmentation de l'activité météorologique due au changement climatique. On estime à 1,2 milliard le nombre d'éclairs dans le monde chaque année, dont 25 millions pour les seuls États-Unis [4], et tous ne sont pas d'une longueur suffisante pour contribuer aux résonances.

On pense que de nombreux aspects comportementaux en biologie sont synchronisés avec les champs naturels de la Terre et les résonances de Schumann. De nombreuses espèces dépendent des champs naturels de la Terre pour leurs déplacements quotidiens, leurs migrations saisonnières, leur reproduction, leur recherche de nourriture et leur localisation territoriale, ainsi que pour leurs activités diurnes et nocturnes. Les rythmes circadiens humains, principalement régulés par la signalisation ciblée sur la lumière

dans le noyau hypothalamique suprachiasmatique, sont connues pour être finement ajustées aux cycles jour/nuit de la Terre ainsi qu'aux variations saisonnières naturelles, comme le sont la plupart des espèces [5-8]. On sait également que les CEM-ELF artificiels ont un effet négatif sur les horloges circadiennes humaines, peut-être par la modulation de l'expression des gènes de l'horloge circadienne elle-même [9].

Les champs électromagnétiques (CEM ; 0-300 GHz) non ionisants comprennent toutes les fréquences qui se situent entre la lumière visible, sous la gamme des ultraviolets, et les champs statiques naturels de la Terre. Les bandes non ionisantes sont utilisées dans pratiquement tout ce qui concerne les communications et la propagation de l'énergie, si utiles dans la vie moderne, y compris la production et la distribution d'électricité, toutes les technologies sans fil et l'infrastructure qui les accompagne pour les téléphones portables, le WiFi, les systèmes de surveillance des bébés et de la maison, les réseaux/compteurs "intelligents", toutes les technologies/appareils "intelligents", l'Internet des objets de 2 à 5G, la radio et la télévision AM/FM, les ondes courtes et la radio HAM, les systèmes de surveillance/sécurité, les satellites, les radars, de nombreuses applications militaires et une myriade d'outils de diagnostic médical comme les IRM, pour n'en citer que quelques-uns (voir la figure 1).

À l'état naturel, très peu de rayonnements radiofréquences (RFR) atteignent la surface de la Terre. Mis à part les champs magnétiques naturels de la Terre à courant continu (CC) et à fréquence extrêmement basse (ELF), la foudre et la lumière du soleil constituent les principaux éléments de notre exposition normale au spectre électromagnétique. La plupart des rayonnements nocifs provenant de l'espace sont bloqués par la magnétosphère de la Terre. Mais maintenant, pour la première fois

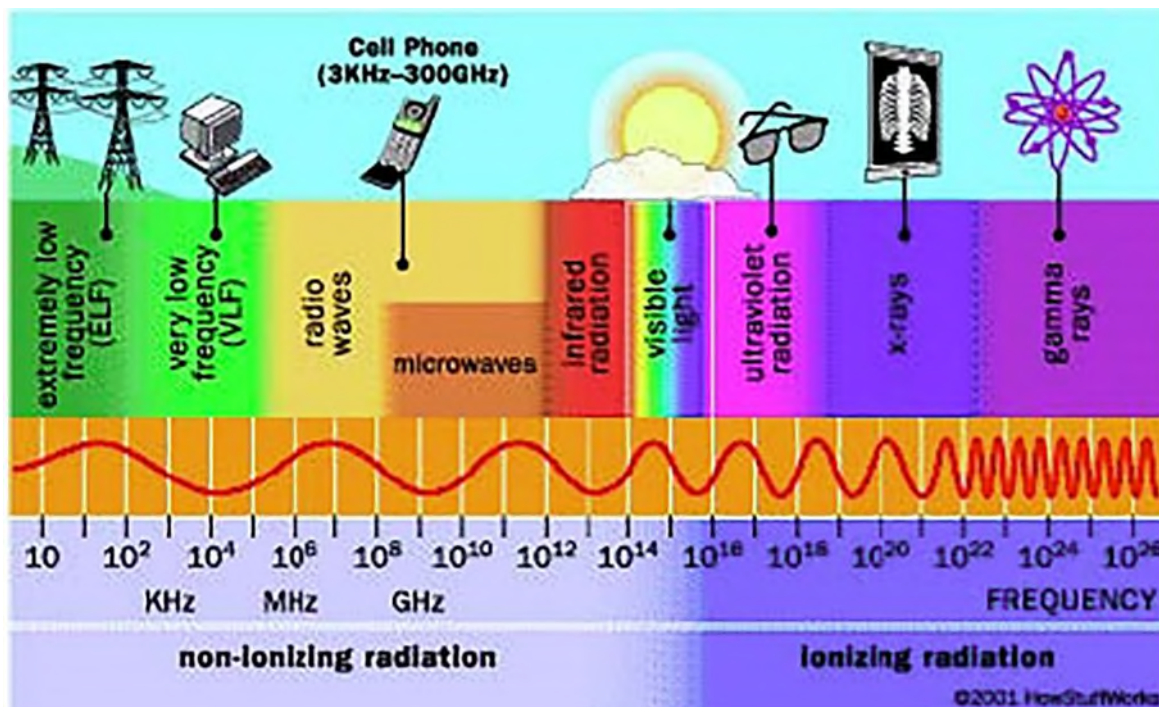


Figure 1 : Le spectre électromagnétique.

Le spectre électromagnétique est divisé en rayonnements ionisants et non ionisants. Le rayonnement ionisant se situe dans la gamme des ultraviolets et au-dessus dans les fréquences lumineuses. Les rayons gamma, les rayons cosmiques, les rayons X et diverses activités nucléaires militaires et civiles sont des exemples de rayonnements ionisants. Ce sont les bandes non ionisantes que nous avons complètement comblées avec la technologie moderne.

Au cours de l'histoire de l'évolution, nous avons inondé la surface de la Terre d'une couverture d'expositions à des énergies artificielles sans comprendre clairement quelles en seraient les conséquences.

Et bien qu'elle soit "naturelle", toute énergie ne se ressemble pas. - Les expositions artificielles contiennent des caractéristiques de propagation - telles que le courant alternatif, la modulation, des - caractéristiques de signalisation complexes (par exemple, pulsées, numériques et en réseau phasé), des formes d'onde inhabituelles (par exemple, des formes carrées et en dents de scie), et des intensités de puissance élevées à la surface de la Terre qui n'existent tout simplement pas dans la nature. Ce sont tous des artefacts créés par l'homme. En adoptant la technologie, nous avons complètement modifié la signature électromagnétique de la Terre dans laquelle toute vie a évolué, en contournant essentiellement la protection de la magnétosphère. Et comme une grande partie de la technologie sans fil est basée sur les satellites, les expositions croissantes ne sont plus seulement générées par le sol. Tous les niveaux atmosphériques sont désormais touchés par l'augmentation des expositions ambiantes (voir la partie 1 et le - supplément à la partie 1). C'est particulièrement vrai dans la basse atmosphère, qui constitue un "habitat" (au-delà des normes relatives à l'oxygène et à l'air pur) pour toutes les espèces qui s'accouplent, migrent et se nourrissent dans l'air - y compris les oiseaux, les mammifères (comme les chauves-souris), les insectes et certains arachnides.

## Extinction d'espèces

Selon l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) [10], qui tient une "liste rouge des espèces menacées", considérée comme la source la plus complète au monde sur l'état de conservation des espèces animales, végétales et fongiques, tous des indicateurs essentiels de la santé de la planète, la biodiversité a connu un déclin sans précédent au cours des dernières décennies.

La liste 2018 de l'UICN a montré que 26 000 espèces sont menacées d'extinction, ce qui représente plus de 27 % de toutes les espèces évaluées. Ce chiffre a considérablement augmenté par rapport à leur rapport de 2004 qui a révélé qu'au moins 15 espèces s'étaient déjà éteintes entre 1984 et 2004, et que 12 autres ne survivaient qu'en captivité. Les taux d'extinction actuels sont désormais au moins 100 à 1 000 fois supérieurs aux taux naturels constatés dans les archives fossiles.

Le rapport plus récent de mai 2019 de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques, Paris, France [11], prévoit qu'au moins un million d'espèces végétales et animales dans le monde sont menacées d'extinction de façon imminente si les actions et activités humaines actuelles ne sont pas immédiatement inversées. Un examen de 73 rapports par Sanchez-Bayo et Wyckhuys [12] a révélé que ces taux s'étaient considérablement accélérés. Les auteurs ont noté que la biodiversité des insectes en particulier est menacée dans le monde entier par des déclinés dramatiques qui pourraient conduire à une extinction de 40 % des espèces d'insectes au cours des prochaines décennies. Dans les écosystèmes terrestres, ils ont constaté que les *lépidoptères*, les *hyménoptères* et les *coléoptères* (bousiers) étaient les plus nombreux.

) ont été les plus touchés, tandis que dans les écosystèmes aquatiques, les *Odonata*, les *Plecoptera*, les *Trichoptera* et les *Ephemeroptera* ont déjà perdu une proportion considérable d'espèces. Les groupes d'insectes touchés comprenaient des espèces spécialistes de niche, ainsi que des espèces communes et généralistes, dont beaucoup sont d'une importance critique pour la pollinisation, ainsi que pour la production de graines, de fruits, de noix et de miel, et la lutte naturelle contre les parasites, entre autres, d'une valeur économique et écologique incommensurable.

L'homme est la principale cause de la plupart des déclinés, en raison de la destruction ou de la dégradation de l'habitat, de la surexploitation pour l'alimentation, les animaux de compagnie, le bétail et la médecine, des espèces introduites artificiellement, de la pollution ou de la contamination, des pesticides et des maladies. Le changement climatique est de plus en plus considéré comme une menace sérieuse, tout comme les pratiques agricoles telles que les monocultures pour l'alimentation du bétail, les biocarburants et le bois. Les nouveaux pesticides et désherbants introduits au cours des 20 dernières années, comme les néonicotinoïdes, le glyphosphate et le fipronil, sont particulièrement nuisibles car ils sont durables et capables de stériliser le sol des micro-organismes bénéfiques, notamment les vers et les vers blancs, ce qui peut ensuite s'étendre à des zones bien au-delà des sites d'application.

Un exemple de dommages multifactoriels comprend l'emblématique papillon monarque américain (*Danaus plexippus*) qui se trouve à travers l'Amérique et le sud du Canada et qui est généralement divisé géographiquement en groupes migratoires orientaux et occidentaux par les montagnes Rocheuses. Cette espèce a connu un déclin de 99,4 % dans l'ouest depuis les années 1980, dont 85 % depuis 2017 [13, 14]. Selon le Center for Biological Diversity [15], la population orientale de monarques a diminué de 90 % au cours des deux dernières décennies. La perte massive d'habitat, les incendies de forêt, le changement climatique, les sécheresses, la férocité accrue des tempêtes et l'introduction dans les années 1990 des cultures Monsanto "Roundup Ready" capables de survivre aux herbicides qui tuent d'autres mauvaises herbes - y compris l'asclépiade, dont les monarques ont besoin pour se reproduire et comme unique source de nourriture le long de leurs routes migratoires - seraient les principaux responsables.

Nous soutenons ici que les CEM environnementaux devraient être ajoutés à cette liste puisque de nombreux insectes et d'autres espèces vivantes ont des récepteurs sensibles aux CEM, par exemple, on a découvert que les monarques ont des magnétorécepteurs sensibles à la lumière dans leurs antennes qui servent de boussole d'inclinaison lorsque la lumière du jour est absente [16]. On sait également que les RFR modifient le temps nécessaire à un papillon pour achever sa morphogénèse, et que la gastrulation et la croissance des larves peuvent être accélérées [17]. Et la perte dévastatrice d'insectes pollinisateurs comme les abeilles domestiques et d'autres pollinisateurs sauvages peut également être liée aux CEM environnementaux (voir "Insectes" ci-dessous).

De manière anecdotique, de nombreuses personnes se souviennent de l'époque où les insectes étaient beaucoup plus nombreux et la faune beaucoup plus abondante. Depuis 1980 environ, on observe une diminution régulière, presque imperceptible, de la biodiversité de nombreuses espèces à l'échelle mondiale [18-20]. En 2018, les scientifiques ont estimé que la



La plus grande colonie de manchots royaux a diminué de 88 % en seulement 35 ans [21], en grande partie à cause des effets du changement climatique, tandis que, selon le Comité scientifique international pour le thon et les espèces voisines dans l'océan Pacifique Nord, plus de 97 % des thons rouges ont disparu des océans du monde, principalement à cause de la surpêche industrielle, mais aussi à cause des marées noires, de la contamination et du changement climatique. Jusqu'à récemment, les chauves-souris vivant dans les arbres et les grottes étaient courantes, y compris dans l'est des États-Unis. Aujourd'hui, avec les impacts massifs du syndrome du nez blanc (une maladie fongique mortelle pour les chauves-souris), la mortalité annuelle due aux collisions entre les éoliennes et les chauves-souris, estimée à près d'un million par an rien qu'aux États-Unis [22, 23], et l'utilisation de pesticides, on voit peu de chauves-souris. Les espèces de chauves-souris sont également sensibles aux CEM. Les impacts des CEM, tels qu'ils ont été constatés dans des études approfondies, ne font qu'ajouter une autre variable troublante pour l'ensemble de la faune [24-36].

Comme tous les réseaux alimentaires sont liés de manière unique, il y a des effets négatifs en cascade dans tous les écosystèmes. Les oiseaux qui se nourrissent d'insectes sont durement touchés : 8 perdrix sur 10 ont disparu des terres agricoles françaises, tandis que les rossignols et les tourterelles ont respectivement diminué de 50 à 80 % au Royaume-Uni. Depuis 1980, le nombre d'oiseaux qui habitent habituellement les terres agricoles d'Europe a diminué de 55 %, tandis qu'au cours des 17 dernières années, le nombre d'oiseaux des terres agricoles françaises a chuté d'un tiers. On pense que l'intensification des pratiques agricoles en est responsable, la perte d'insectes étant le principal responsable [12, 37]. Aux États-Unis, sur les 1 027 espèces d'oiseaux migrateurs actuellement protégées par le Migratory Bird Treaty Act de 1918, on estime que 40 % sont en déclin d'après les enquêtes sur les oiseaux nicheurs [38], les Christmas Bird Counts [39] et d'autres outils de surveillance [22, 23]. Cette tendance est comparable à ce qui se passe au niveau mondial. Le rôle joué par les CEM dans ces déclins n'est pas clair mais reste une possibilité inquiétante. Nous ne comprenons pas non plus les limites de la tolérance d'une espèce donnée aux perturbations environnementales - certaines font preuve d'une grande flexibilité tandis que d'autres ne prospèrent que dans des zones très étroites.

Selon une estimation des espèces de la Terre, depuis 1970, les populations d'animaux sauvages ont été réduites en moyenne de 60 %. Populairement appelé "sixième extinction de masse" [40], ce terme fait référence à la sixième fois dans l'histoire de la Terre où un grand nombre d'espèces ont rapidement disparu sur une période relativement courte, cette fois-ci en raison de l'activité humaine et non d'une collision avec un astéroïde ou d'une activité volcanique. Bien qu'elle n'ait pas été officiellement désignée comme telle, cette période géologique/écosystémique la plus récente est désormais appelée "Anthropocène", c'est-à-dire l'ère de l'homme [41-46].

Les populations d'insectes ont été particulièrement touchées, avec des extinctions huit fois plus rapides que celles des mammifères, des oiseaux et des reptiles [12]. On estime que la masse totale des insectes diminue de 2,5 % par an, ce qui laisse penser qu'ils pourraient disparaître d'ici le siècle prochain. Et ce qui affecte les populations d'insectes

tous les éléments du réseau alimentaire d'une manière ou d'une autre. La perte de diversité et d'abondance des insectes peut avoir des effets dévastateurs sur l'ensemble des réseaux alimentaires et mettre en danger des écosystèmes entiers [12]. En Europe, Hallmann et al. [47] ont constaté un déclin de plus de 75 % sur 27 ans de la biomasse - totale d'insectes volants dans 63 zones protégées, dont beaucoup en Allemagne. On a constaté un déclin de 82 % de la masse d'insectes volants au milieu de l'été. De nombreuses espèces d'insectes européens migrent depuis des endroits aussi éloignés que l'Afrique. Les chercheurs ont noté que les changements dans les conditions météorologiques, l'utilisation des terres et les caractéristiques de l'habitat ne peuvent à eux seuls expliquer le déclin général et qu'il peut y avoir plus d'un facteur non reconnu impliqué dans l'évaluation du déclin de l'abondance globale des espèces. Ce facteur méconnu pourrait être l'augmentation constante du CEM ambiant, qui est directement liée à ces déclins (voir partie 1, supplément 1).

Des déclins alarmants similaires d'invertébrés ont été découverts dans l'hémisphère occidentale en 2017 lorsque l'entomologiste américain Bradford Lister, après 40 ans, a revisité la forêt nationale d'El Yunque à Porto Rico pour suivre une étude commencée en 1976 [48]. Au cours des décennies qui ont suivi, les populations d'arthropodes, dont de nombreux insectes volants, des mille-pattes et des araignées, avaient chuté de 98 % à El Yunque, une forêt tropicale vierge faisant partie du système de forêts nationales des États-Unis. Les insectivores - y compris les oiseaux, les lézards et les crapauds - ont connu un déclin similaire, certaines espèces ayant complètement disparu. Après avoir pris en compte des facteurs tels que la dégradation ou la perte d'habitat et l'utilisation de pesticides, les chercheurs ont conclu que le changement climatique était le principal facteur, puisque la température maximale moyenne dans cette forêt tropicale avait augmenté de 4 °F au cours de cette période. Ils n'ont pas tenu compte de l'importante installation VLF de l'armée américaine à Aquada, qui communique avec les sous-marins du monde entier, ni des multiples radars à réseau phasé à balayage horizontal dirigés vers Porto Rico depuis des sites côtiers américains et qui irradient profondément cette forêt, ni des multiples radars météorologiques Doppler de la NOAA disséminés sur la petite île pour suivre les ouragans, ni des nombreuses tours de téléphonie mobile.

Ces déclins mondiaux sont vraiment alarmants et ont des répercussions sur la santé planétaire ainsi que sur l'intégrité de l'homme et de la faune. Beaucoup de ceux qui étudient ce phénomène affirment que le changement climatique n'est pas le seul facteur en cause et qu'il se passe quelque chose de nouveau [47]. La question est la suivante : l'augmentation constante des CEM dans l'environnement, l'une des génotoxines environnementales les plus omniprésentes mais non reconnues depuis les années 1980, pourrait-elle contribuer à ces pertes d'espèces sans précédent, en commençant par les insectes mais en se manifestant maintenant chez d'autres espèces également ? Les bandes supérieures des micro-ondes se couplent de façon maximale avec certains insectes de la taille d'une mouche à fruits et sont capables de créer des effets de résonance et autres effets dévastateurs. Historiquement, les effets du rayonnement radiofréquence (RFR) sur les insectes ont été parmi les premiers effets biologiques à être étudiés.

étudiés [49] dans l'espoir de découvrir de nouvelles formes de lutte contre les insectes [50]. Tous les développements métamorphiques des insectes ont été étudiés, y compris les stades d'œuf, de larve, de nymphe et d'adulte. Une hypothèse veut que certaines espèces adultes soient plus sensibles qu'aux stades larvaires parce que les appendices adultes servent de voies conductrices vers le corps (voir "Insectes" ci-dessous).

Ce sont ces bandes de fréquences exactes entre 30 kHz et 3 GHz utilisées dans les technologies de télécommunication qui ont connu une hausse durant cette période. Et la 5G se profile à l'horizon qui pourrait cibler spécifiquement les populations d'insectes (voir partie 1).

## Sensibilité des espèces aux CEM

D'autres espèces possèdent des outils de détection électromagnétique beaucoup plus complexes que ceux de l'homme, ainsi que des physiologies uniques qui ont évolué pour détecter les champs faibles. De nombreuses espèces sont très sensibles aux champs électromagnétiques naturels de la Terre, ainsi qu'aux variations géographiques et saisonnières. En fait, il semble que la plupart des êtres vivants - y compris de nombreuses espèces de mammifères, d'oiseaux, de poissons et de bactéries - soient adaptés au fond électromagnétique de la Terre d'une manière qui était autrefois considérée comme un "superpouvoir" mais qui est aujourd'hui reconnue comme physiologique, même si les mécanismes sont encore imparfaitement compris. Par exemple, on a observé que de nombreux animaux détectent les tremblements de terre bien avant que les instruments humains ne le fassent, notamment les serpents et les scorpions qui cherchent à s'abriter, le bétail qui se met à ruer, les oiseaux qui chantent aux mauvais moments de la journée et les chattes qui déplacent frénétiquement leurs chatons [7].

Cette capacité est probablement due, en partie, au fait que de nombreuses espèces réagissent aux variations du champ magnétique terrestre et aux charges électrostatiques dans l'air détectées par un minéral naturel appelé magnétite que l'on trouve chez de nombreuses espèces [51, 52]. En fait, les abeilles sont capables de détecter des fluctuations de champs magnétiques statiques aussi faibles que 26 nT, alors que les champs magnétiques terrestres de fond sont beaucoup plus élevés [53], et de percevoir de faibles champs alternatifs à des fréquences de 10 et 60 Hz [54]. La magnétite réagit un million de fois plus fortement aux champs électromagnétiques externes que tout autre matériau magnétique connu. Les auteurs Kobayashi et Kirch-vink [52] et Kirchvink et al. [53, 54] ont émis l'hypothèse que les résultats étaient conformes aux prédictions biophysiques d'un magnétorécepteur à base de magnétite. D'autres mécanismes, comme les mécanismes de paires de radicaux et les cryptochromes, peuvent également être responsables (voir "Mécanismes" ci-dessous).

On a beaucoup écrit sur la magnétoréception - le terme utilisé pour décrire la façon dont les espèces perçoivent les champs électromagnétiques - qui est bien établie mais mal comprise. De nombreuses espèces utilisent des informations sur les champs électromagnétiques naturels de la Terre.

Les espèces d'oiseaux migrateurs [55, 56], les abeilles mellifères [57], les poissons [58], les mammifères [59], les chauves-souris [60], de nombreuses espèces d'insectes [61], les mollusques [62], les oiseaux de mer [63], etc. Les espèces d'oiseaux migrateurs [55, 56], les abeilles domestiques [57], les poissons [58], les mammifères [59], les chauves-souris [60], de nombreuses espèces d'insectes [61], les mollusques [62] et même les bactéries [63] sont connus pour détecter les champs magnétiques de la Terre de diverses manières. La magnétoréception peut permettre à certaines espèces d'oiseaux de voir les champs terrestres [64].

Certaines espèces d'insectes et d'arachnides (par exemple, les Trichobothria) peuvent détecter les champs électriques atmosphériques naturels [65], ce qui déclenche un comportement de montgolfière - par exemple, en grimpant jusqu'au point le plus élevé, en laissant échapper de la soie et en se déplaçant sur les courants éoliens grâce à des Trichobothria semblables à des poils qui détectent les vibrations, les courants et les charges électriques dans l'air. Certains ont été trouvés à une hauteur de 4 km dans le ciel, se dispersant sur des centaines de kilomètres. Morley et Robert [65] ont découvert que la présence d'un faible champ électrique vertical naturel provoquait un comportement de ballon et un décollage chez les araignées ; leurs poils mécanosensoriels fonctionnent comme des récepteurs sensoriels putatifs qui sont activés par de faibles champs électriques naturels en réponse aux stimuli du champ électrique et du flux d'air. Les chercheurs ont émis l'hypothèse que l'électricité atmosphérique jouait un rôle clé dans les schémas de migration massive de certaines espèces d'arthropodes.

Même les nématodes du sol (*Caenorhabditis elegans*) s'orientent vers des champs magnétiques de force terrestre dans leur - comportement de fouissement et une étude récente de Vidal-Gadea [66] a montré que de faibles champs statiques légèrement supérieurs aux champs naturels de la Terre déterminent la régénération des cellules souches chez les vers plats (*Planaria*) [67].

Les grands mammifères ruminants s'orientent également vers les champs terrestres. Begall et al [68] ont été les premiers à observer l'alignement du bétail et des cerfs sur les lignes de champ géomagnétique. En utilisant des images satellites, des observations sur le terrain et en mesurant les "lits de cerfs" dans la neige, ils ont noté que les bovins domestiques du monde entier, ainsi que les cerfs rouges (*Cervus alphas*) et les chevreuils (*Capreolus capreolus*) au pâturage et au repos, alignent systématiquement l'axe de leur corps dans une direction générale nord-sud et que les chevreuils orientent également leur tête vers le nord lorsqu'ils paissent ou se reposent. Burda et al. [69] ont toutefois découvert que les CEM-ELF d'origine humaine perturbaient l'alignement nord-sud avec le champ - géomagnétique chez les bovins et les chevreuils au repos lorsqu'ils ont constaté que l'orientation du corps était aléatoire dans les pâturages - situés sous ou à proximité des lignes électriques, le schéma perturbé diminuant avec la distance aux conducteurs. Le bétail exposé à divers modèles de champ magnétique directement sous ou près des lignes électriques présentait des modèles d'alignement distincts. Ils ont conclu qu'il existait des preuves de sensation magnétique chez les grands mammifères, ainsi que des réactions comportementales manifestes à de faibles ELF-MF chez les vertébrés, ce qui implique des effets cellulaires et moléculaires. Slaby et al. [70] ont également constaté que le bétail s'alignait le long d'un axe nord-sud, mais ont suggéré que cet alignement pouvait dépendre de la densité du troupeau, car l'effet disparaissait dans les troupeaux plus nombreux. Fedorowicz [71] a étendu ce phénomène à

comprennent la sensibilité des bovins à d'autres faibles CEM-ELF provenant de lignes électriques, mais avec des effets observés dus à des champs électriques et magnétiques combinés plutôt qu'à la seule exposition au champ électrique (voir "Bovins" ci-dessous).

Cervený et al. [72] ont découvert que le renard roux (*Vulpes vulpes*) utilise les champs géomagnétiques pendant la chasse. Hart et al [73] ont constaté que même les chiens domestiques étaient sensibles aux petites variations de l'orientation de la Terre dans leurs habitudes d'excrétion, préférant un axe général nord-sud pour la défécation et l'urination en fonction des changements du champ géomagnétique. Nießner et al. [74] ont découvert que les chiens et certaines autres espèces peuvent en fait "voir" les champs géomagnétiques grâce à des protéines photoréceptrices détectant la lumière bleue dans leurs yeux, appelées cryptochromes.

Selon le US/UK World Magnetic Model [75], la sensibilité au champ géomagnétique peut compliquer davantage les problèmes des espèces migratrices (p. ex. certaines tortues, des animaux marins, des oiseaux et des insectes) parce que le pôle nord magnétique de la Terre se déplace plus rapidement que jamais dans l'histoire de l'humanité. Par rapport à la période comprise entre 1900 et 1980, il s'est fortement accéléré pour atteindre une distance d'environ 50 km par an, se déplaçant vers l'ouest, de l'île d'Ellesmere au Canada, son emplacement traditionnel pendant la majeure partie de l'histoire, vers la Russie [76]. Le nord magnétique fluctue en fonction des changements dans le noyau fondu de la Terre, contrairement au nord géographique qui s'aligne sur l'axe de la Terre. Cette tendance pourrait indiquer une inversion prochaine des pôles, le nord et le sud échangeant leurs places, ce qui se produit environ tous les 400 000 ans, la dernière fois il y a environ 780 000 ans. Certains animaux pourraient être capables de recalibrer les repères de navigation, mais cela reste à voir. Étant donné que certaines espèces d'oiseaux migrateurs peuvent voir les champs géomagnétiques grâce à des cellules réceptrices spéciales dans leurs yeux et par d'autres mécanismes, ils pourraient être déroutés. On ignore combien d'autres espèces perçoivent également les champs géomagnétiques, mais certains crustacés et plusieurs espèces d'insectes, en particulier ceux dont les structures oculaires composées sont constituées de milliers d'ommatidies - de minuscules unités de photoréception indépendantes dotées d'une cornée, d'une lentille et de cellules photoréceptrices qui s'orientent dans différentes directions et distinguent la luminosité et beaucoup plus de bandes de couleur que les humains - sont de bons candidats. Par rapport aux yeux à ouverture unique, les yeux composés ont un très grand angle de vision qui permet de détecter les mouvements rapides et, dans certains cas, la polarisation de la lumière.

Dans les milieux aquatiques, certains lacs comptent plus de 200 espèces de poissons qui utilisent une forme d'électromagnétisme pour localiser leur nourriture et se reproduire. Les anguilles électriques peuvent délivrer une décharge de 500 V pour tuer leurs proies. Les requins possèdent un ensemble de capteurs électromagnétiques. Il s'agit notamment de récepteurs de champs magnétiques dans leur bouche, d'yeux 10 fois plus sensibles que ceux des humains, et de leur perception de minuscules décharges électriques neuronales provenant des muscles en mouvement de leurs proies (y compris l'anguille électrique).

Les requins sont souvent attirés par les champs électromagnétiques de faible intensité qui entourent les câbles électriques sous-marins. Les requins sont souvent attirés par les champs électromagnétiques de faible intensité qui entourent les câbles électriques sous-marins et sont parfois électrocutés lorsqu'ils confondent le conduit avec une proie vivante et y mordent. De nombreux poissons ont des lignes latérales de part et d'autre de leur corps qui sont composées de magnétite, ce qui leur permet de nager en bancs synchronisés [52].

De nombreux autres animaux ont développé des organes récepteurs spéciaux pour détecter les CEM environnementaux. L'ornithorynque à bec de canard (*Ornithorhynchus anatinus*), un mammifère primitif semi-aquatique qui pond des œufs, possède des milliers de capteurs électriques sur la peau de son bec. Comme le note Lai [77], en utilisant ces électrorécepteurs et en interagissant avec un autre type de mécanorécepteur, un ornithorynque peut détecter un champ électrique de 20  $\mu\text{V}/\text{cm}$  [78] - équivalent à celui produit par les muscles d'une crevette. L'information est traitée par le cortex somatosensoriel de l'ornithorynque pour fixer l'emplacement de la proie. Ce type d'électroréception est commun aux trois espèces de monotrèmes : l'ornithorynque, l'échidné à long bec (*Zaglossus bruijnii*) et à bec court (*Tachyglossus aculeatus*). Les poissons électriques (élas-mobranches) émettent des CEM qui couvrent une distance de plusieurs centimètres [79, 80]. Cela permet de localiser une proie potentielle en comparant ses propriétés électriques avec celles de son voisinage immédiat. Il a été démontré que leurs électrorécepteurs peuvent détecter un champ de 5 nV/cm. Ces systèmes de détection des CEM sont très sensibles et efficaces, mais aussi très vulnérables aux perturbations causées par des champs non naturels. Les organismes qui utilisent le champ géomagnétique pour migrer ont la capacité non seulement de détecter le champ mais aussi son orientation.

Les fréquences lumineuses anthropiques affectent la faune sauvage d'une manière dont nous n'avons pris conscience que récemment. Des études écologiques ont révélé que la lumière artificielle nocturne perturbe les animaux nocturnes de manière dévastatrice, notamment en les désorientant et en perturbant les cycles de reproduction et de migration des tortues, des insectes volants, des oiseaux, des papillons et d'une multitude d'autres espèces sauvages, y compris les mammifères [81-84]. Pas moins de 30 % des vertébrés nocturnes et plus de 60 % des invertébrés peuvent être affectés par la lumière artificielle [85]. L'éclairage réfléchi par les nuages, connu sous le nom de "sky glow", peut produire des conditions de luminosité anormale la nuit à partir de spectres de longueurs d'onde différentes qui ont un impact sur différentes espèces, avec le potentiel de modifier l'équilibre des interactions entre les espèces [86, 87]. Il a été constaté qu'un changement de couleur de la lumière peut aider certaines espèces tout en nuisant à d'autres [88]. Par exemple, les lampes à sodium à basse pression dont le spectre est plus jaune réduisent la mortalité des mites autour des ampoules, mais les salamandres ne peuvent pas se déplacer d'un étang à l'autre sous une lumière jaune ou rouge. On a observé que certaines grenouilles gelaient pendant des heures, même après l'extinction des lumières, et qu'elles suspendaient à la fois leur alimentation et leur reproduction [83].

L'un des grands mystères de la nature concerne le "comportement de retour au bercail", c'est-à-dire la capacité de certaines espèces animales à retourner sur leur lieu de naissance afin de se reproduire, parfois sur de grandes distances. Le comportement de retour au bercail est connu chez les tortues de mer [89], les anguilles [90] et les saumons [91], entre autres espèces. Le mécanisme sous-jacent, bien qu'imparfaitement compris, implique que ces espèces "se souviennent" des configurations du champ géomagnétique de leur lieu de naissance par le biais d'un processus connu sous le nom d'"empreinte", et peuvent donc le localiser et y retourner même s'ils se trouvent à des milliers de kilomètres au moment de la reproduction. Apparemment, les nouveau-nés de ces espèces gardent en mémoire l'intensité et l'angle d'inclinaison du champ géomagnétique local. Cette information est ensuite utilisée pour localiser leur lieu de naissance où ils reviennent se reproduire.

La question est de savoir si les CEM d'origine humaine peuvent fausser cette mémoire d'empreinte dans la localisation ultérieure du site. Par exemple, que se passe-t-il si des installations émettant des RFR sont situées près de sites de reproduction de tortues ? Cela pourrait-il interférer avec l'impregnation ? Landler et al [92] ont mis en évidence des effets négatifs sur les tortues. Les chercheurs ont constaté que les RFR pouvaient perturber une orientation naturelle, établir leur propre orientation et inverser complètement une orientation naturelle, ce qui indique qu'il est nécessaire d'approfondir les recherches, car nous ne connaissons tout simplement pas tous les effets des CEM anthropiques sur les autres espèces.

## Conduction de l'énergie chez différentes espèces : physiologies et morphologies uniques

La physiologie et la morphologie uniques des espèces non humaines créent des complexités supplémentaires. Par exemple, les espèces quadrapèdes avec quatre pieds au sol ont une conductivité différente et potentiellement plus efficace que les espèces bipèdes avec deux pieds. Un exemple est la sensibilité accrue des bovins à l'augmentation du courant de terre près des lignes à haute tension [93, 94] et des tours de téléphonie mobile [95-97]. De même, les corps qui sont principalement parallèles au sol, ce qui inclut la plupart des mammifères à quatre pattes, plutôt que d'avoir une démarche verticale perpendiculaire, conduisent les CEM de différentes manières que les espèces verticales comme les humains, les singes et autres primates. Les espèces qui étreignent le sol, comme les serpents, les salamandres et les grenouilles, sont particulièrement exposées aux courants telluriques, surtout les nuits de pluie où l'eau, en tant que milieu conducteur, peut augmenter les expositions [98]. Cela peut rendre certaines espèces plus sensibles aux courants de terre artificiels causés par les compagnies d'électricité qui utilisent la Terre comme point neutre de retour à la sous-station pour les excès de courant.

courant alternatif sur leurs lignes au lieu d'installer des lignes neutres supplémentaires sur les poteaux électriques [99].

Les poils, les moustaches et les appendices apparentés de diverses espèces sont connus pour détecter de petites variations des champs électromagnétiques ainsi que des altérations de l'eau et du temps [100]. En fait, on a observé que les fourmis utilisaient leurs antennes comme "antennes CEM" lorsque les chercheurs les soumettaient à des champs électromagnétiques externes, en s'alignant pour "canaliser" les RFR loin de la colonie [7]. Des espèces telles que les oiseaux, ainsi que certains insectes dotés de structures oculaires composées, peuvent voir beaucoup plus de couleurs que les humains, tandis que les chats, les chiens et les hiboux, par exemple, entendent beaucoup plus de fréquences sonores à des niveaux incroyablement bas.

## Mécanismes de magnétoréception : cellules électroréceptrices, magnétite, cryptochromes/paires de radicaux.

Selon Lai [77], "... pour qu'une entité environnementale affecte les fonctions d'un organisme, les critères suivants doivent être remplis : l'organisme doit être capable de détecter l'entité ; le niveau de l'entité doit être similaire à celui de l'environnement ambiant normal, qui est généralement beaucoup plus bas que le niveau de l'entité utilisé dans les études expérimentales ; et l'organisme doit avoir des mécanismes de réponse adaptés à certains paramètres de l'entité qui permettent une détection immédiate de la présence et des changements de l'entité. Ainsi, une variation de l'entité serait détectée comme une entrée aberrante et déclencherait une réaction de réponse. Afin de comprendre comment les CEM d'origine humaine affectent la faune, il faut prendre en compte les critères ci-dessus, y compris les multiples mécanismes sensoriels qui varient d'une espèce à l'autre. "

Les questions sont les suivantes : Comment diverses espèces détectent-elles les faibles signaux géomagnétiques naturels, distinguent-elles les subtils microcourants et champs magnétiques internes inhérents à toute la biologie des champs externes, puis dépassent-elles le bruit de fond interne et externe pour utiliser ces informations électromagnétiques ?

Il existe trois mécanismes principaux utilisés pour comprendre la magnétoréception :

- (1) Induction magnétique de faibles signaux électriques dans des récepteurs sensoriels spécialisés [101].
- (2) Interactions magnétomécaniques avec des dépôts localisés de cristaux de magnétite à domaine unique [52, 102, 103].
- (3) Les photorécepteurs à paires de radicaux, qui sont peut-être les plus plausibles [104-111].



Dans le modèle d'induction (mécanisme 1), selon Lin [102], la première catégorie d'interactions électrodynamiques avec des champs magnétiques faibles est incarnée par les élasmodontes, notamment les requins, les raies et les raies, dont la tête contient de longs canaux remplis de gelée à haute conductivité électrique, connus sous le nom d'ampoules de Lorenzini. Lorsque ces poissons nagent à travers les lignes de flux géomagnétiques de la Terre, de petits gradients de tension sont induits dans ces canaux avec des détections de champ électrique aussi faibles que  $0,5 \mu\text{V/m}$  [101]. La polarité du champ induit par rapport au champ géomagnétique fournit des repères directionnels aux poissons. Cependant, chez les oiseaux, les insectes et les animaux terrestres, de telles cellules n'ont pas été trouvées, ce qui indique qu'il ne s'agit peut-être pas d'un mécanisme universel mais plutôt de facteurs spécifiques à l'environnement ou à l'espèce [111].

Le modèle magnétomécanique (mécanisme 2) fait intervenir le - minéral cristallin naturel à base de fer appelé magnétite, présent dans la plupart des espèces [52]. Sa fonction est plus simplement démontrée dans les bactéries magnétotactiques [63] à haute teneur en fer où la magnétite biogène est fabriquée en chaînes cristallines à domaine unique de 20 à 30 domaines [112]. L'orientation est modélisée en fonction du champ géomagnétique. Blakemore et al. [113] ont trouvé que les bactéries magnétotactiques de l'hémisphère nord migrent vers le pôle nord du champ géomagnétique alors que les mêmes souches migrent vers le pôle sud dans l'hémisphère sud. À l'équateur, elles sont presque également réparties en orientations de recherche nord et sud [114]. Et elles migrent toutes vers le bas en réponse à la composante verticale du champ géomagnétique, ce qui, en milieu aqueux, peut être essentiel pour leur survie dans les sédiments de fond.

Parmi les nombreuses espèces où l'on a trouvé de la magnétite, citons le crâne et les muscles du cou des pigeons [115, 116], les denticules des mollusques [117, 118] et la région abdominale des abeilles [119]. Tenforde [103] a décrit d'autres espèces présentant de la magnétite localisée, notamment des dauphins, des thons, des saumons, des papillons, des tortues, des souris et des humains.

Le troisième modèle mécaniste (mécanisme 3) qui retient aujourd'hui l'attention des chercheurs implique une réaction complexe de paires de radicaux libres et la conversion des formes d'électrons (inter-conversion singulet-triplet) dans un groupe de composés protéiques connus sous le nom de cryptochromes. Des cryptochromes ont été découverts dans la rétine d'oiseaux chanteurs migrateurs nocturnes par Heyers et al [55] et Moller et al [56], montrant une communication complexe avec le cerveau pour l'orientation lorsqu'elle repose sur la magnétoréception. Gegear et al. [61] ont découvert que les cryptochromes sont un composant essentiel de la magnétoréception chez la *drosophile* (*Drosophila mela-nogaster*). Comme l'a noté Lai [77], les cryptochromes sont également présents dans les rétines de certains animaux [120]. Il a été signalé que la RFR [121] et les champs magnétiques oscillants [122] perturbent l'orientation de la boussole migratoire chez les oiseaux migrateurs.

oiseaux. Certains rapports indiquent également la présence de cryptochromes dans les plantes, qui pourraient être responsables de l'effet des CEM sur la croissance des plantes [123]. Les cryptochromes sont également connus pour être impliqués dans les rythmes circadiens [56, 124]. Pour une excellente revue de la plausibilité, des théories et des complexités des paires cryptochromes/radicaux, voir Ritz et al. [111].

De nombreuses espèces utilisent probablement une combinaison de ces mécanismes ainsi que des influences plus subtiles encore non détectées. Le vecteur du champ géomagnétique peut fournir l'information directionnelle, tandis que l'intensité et/ou l'inclinaison - fournissent l'information positionnelle nécessaire à l'orientation. Dans des études comportementales [125, 126], Wiltschko et al. ont découvert que les oiseaux utilisaient à la fois des mécanismes de magnétite et de cryptochrome lorsqu'ils répondaient à une impulsion magnétique courte et forte capable de modifier la magnétisation des particules de magnétite, tandis que leur orientation dépendait de la lumière et était facilement perturbée par des champs magnétiques à - haute fréquence dans la gamme des MHz, ce qui indique des processus de paires radicales. Ces résultats suggèrent, à l'instar des études électrophysiologiques et histologiques, que les oiseaux possèdent un mécanisme de paire radicale situé dans l'œil droit qui - fournit des informations directionnelles de type boussole, tandis que la magnétite située dans la partie supérieure du bec détecte l'intensité magnétique, fournissant ainsi des informations positionnelles. Cependant, Pakhomov et al. [122] ont souligné que la boussole magnétique de l'oiseau chanteur peut être perturbée par un champ magnétique oscillant de 1,403 MHz et de 2-3 nT, à un niveau qui ne peut être expliqué par le mécanisme de la paire radicale.

La lumière joue un rôle important [127], ce qui constitue une - préoccupation environnementale aujourd'hui, car la technologie s'oriente de plus en plus vers l'utilisation des bandes infrarouges pour les communications et l'augmentation des satellites crée des lumières artificielles/non familières semblables à des étoiles dans le ciel nocturne qui sont potentiellement capables d'avoir un impact sur les modèles de migration nocturne. Il existe d'autres preuves que les espèces utilisent une combinaison de photorécepteurs et de magnétoréception à base de magnétite. Comme nous l'avons mentionné plus haut, chez les oiseaux, les deux mécanismes coexistent et transmettent différents types d'informations magnétiques en fonction des besoins, comme le vol par temps ensoleillé ou nuageux ou les vols nocturnes, et ils peuvent être facilement perturbés [106, 128-130]. Les oiseaux peuvent co-traiter les informations visuelles avec les informations magnétiques et être capables de faire la distinction entre les deux [131, 132]. Cette fonction se produit probablement dans l'œil ou dans les zones supérieures du cerveau aviaire par le biais du traitement de l'information dépendant de la lumière et de la paire de cryptochromes radicaux [131, 133]. La boussole magnétique **des** oiseaux est une boussole d'inclinaison et on a constaté que les champs RFR dans les fréquences de Larmor proches de 1,33 MHz perturbaient l'orientation **des** oiseaux dans une relation de résonance extrêmement sensible. Des cryptochromes photopigmentaires absorbant la lumière bleue ont été découverts dans la rétine des oiseaux. Les RFR semblent interférer directement avec le système primaire d'orientation des oiseaux.



processus de magnétoréception et désactivent la boussole aviaire aussi longtemps que l'exposition est présente [126, 128].

Les mammifères ont également démontré une magnétoréception indiquant des mécanismes de paires de radicaux. Malkemper et al [134] ont constaté que la souris des bois (*Apodemus sylvaticus*), qui vit en surface, construit des nids dans les secteurs nord et sud d'une arène circulaire visuellement symétrique, en utilisant le champ magnétique ambiant ou un champ tourné de 90°, ce qui indique que les animaux utilisent des indices magnétiques. Lorsque les souris ont également été testées dans le champ magnétique ambiant avec un champ magnétique de radiofréquence superposé (100 nT, balayage de fréquence de 0,9 à 5 MHz), elles ont changé de préférence, passant de la construction de nids nord-sud à la construction de nids est-ouest. Mais contrairement aux oiseaux qui se sont révélés sensibles à une exposition constante à une fréquence de Larmor de 1,33 MHz, cette gamme n'a eu aucun effet sur l'orientation des souris. La physiologie individuelle des animaux joue clairement un rôle dans la façon dont les différentes espèces réagissent. Malewski et al. [135] ont également découvert que le champ magnétique terrestre agit comme un indicateur directionnel commun chez cinq espèces de rongeurs creusant sous terre. Et pour la première fois, des recherches ont également montré que les ondes cérébrales humaines réagissent fortement aux rotations des champs - magnétiques terrestres qui sont pertinentes du point de vue écologique [136].

Nous devons mieux comprendre les processus neuronaux, cellulaires et moléculaires de la magnétoréception, car la question ultime est la suivante : étant donné l'augmentation constante de nos niveaux de CEM, ce bruit ambiant atteint-il un point de basculement au-delà duquel les espèces ne peuvent tout simplement plus "entendre" ? "Sommes-nous en train de surcharger artificiellement la capacité des espèces vivantes à fonctionner avec des capteurs biologiques naturels innés qui ont évolué au cours des âges dans un monde beaucoup plus "électro-silencieux" ? Les mécanismes d'électroréception décrits ci-dessus - les électrorécepteurs, la magnétite et les paires cryptochrones/radicalaires - permettent aux organismes vivants de détecter la présence et les changements immédiats dans des champs environnementaux de très faible intensité. Ils peuvent donc être facilement perturbés par la présence de champs artificiels de faible intensité qui ne leur sont pas familiers.

L'électrohypersensibilité chez l'homme a également montré une réponse instantanée aux CEM à faible intensité [137]. Selon Lai [77], on peut se demander si les mécanismes sous-jacents de l'électrohypersensibilité sont similaires à ceux décrits ci-dessus. L'électrohypersensibilité pourrait être un vestige des réponses évolutives des organismes vivants aux champs électromagnétiques - en particulier aux champs magnétiques - présents dans l'environnement. Les similitudes incluent la réactivité à une intensité de champ très faible ; la réponse est persistante et intégrée dans la physiologie d'un organisme ; et la réponse est immédiate et réagit rapidement aux champs. Des mécanismes de radicaux libres cryptochromes peuvent être impliqués. Certaines personnes sont plus sensibles que d'autres. Il se peut que les personnes non sensibles puissent tolérer et compenser les effets, et/ou qu'elles aient perdu leur réactivité aux champs magnétiques naturels et aient donc

deviennent aberrantes sur le plan évolutif. L'électrosensibilité est une question qui doit faire l'objet d'études plus approfondies et systématiques et qui n'a pas encore été largement mise en évidence en tant que problème de santé ou de bien-être public.

Une théorie récente de Johnsen et al. [138] postule que la magnétoréception chez les espèces animales peut être "bruyante", c'est-à-dire que le signal magnétique est faible par rapport au bruit thermique et aux autres bruits des récepteurs, par exemple. Ils supposent que la magnétoréception peut servir de source d'information redondante "au besoin", sinon les espèces animales l'utiliseraient comme source d'information principale. Ils notent que de nombreuses espèces préfèrent exploiter en premier lieu les indices non magnétiques s'ils sont disponibles, malgré le fait que le champ géomagnétique de la Terre soit omniprésent. Ils supposent que les récepteurs magnétiques ne sont pas en mesure d'obtenir instantanément des informations magnétiques très précises et que, par conséquent, une moyenne temporelle plus importante et/ou un autre traitement neuronal d'ordre supérieur des informations magnétiques

sont nécessaires. Cela peut rendre "... le sens magnétique inefficace par rapport à d'autres indices qui peuvent être détectés plus rapidement et avec moins d'efforts". "La magnétoréception peut cependant avoir été maintenue par la sélection naturelle, car le champ magnétique peut parfois être la seule source disponible d'informations directionnelles et/ou positionnelles.

Nous savons déjà que certaines espèces utilisent divers mécanismes pour détecter les CEM, comme indiqué tout au long de cet article. Avec les nouveaux facteurs environnementaux d'origine anthropique, tels que la lumière artificielle la nuit, la pollution de l'air et de l'eau, le changement climatique, qui ont un impact sur la visibilité des indices environnementaux, et l'augmentation des radiofréquences de fond, qui peuvent tous masquer les informations naturelles, la magnétoréception pourrait, en fait, devenir un outil de survie évolutif plus nécessaire au fil du temps, et non moins nécessaire.

## **Autres mécanismes d'importance biologique : ADN -effets directs et indirects**

### **(Voir Partie 2, Suppléments 1 et 2, pour les tableaux des études génétiques sur les ELF et les RFR)**

Un effet biologique important dans toute recherche en toxicologie implique la génétique de base d'un organisme exposé. Les effets génétiques consistent principalement en l'expression des gènes, les changements de conformation de la chromatine et la génotoxicité. Tous ces effets peuvent influencer les fonctions physiologiques normales. Dans le cadre de cet article, il est important de noter que les effets génétiques sont observés à des niveaux de CEM similaires à ceux de l'environnement ambiant, bien en deçà des niveaux de l'UE.

provenant des dispositifs et infrastructures de communication (voir partie 1, supplément 1).

L'ADN, l'élément de base de toute vie, est une double hélice moléculaire qui est enroulée, torsadée et pliée dans le noyau de chaque cellule vivante. Il est essentiellement identique d'une espèce à l'autre, les variations ne portant que sur le nombre et les gènes spécifiques le long des chromosomes sur les chaînes torsadées de l'ADN qui distinguent les différentes espèces et leurs caractéristiques les unes des autres. Les dommages à l'ADN observés de manière répétée chez une espèce peuvent donc être extrapolés à d'autres espèces, bien que toutes les espèces ne réagissent pas de la même manière aux stimuli externes.

De nombreux facteurs, endogènes et exogènes, endommagent l'ADN qui est ensuite normalement réparé par les enzymes de l'ADN. Mais une absence de réparation adéquate peut entraîner l'accumulation d'ADN endommagé, ce qui conduira finalement au vieillissement, à la mort cellulaire (apoptose) et/ou au cancer. Les cassures de l'ADN se produisent à la fois sous forme de simple et de double brin ; les cassures de double brin sont difficiles à réparer correctement et peuvent entraîner des mutations. Les dommages à l'ADN causés par des facteurs endogènes peuvent inclure la formation de radicaux libres provenant de la respiration et du métabolisme des mitochondries ; les facteurs exogènes incluent les produits chimiques, les rayonnements ionisants et non ionisants, et la lumière ultraviolette, entre autres [139].

Dans plusieurs études antérieures, Lai et Singh [140, 141] ont constaté des ruptures d'ADN double et simple brin dans les cellules cérébrales de rats exposés à des RFR pendant 2 heures à 2 450 MHz, et à des niveaux de DAS du corps entier de 0,6 et 1,2 W/kg. Il est intéressant de noter que les effets ont été bloqués par les antioxydants [142], ce qui suggère l'implication des radicaux libres, ce qui pourrait indiquer une cause indirecte de dommages à l'ADN (voir ci-dessous). Les effets génétiques de faible intensité énumérés dans les suppléments 1 et 2 de la partie 2 sont à 0,1 W/kg et moins. Par conséquent, les études sur les RFR de Lai et Singh [140, 141] ne sont pas incluses dans ces suppléments. Des effets très similaires ont également été constatés par Lai et Singh [143, 144] avec une exposition à un champ magnétique de 60 Hz.

Les effets génétiques des ELF ont également fait l'objet de nombreuses études. Comme l'ont indiqué Phillips et al. (139), de nombreuses études ont montré que les CEM-ELF entraînent des lésions de l'ADN (143-158). Deux études [159, 160] ont montré que les ELF affectent également les mécanismes de réparation de l'ADN. Sarimov et al. [161] ont trouvé des changements de conformation de la chromatine dans des lymphocytes humains exposés à un champ - magnétique de 50 Hz à 5-20  $\mu$ T. Les changements induits par les CEM dans les radicaux libres cellulaires sont également bien étudiés [77, 162].

D'autres ont étudié les lésions de l'ADN très tôt, mais sans disposer des tests plus sensibles d'aujourd'hui. Sarkar et al. [163] ont exposé des souris à des micro-ondes de 2 450 MHz à une densité de puissance de 1 mW/cm<sup>2</sup> pendant 2 heures par jour pendant 120, 150 et 200 jours. Ils ont constaté un réarrangement de l'ADN dans les testicules et le cerveau des animaux exposés, ce qui suggère une rupture des brins d'ADN. Phillips et al. [164] ont été les premiers à utiliser le test des comètes pour étudier deux formes différentes de signaux de téléphones cellulaires.

Les auteurs ont signalé des augmentations *et des* diminutions apparemment contradictoires des lésions de l'ADN, en fonction du type de signal étudié, ainsi que de l'intensité et de la durée de l'exposition. Ils ont émis l'hypothèse que les champs pourraient affecter les mécanismes de réparation de l'ADN dans les cellules, ce qui expliquerait les résultats contradictoires.

Dans une revue récente de la littérature sur les effets génétiques des CEM par Lai [165], l'analyse a trouvé plus d'articles de recherche rapportant des effets que pas d'effets. Pour les RFR, 224 études (65%) ont montré des effets génétiques tandis que 122 publications (35%) n'ont trouvé aucun effet. Pour les études sur les ELF et les CEM statiques, 160 études (77 %) ont trouvé des effets tandis que 43 études (23 %) n'en ont trouvé aucun.

Les recherches montrent maintenant que la durée, les - caractéristiques de signalisation et le type d'exposition sont les facteurs déterminants des dommages potentiels [164, 166], et non la démarcation traditionnelle entre les rayonnements ionisants et non ionisants. On pense que les expositions aux rayonnements non ionisants de faible intensité et de longue durée, courantes aujourd'hui, sont aussi néfastes pour les cellules vivantes que les expositions aux rayonnements ionisants de forte intensité et de courte durée. Les effets peuvent simplement prendre plus de temps à se manifester [167]. Les CEM non ionisants à des niveaux environnementaux causent effectivement des dommages génétiques. Cela a également été démontré chez les humains exposés à des niveaux environnementaux de CEM dans les gammes ELF et RFR [168-171]. Il est concevable que des effets génétiques similaires puissent se produire chez d'autres espèces vivant dans des environnements similaires.

Cet ensemble de travaux génétiques va à l'encontre du mythe omniprésent selon lequel les rayonnements non ionisants de faible niveau et de faible intensité ne peuvent pas avoir d'effets génétiques néfastes. Cette prémisse est en fait la croyance de base sur laquelle s'appuient les intérêts particuliers et les agences gouvernementales pour soutenir les normes d'exposition actuelles. Mais en fait, les systèmes biologiques sont bien plus complexes que ce que les modèles physiques peuvent prévoir [6, 8, 172]. Un nouveau modèle biologique est nécessaire car les expositions actuelles ne correspondent plus à ce cadre [173] pour les humains et la faune. Des recherches suffisantes indiquent maintenant qu'une réévaluation est nécessaire, peut-être en incluant le modèle physique même utilisé pour soutenir ces approches traditionnelles (voir partie 1).

## Mécanismes directs : L'ADN comme antenne fractale, les membranes cellulaires, les canaux ioniques.

### L'ADN comme antenne fractale

Il existe plusieurs mécanismes probables pour les dommages causés à l'ADN par les rayonnements non ionisants bien en dessous des seuils de chauffage, à la fois

directs et indirects, intracellulaires, intercellulaires et extracellulaires. Ces mécanismes s'appliquent potentiellement à toute la faune. Un mécanisme direct suppose que l'ADN lui-même agit comme une antenne fractale pour les CEM/RFR [174], capable de recevoir des informations provenant d'expositions exogènes.

Selon Blank et Goodman [174], l'ADN présente des caractéristiques électriques intéressantes en raison de sa structure unique de brins entrelacés reliés par des échelons de molécules appelées nucléotides (également appelées bases), chaque échelon étant composé de deux nucléotides (un de chaque brin) en paires liées. Les nucléotides sont maintenus ensemble par des liaisons hydrogène à proximité immédiate, ce qui entraîne une forte attraction entre les deux brins. Il y a des électrons sur les deux surfaces moléculaires, ce qui rend les nucléotides symétriques - capables de conduire un courant électronique le long de toute la chaîne d'ADN, un phénomène appelé transfert d'électrons. L'ADN est donc un conducteur électrique très efficace, ce qui n'échappe pas aux chercheurs en nanotechnologie.

L'ADN peut également agir comme une antenne fractale efficace en raison de sa forme très compacte dans le noyau cellulaire. Blank et Goodman [174] ont caractérisé les propriétés de l'ADN dans différentes plages de fréquences et ont examiné la conduction électronique dans la construction compacte de l'ADN dans le noyau. Ils ont conclu que la large gamme de fréquences des interactions observées avec les CEM est la caractéristique fonctionnelle d'une antenne fractale, et que l'ADN lui-même possède les deux caractéristiques structurelles des antennes fractales - la conduction électronique et l'autosymétrie. Ils ont noté que ces propriétés contribuent à une plus grande réactivité de l'ADN avec les CEM dans l'environnement, et que les dommages directs à l'ADN pourraient expliquer l'augmentation des cancers, ainsi que les nombreux autres effets biologiques observés avec les expositions aux CEM.

Une fractale est un motif auto-répétitif de formes parfois - géométriques, marqué par un dessin d'origine plus grand progressant vers de petits dessins identiques avec une périphérie potentiellement illimitée. Chaque partie de la forme ressemble à la forme entière. Les motifs fractals sont assez courants dans la nature, par exemple dans les coquilles d'escargots/mollusques, certaines feuilles d'arbres à feuilles caduques et aiguilles de conifères, les pommes de pin, de nombreuses plantes à fleurs, certaines écailles de reptiles, les plumes d'oiseaux et les motifs de fourrure d'animaux, les flocons de neige et les cristaux qui se forment sur les vitres froides en hiver. Les minéraux - tant inertes que biologiques - peuvent également être des fractales.

Les différentes tailles des fractales sont ce qui les rend intrinsèquement multifréquentielles. En imitant la nature, des motifs fractals répétitifs sont également conçus dans des antennes émettrices-réceptrices mécaniques qui rayonnent dans des fréquences multibandes avec plus ou moins d'efficacité [175]. Les téléphones portables, le WiFi, la télévision numérique et de nombreux autres émetteurs-récepteurs utilisent des antennes fractales pour fonctionner.

La forme torsadée complexe et la structure enroulée de l'ADN - de petites bobines enroulées dans des bobines plus grandes, ou bobines *enroulées*,

dont Blank et Goodman [174] notent que, quel que soit le degré d'agrandissement ou de réduction, la forme est la même - est la structure exacte d'une fractale qui maximise la longueur d'une antenne dans un espace compact tout en amplifiant les signaux multifréquences. Ainsi, l'ADN pourrait agir comme une fractale biologique intracellulaire cachée, capable d'interagir avec les CEM exogènes sur toute une gamme de fréquences. En fait, l'une des fonctions fondamentales de l'ADN peut être spécifiquement d'interagir avec l'énergie naturelle exogène et, en tant que telle, elle peut être plus sensible aux CEM que d'autres molécules protéiques plus grandes dans tout système vivant. Alors qu'on le croyait bien à l'abri et protégé dans le noyau, l'ADN pourrait agir comme un conducteur électrique très efficace au cœur de toute vie. Cette théorie intéressante n'a malheureusement pas été suivie par d'autres pour en vérifier la validité biologique, bien que les fractales aient été largement imitées dans la technologie.

## Membranes cellulaires/canaux ioniques

Un autre effet direct des CEM se situe au niveau de la membrane cellulaire elle-même. Si l'ADN est l'élément de base de la vie, les cellules sont l'expression architecturale complexe de l'ADN, cohérente avec les électrons. La membrane de la cellule est bien plus qu'une simple frontière. C'est plutôt l'outil d'organisation le plus important dans l'espace biologique entre les activités intracellulaires et extracellulaires, "... une fenêtre à travers laquelle un élément biologique unitaire peut sentir son environnement chimique et électrique" [176]. Et il regorge de microcourants.

La surface extérieure de la cellule contient des molécules qui reçoivent d'innombrables signaux électrochimiques provenant d'activités extracellulaires. Des portails de liaison spécifiques sur la membrane cellulaire déclenchent une séquence menant à la phosphorylation d'enzymes spécifiques qui activent les protéines pour le "travail" cellulaire. Cela inclut tout, du traitement de l'information dans le système nerveux central aux fonctions mécaniques telles que les mouvements musculaires, en passant par le métabolisme des nutriments et le travail de défense du système immunitaire, entre autres la production d'enzymes, d'hormones, d'anticorps et de neurotransmetteurs [177]. Des voies complexes de signalisation par microcourant existent de l'extérieur de la cellule vers l'intérieur via des particules protéiques intramembranaires dans la membrane plasmique phospholipidique. Elles transmettent des informations sur les stimuli externes à l'intérieur de la cellule pour permettre le fonctionnement cellulaire.

La membrane cellulaire possède également des propriétés électriques. Un microcourant se déplace constamment de l'intérieur vers l'extérieur et vice versa de la membrane cellulaire. Selon Adey et Sheppard [176], certaines de ces propriétés influencent les protéines qui forment les canaux membranaires commandés par le voltage, ce qui est l'une des façons dont les cellules contrôlent le flux ionique et le potentiel électromagnétique de la membrane, essentiels à la vie. Il existe

des fenêtres spécifiques qui réagissent en fonction des différences de fréquence, d'amplitude et de durée, indiquant un caractère non linéaire et non équilibré des expositions exogènes sur les cellules [177-185].

Certains champs pulsés sont plus actifs sur le plan biologique que les champs non pulsés et différentes formes de pulsation créent également différents effets. Dès 1983, Goodman et al [186] ont constaté que les champs électromagnétiques faibles pulsés modifiaient les processus biologiques via la transcription de l'ADN lorsqu'une impulsion unique répétitive et un train d'impulsions répétitif étaient utilisés. L'impulsion unique a augmenté l'activité spécifique de l'ARN messager après 15 et 45 minutes, tandis que le train d'impulsions n'a augmenté l'activité spécifique qu'après 45 minutes d'exposition. La technologie numérique simule les impulsions et constitue la forme la plus courante d'exposition environnementale aujourd'hui.

Les canaux ioniques calciques cellulaires suscitent depuis longtemps de l'intérêt et peuvent être des cibles particulièrement sensibles aux CEM en raison de l'augmentation possible du flux de calcium à travers les canaux, ce qui peut entraîner des réponses secondaires médiées par la stimulation par  $\text{Ca}^{2+}$  /calmoduline de la - synthèse de l'oxyde nitrique, de la signalisation calcique, de l'augmentation de l'oxyde nitrique (NO), de la signalisation de l'oxyde nitrique, du peroxyde nitrique, de la formation de radicaux libres et du stress oxydatif - dont beaucoup ont des implications pour l'ADN, comme l'a supposé Pall [187]. Le calcium est essentiel à la transduction des signaux entre les cellules et joue un rôle important dans le métabolisme, la régénération des os, des cellules et du sang, la production d'hormones et les neurotransmissions, entre autres. Ces réponses calciques cellulaires aux CEM indiquent un changement artificiel dans les processus de signalisation au niveau de la - membrane cellulaire - considérée comme un standard pour l'information entre l'environnement extérieur et les activités intracellulaires qui guident la différenciation cellulaire et contrôlent la croissance [188].

Pall [187] a cité 23 études sur les effets des canaux calciques dépendant du voltage (VGCC) et a noté que les mécanismes non thermiques étaient les plus probables puisque de nombreuses études ont montré que les effets étaient bloqués par les bloqueurs de canaux calciques (largement prescrits pour les irrégularités cardiaques n'ayant rien à voir avec les problèmes thermiques). Pall [189] a noté que de nombreuses autres études ont montré que les CEM modifiaient les flux de calcium et la signalisation calcique intracellulaire. Il a émis l'hypothèse que les altérations de l'activité calcique intracellulaire peuvent expliquer certains des innombrables effets biologiques observés avec l'exposition aux CEM, y compris le stress oxydatif, les ruptures d'ADN, certains cancers, l'infertilité, les altérations hormonales, les irrégularités cardiaques et divers effets neuropsychiatriques. Ces effets doivent être étudiés et vérifiés plus avant.

Il y a beaucoup à apprendre sur les effets du calcium car les études sont contradictoires. Les modifications des radicaux libres (voir ci-dessous) affectent également le métabolisme du calcium. Il existe davantage d'études montrant les effets des CEM sur les radicaux libres que les modifications du calcium. Le calcium active le radical libre de l'oxyde nitrique.

mais il n'existe que peu d'études sur cette voie à la suite d'une exposition aux CEM - moins de 5 % des études sur les changements oxydatifs liés aux CEM portent sur les mécanismes de l'oxyde nitrique. Il est également intéressant de noter que la densité de puissance et les fenêtres de fréquence ont été observées dans les premières recherches à des incréments harmoniques croissants le long du spectre électromagnétique, en commençant par les bandes ELF [190-195]. Les effets observés étaient assez spectaculaires dans ce que les chercheurs ont décrit comme un efflux de calcium ou un "déversement" des cellules. Les effets les plus spectaculaires ont été observés à 180 Hz dans la gamme ELF. Cela semble contredire les travaux de Pall [189] cités ci-dessus, car l'augmentation de l'efflux de calcium est à l'opposé de ce que l'hypothèse de Pall aurait prédit, par exemple, l'**afflux** de calcium. Avec plus de recherche, les effets d'influx et d'efflux de calcium peuvent être trouvés comme étant causés par différentes variables et/ou expositions aux CEM.

En outre, les caractéristiques de signalisation exogène sont également importantes pour la réaction des cellules aux gammes ELF et RFR. S'appuyant sur les travaux qui ont démontré que les ondes porteuses de 50 et 147 MHz, lorsqu'elles sont modulées en amplitude de manière sinusoïdale à 16 Hz ELF dans des tissus cérébraux *in vitro* de poussins [190, 191] et dans des modèles de cerveau de chat éveillé vivant [196], créent des fenêtres de fréquence pour l'efflux de calcium, Blackman et al [194] ont également constaté que les *caractéristiques* de signalisation étaient également importantes. Les recherches ont montré que l'efflux de calcium ne se produisait que lorsque les échantillons de tissus étaient exposés à des plages d'intensité spécifiques d'une onde porteuse modulée en ELF ; les ondes porteuses non modulées n'affectaient pas l'efflux ionique. Blackman et al. [194] ont également écrit que les cellules peuvent être capables de démoduler les signaux. Les - auteurs ont signalé que les champs sinusoïdaux de 16 Hz, en l'absence d'une onde porteuse, modifiaient le taux d'efflux des ions calcium et ont montré une augmentation de l'efflux des ions calcium en fonction de la fréquence dans les plages 5-7,5 V/m et 35-50 V/m (champ incident de crête à crête dans l'air), sans aucune augmentation dans les plages 1-2, 10-30 et 60-70 V/m. Cet ensemble de travaux indique que les cellules vivantes interagissent avec les champs exogènes et sont capables d'en prendre la direction de manière beaucoup plus complexe qu'on ne l'avait imaginé, à des intensités à peine supérieures aux niveaux de fond. Ces travaux pourraient être particulièrement importants pour les nouvelles technologies qui transforment des fréquences ELF auparavant câblées en applications sans fil, telles que l'"électricité sans fil" pour charger les voitures électriques.

Blackman et al [197] ont découvert pour la première fois un lien entre les ELF/EMF étudiés et la densité du champ géomagnétique local naturel (LGF) dans la production d'une réponse biologique. Les modifications de l'efflux de calcium pourraient être manipulées en contrôlant le champ magnétique local en même temps que les expositions aux ELF et aux RF-EMF. Dans un champ géomagnétique local d'une densité de 38  $\mu\text{T}$ , il a été démontré que les signaux électromagnétiques de 15 et 45 Hz induisaient un efflux d'ions calcium à partir des tissus exposés, alors que les signaux de 1 et 30 Hz ne le faisaient pas. Bawin et



Adey [190] a constaté une réduction de l'efflux lors de l'utilisation d'un champ électrique ; Blackman et al. [194] ont constaté une augmentation lors de l'utilisation d'un champ électromagnétique, identifiant/isolant ainsi pour la première fois l'importance de la composante champ magnétique dans les paramètres d'exposition. En s'appuyant sur les plages de fenêtres mentionnées ci-dessus, Blackman et al. [197] ont démontré que le signal 15-Hz amélioré induit par le champ d'efflux de calcium pouvait être rendu inefficace lorsque le LGF est réduit à 19  $\mu$ T avec des bobines de Helmholtz. De plus, le signal inefficace de 30-Hz devenait efficace lorsque le LGF était modifié à 25,3  $\mu$ T ou à **+76  $\mu$ T**. *Les résultats ont démontré que l'intensité nette du champ géomagnétique local est un cofacteur important de la réponse biologique et une variable potentiellement cachée dans la recherche.* Les résultats, ont-ils noté, semblent décrire une relation de type résonance dans laquelle la fréquence du champ électromagnétique peut induire un changement dans l'efflux de calcium proportionnel à la densité du LGF (voir Liboff [198, 199] ci-dessous pour plus de détails).

L'essentiel est que des changements de cette ampleur au niveau cellulaire - que ce soit directement sur l'ADN dans le noyau ou par l'intermédiaire de canaux commandés par tension à la membrane cellulaire - peuvent avoir des effets directs sur l'ADN au sein d'une même espèce et entre espèces. Les preuves citées ci-dessus illustrent le degré, la probabilité et la variété des impacts des CEM directement sur la physiologie cellulaire qui sont capables d'affecter l'ADN dans tous les systèmes vivants d'une myriade de façons.

## Mécanismes indirects : radicaux libres, protéines de stress, résonance, champs géomagnétiques de la Terre.

### Radicaux libres

Un mécanisme indirect, ou secondaire, d'endommagement de l'ADN serait la formation de radicaux libres dans les cellules, qui est le mécanisme le plus régulièrement rapporté avec les expositions aux ELF et aux RFR dans de nombreuses conditions différentes dans les systèmes biologiques. Selon Phillips et al. [139], les radicaux libres peuvent également interagir avec des métaux comme le fer [142, 151, 152, 158] et jouer un rôle dans les effets génotoxiques de ce que l'on appelle l'effet Fenton - un processus "... catalysé par le fer dans lequel le peroxyde d'hydrogène, un produit de la respiration oxydative dans les mitochondries, est converti en radicaux libres hydroxyles, qui sont des molécules très puissantes et cytotoxiques" [139].

L'importance des processus de radicaux libres peut - éventuellement répondre à certaines questions concernant la façon dont les CEM interagissent avec les systèmes biologiques. Il existe environ 200 à 300 articles montrant les effets des CEM sur les radicaux libres [77, 168, 200]. Radicaux libres

Les radicaux libres sont des composés importants impliqués dans de nombreuses fonctions biologiques qui affectent de nombreuses espèces. L'augmentation des radicaux libres explique les effets des dommages causés aux macromolécules telles que l'ADN, les protéines et les lipides membranaires, l'augmentation des protéines de choc thermique, les maladies neurodégénératives et bien d'autres encore.

Yakymenko et al. [168] ont publié une étude sur le stress oxydatif dû aux RFR de faible niveau et ont découvert des effets moléculaires induits dans les cellules vivantes, notamment une activation importante des voies clés générant des espèces réactives de l'oxygène (ROS), une activation de la peroxydation, des dommages oxydatifs dans l'ADN et des changements dans l'activité des enzymes antioxydantes. Sur 100 études évaluées par des pairs, 93 ont confirmé que les RFR induisaient des effets oxydatifs dans les systèmes biologiques et que leur implication dans les voies de signalisation cellulaire pouvait expliquer une gamme élevée d'effets biologiques/sanitaires pathogènes. Ils ont conclu que les RFR de faible intensité devraient être reconnus comme l'un des principaux mécanismes de l'activité biologique des rayonnements non ionisants. Dans une étude de suivi, Yakymenko et al. [200] ont étudié les effets oxydatifs et mutagènes des RFR GSM de 1 800 MHz de faible intensité sur des embryons de cailles en développement exposés *in ovo* (0,32  $\mu$ W/cm<sup>2</sup>, 48 s On, 12 s Off) pendant 5 jours avant et 14 jours pendant la période d'incubation. Ils ont constaté des effets oxydatifs statistiquement significatifs dans les cellules embryonnaires, notamment une multiplication par deux du taux de génération de superoxyde, une augmentation de 85 % de la génération d'oxyde d'azote et des dommages oxydatifs à l'ADN jusqu'à deux fois les niveaux accrus de 8-oxo-dG dans les cellules de poussins âgés d'un jour. L'exposition aux RFR a presque doublé la mortalité embryonnaire et était statistiquement significative. Ils ont conclu que de telles expositions devraient être reconnues comme un facteur de risque pour les cellules vivantes, y compris l'intégrité embryonnaire.

Lai [77] a passé en revue les champs magnétiques statiques ELF-EMF et a constaté que les changements dans les activités des radicaux libres sont l'un des effets les plus constants. Ces modifications peuvent affecter de nombreuses fonctions physiologiques, notamment les lésions de l'ADN, le système immunitaire et la réponse inflammatoire, la prolifération et la différenciation cellulaires, la cicatrisation des plaies, les activités électriques neurales et le comportement. Étant donné que de nombreuses espèces se sont révélées sensibles aux champs géomagnétiques statiques naturels et qu'elles utilisent ces informations pour leur survie, certaines espèces sauvages peuvent également être affectées par les altérations des radicaux libres dues aux expositions anthropiques. Mais Lai [77] a noté les contradictions inhérentes aux changements induits par les CEM dans les radicaux libres, en particulier sur la prolifération et la différenciation des cellules puisque ces processus peuvent affecter le développement du cancer ainsi que la croissance et le développement. Les changements induits par les radicaux libres peuvent donc avoir des applications thérapeutiques en tuant les cellules cancéreuses via la génération du radical libre hydroxyle hautement cytotoxique par la réaction de Fenton (mentionnée ci-dessus), créant ainsi une thérapie non invasive à faible effet secondaire contre le cancer.

## Protéines de stress

Un autre effet indirect potentiel de l'ADN est la synthèse des protéines, nécessaire au fonctionnement de toutes les cellules. Un animal vivant transforme les protéines animales et végétales qu'il ingère en d'autres protéines nécessaires aux activités de la vie - les anticorps, par exemple, sont une protéine fabriquée par lui-même. L'ADN est essentiel à la synthèse des protéines et peut créer chez l'homme environ 25 000 types différents de protéines avec lesquelles l'organisme peut ensuite créer 2 000 000 de types afin de fonctionner pleinement.

Il existe de nombreuses classes de protéines différentes. Il s'agit notamment des protéines de stress stimulées par des facteurs environnementaux potentiellement dangereux pour aider les cellules à faire face et à réparer les dommages dus à des facteurs tels que des températures élevées, des changements dans les niveaux d'oxygène, l'exposition à des produits chimiques/métaux lourds, des infections virales/bactériennes, la lumière ultraviolette et d'autres expositions à des rayonnements ionisants et non ionisants [124].

La présence de protéines de stress indique une action réparatrice saine de la part d'un organisme et est considérée comme bénéfique jusqu'à un certain point en tant que mécanisme de protection. Selon Blank et Goodman [201], "les 20 différentes familles de protéines de stress sont conservées au cours de l'évolution et agissent comme des "chaperons" dans la cellule lorsqu'elles "aident" à réparer et à replier les protéines endommagées et à les transporter à travers les membranes cellulaires. L'induction de la réponse au stress implique l'activation de l'ADN. "Les protéines de stress sont également considérées comme un critère permettant de déterminer ce que les cellules vivantes ressentent comme un stress nécessitant des mesures correctives, ce qui n'est pas toujours évident, notamment dans le cas d'expositions environnementales subtiles telles que les CEM de faible niveau, à peine supérieures aux niveaux naturels.

La question de savoir si un effet est thermique ou non thermique, s'il est néfaste ou simplement observé biologiquement, fait l'objet d'un débat acharné depuis des décennies ; c'est pourquoi les voies de l'ADN chauffé par les tissus sont également au cœur de cet article. La chaleur en tant que facteur de stress cellulaire a été observée pour la première fois dans les années 1960 par le chercheur italien Ferruccio Ritossa chez des mouches à fruits (*D. melanogaster*), lorsque des températures expérimentales ont été accidentellement augmentées de quelques degrés et qu'il a observé des chromosomes agrandis à des endroits particuliers. (Les *drosophiles* sont souvent utilisées dans la recherche car elles ne possèdent que quatre paires de chromosomes, sont relativement faciles à travailler, ont un cycle de reproduction rapide et pondent de nombreux œufs). Comme cité dans Blank [124], l'observation de Ritossa a été mieux comprise et ses effets ont été observés pendant des décennies sur des animaux, des plantes et des cellules de levure. "Des recherches approfondies ont établi que la réponse au choc thermique conduisait à la - formation d'une classe unique de protéines - les protéines de choc thermique (HSP) - qui réparent d'autres protéines contre des dommages thermiques potentiellement mortels, et qui aident les cellules à mieux tolérer la chaleur. La recherche a ensuite prouvé que les cellules

produisent d'autres protéines similaires à divers facteurs de stress, désormais généralement appelées protéines de stress, mais la plupart sont encore classées dans la catégorie "HSP" de la démarcation originale.

Goodman et Blank [202, 203] ont découvert que les CEM sont un facteur de stress cellulaire même à faible intensité en l'absence de températures élevées. Ils ont constaté que les modèles de distribution des protéines synthétisées en réponse aux CEM-CE ressemblaient à ceux du choc thermique avec la même séquence de changements, même si l'énergie des deux stimuli différait de plusieurs ordres de grandeur. Leurs résultats indiquent que les CEM-ELF stimulent une voie d'expression génique similaire à celle du choc thermique et qu'ils sont eux-mêmes un facteur de stress cellulaire. Il est particulièrement important de noter que la surexpression des gènes de stress est présente dans un certain nombre de tumeurs humaines et est caractéristique de - diverses néoplasies [202]. Une augmentation des protéines de stress est observée dans de nombreuses études de modèles animaux concernant la faune.

Blank et Goodman [201] ont également noté que les CEM et les RFR activent tous deux la réponse de stress cellulaire malgré la grande différence d'énergie entre eux ; que les mêmes voies cellulaires répondent dans les deux gammes de fréquences ; et que les modèles suggèrent que les CEM peuvent interagir directement avec les électrons de l'ADN. Ils notent que les CEM de faible énergie interagissent avec l'ADN pour induire la réponse au stress, tandis que l'énergie accrue des RFR peut entraîner des ruptures de brins d'ADN. *Ainsi, cela fait de la réponse au stress une cause directe et indirecte de dommages à l'ADN dépendant de la fréquence - une découverte importante.* Ils ont conclu que les normes d'exposition ne devraient pas être fondées sur la seule intensité de l'exposition mais sur les réponses biologiques bien avant que les seuils thermiques ne soient atteints ou franchis.

## Résonance et champs géomagnétiques

Il existe d'autres moyens importants, directs et indirects, par lesquels les CEM interagissent avec les systèmes biologiques et les affectent, y compris diverses formes de résonance - cyclotron, paramagnétique électronique, nucléaire et stochastique - ainsi que par le biais de matériaux biologiques intrinsèques tels que la magnétite que l'on trouve dans le cerveau des oiseaux et de nombreuses autres espèces (voir ci-dessous).

La résonance est le phénomène qui se produit lorsqu'un certain aspect d'une force (comme une onde de fréquence) correspond à une caractéristique physique (comme une cellule ou un organisme vivant entier) et que la puissance inhérente à la force est transférée à l'objet physique, le faisant résonner ou vibrer. À l'intérieur de l'objet, la résonance s'auto-entretient. L'exemple classique est celui d'un chanteur d'opéra qui frappe le do aigu en présence d'un gobelet de cristal pendant une période prolongée jusqu'à ce qu'il se brise.

À la suite des travaux de Blackman et al. [197], qui ont constaté que les champs géomagnétiques locaux (LGF) de la Terre pouvaient influencer les ions calcium se déplaçant dans les canaux membranaires (cf.

ci-dessus), Liboff [198, 199] a proposé que la résonance cyclotronique soit un mécanisme plausible pour coupler les interactions entre le LGM et les cellules vivantes. Liboff a trouvé que la résonance cyclotronique était cohérente avec d'autres indications qui montraient que de nombreux canaux membranaires avaient des configurations hélicoïdales ; que le modèle pouvait s'appliquer à d'autres composants chargés circulant dans la cellule ; et que la résonance cyclotronique pouvait conduire à un transfert direct d'énergie électromagnétique résonante vers des compartiments cellulaires sélectionnés.

Toute résonance est basée sur une *relation*. La résonance cyclotronique est basée sur la relation entre un champ magnétique constant et un champ électrique ou magnétique oscillant (variant dans le temps) qui peut affecter le mouvement des particules chargées comme les ions, certaines molécules, les électrons, les noyaux atomiques ou l'ADN dans les tissus vivants. Les systèmes vivants sont remplis de particules chargées nécessaires à la vie, notamment des ions calcium, sodium, lithium et potassium qui traversent tous la membrane cellulaire et sont capables d'affecter l'ADN. La résonance cyclotronique se produit lorsqu'un ion est exposé à un champ magnétique constant (comme celui de la Terre), ce qui l'amène à se déplacer sur une orbite circulaire à angle droit par rapport au champ. La vitesse de l'orbite est déterminée par la charge et la masse de l'ion et par la force du champ magnétique. Si l'on ajoute un champ électrique qui oscille exactement à la même fréquence et qui est également à angle droit par rapport au champ magnétique, l'énergie sera transférée du champ électrique à l'ion qui se déplacera plus rapidement. Le même effet peut être créé en appliquant un champ - magnétique supplémentaire parallèle au champ magnétique constant. Ce phénomène est important car il fournit un mécanisme plausible pour expliquer comment les cellules vivantes interagissent avec les champs naturels et artificiels, et comment des niveaux extrêmement faibles de CEM peuvent créer une activité biologique importante lorsqu'ils sont concentrés sur des particules ioniques. Elle indique également la capacité des systèmes vivants à démoduler - ou à s'orienter à partir de - certains aspects de l'information électromagnétique provenant d'expositions naturelles et artificielles [7]. La résonance ne doit pas être sous-estimée. Elle s'applique à toutes les fréquences et ne repose pas uniquement sur la densité de puissance.

Une autre relation énergétique subtile en biologie est appelée résonance stochastique. Il a été établi qu'elle joue un rôle important dans la manière dont diverses espèces interagissent avec leur environnement naturel, parfois même pour leur survie. La résonance stochastique est un phénomène par lequel un signal inférieur à la normale peut être amplifié par l'ajout de signaux de bruit blanc à large spectre. Les fréquences du bruit blanc qui correspondent aux fréquences du signal original entreront en résonance les unes avec les autres et amplifieront le signal original tout en n'amplifiant pas le reste du bruit blanc. Cette augmentation de ce que l'on appelle le rapport signal/bruit rend le signal original plus proéminent. Certains poissons, par exemple, peuvent mieux "entendre" leurs prédateurs dans le bruit de l'eau courante que dans l'eau calme grâce à la résonance stochastique (voir "Poissons" ci-dessous).

Le rapport signal/bruit a été un aspect important de la recherche sur les CEM. Certains scientifiques ont longtemps pensé que des expositions à des énergies inférieures au rapport signal/bruit naturel du corps ne pouvaient pas endommager les tissus vivants. Mais les recherches les plus récentes, qui mettent en évidence les effets des CEM de faible intensité sur l'ADN, indiquent que de nombreuses variables affectent les processus biologiques, souvent de manière non linéaire, bien en deçà du rapport signal/bruit. Certaines des recherches les plus pointues - visant à traiter les malformations congénitales *in utero* et la régénération des membres chez l'adulte - sont menées en manipulant la charge électrique à travers les membranes cellulaires (appelée potentiel de membrane) par la manipulation intentionnelle des gènes qui forment les canaux ioniques. Pai et al. [204] ont découvert qu'en plaçant des canaux ioniques dans les cellules pour augmenter ou diminuer le voltage, ils pouvaient contrôler la taille et l'emplacement du cerveau chez les grenouilles africaines à griffes embryonnaires (*Xenopus laevis*), démontrant ainsi l'importance des microcourants sur le potentiel membranaire dans la croissance et le développement. Le groupe de recherche a également étudié la bioélectricité endogène sur le modelage du cerveau des grenouilles à griffes pendant l'embryogenèse, en remarquant que les embryons précoces de grenouilles présentent une hyperpolarisation caractéristique des cellules bordant le tube neural. La perturbation de ce gradient spatial du potentiel transmembranaire ( $V_{mem}$ ) a diminué ou éliminé l'expression des marqueurs cérébraux précoces chez les grenouilles, entraînant des anomalies anatomiques, notamment l'absence ou la malformation de certaines régions du cerveau. Cet effet était médié par la signalisation calcique liée au voltage et par la communication gap-junctionnelle. Les auteurs ont émis l'hypothèse que la modulation du voltage est une stratégie d'intervention possible dans certaines catégories de malformations congénitales chez l'homme, mais ils n'ont pas fait le saut vers des dommages environnementaux potentiels pour d'autres espèces à partir de telles expositions ambiantes.

En général, qu'il s'agisse d'effets directs, indirects ou synergiques, pour comprendre les effets ambiants sur la faune, il faut aussi savoir si les effets sont cumulatifs, quels mécanismes compensatoires une espèce peut avoir, et quand ou si l'homéostasie se détériorera jusqu'au point de non-retour [205]. En examinant les contaminants environnementaux, nous nous sommes historiquement concentrés sur les produits chimiques pour leurs effets directs et indirects tels que la perturbation endocrinienne. Mais la manifestation biologique primaire est plus physique que chimique puisque la seule chose qui distingue un produit chimique d'un autre sur le tableau périodique est la quantité d'électrons échangés vers le haut et vers le bas sur l'échelle. Les produits chimiques sont en fait des manifestations secondaires des principes atomiques initiaux, et non l'inverse. De plus, les effets synergiques des champs naturels de la Terre ne peuvent plus être considérés comme un artefact intéressant qui n'est pas biologiquement actif ou pertinent. Tous les systèmes vivants sont avant tout des expressions de l'énergie biologique dans différents états de relation.

Pour un tableau d'autres études sur les effets de faible niveau sur l'ADN, voir la partie 2, suppléments 1 et 2.

## Ce que montrent les études

La littérature sur les effets des CEM sur les espèces non humaines est abondante et remonte au moins aux années 1930, avec des méthodes d'enquête modernes. Après tout, cela fait des décennies que nous utilisons des modèles animaux, végétaux et microbiens dans nos expériences. En fait, il se peut que nous en sachions *moins* sur les effets sur les humains que sur les autres espèces.

Dans ce document, nous nous sommes concentrés sur les expositions courantes dans l'environnement actuel. Dans la partie 1, Niveaux de fond croissants, nous avons défini les RFR de faible niveau comme une densité de puissance de  $0,001 \text{ mW/cm}^2$  ( $1 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ ), ou un DAS de  $0,001 \text{ W/kg}$ . Les suppléments 3 et 4 de la partie 2 - contiennent des tableaux complets avec des études pertinentes qui s'appliquent à la faune et à la flore, respectivement. Les sections qui suivent dans la partie 2 sur les espèces individuelles comprennent des études sélectionnées d'un intérêt particulier pour la façon dont les CEM se couplent avec la faune et la flore et peuvent les affecter. Dans la plupart des études, comme illustré dans la partie 2, supplément 3, l'intensité du CEM incident était indiquée en  $\mu\text{W/cm}^2$  ou en V/m. Pour être cohérents dans l'ensemble du document, nous avons converti l'intensité dans les études en  $\mu\text{W/cm}^2$ . Cependant, une telle conversion (c'est-à-dire V/m en  $\mu\text{W/cm}^2$ ) tend à surestimer le niveau d'exposition et ne représente pas l'ensemble de la situation. Par conséquent, lorsque les études ont fourni la quantité d'énergie absorbée, par exemple le débit d'absorption spécifique (DAS), elles ont également été incluses dans le supplément 3 (en W/kg). De très faibles niveaux d'absorption d'énergie ont montré des effets chez tous les organismes vivants étudiés.

Levitt et Lai [167] ont signalé de nombreux effets biologiques des RFR à de très faibles intensités et à des DAS comparables aux expositions en champ lointain dans un rayon de 60-150 m (197-492 ft) des tours de téléphonie cellulaire. Il s'agissait d'études *in vivo* et *in vitro* sur les RFR de faible intensité. Les effets comprenaient des - changements génétiques, de croissance et de reproduction ; une perméabilité accrue de la barrière hémato-encéphalique ; des changements dans les protéines de stress ; des réponses comportementales ; et des altérations moléculaires, cellulaires, génétiques et métaboliques. Tous ces effets sont applicables aux oiseaux migrateurs, aux mammifères, aux reptiles et à d'autres espèces sauvages, aux communautés végétales et aux expositions en champ lointain en général. (Une mise à jour de ce tableau figure dans le supplément 3 de la partie 2.) Il est évident que les niveaux environnementaux de RFR peuvent provoquer des effets biologiques/sanitaires sur les organismes vivants. Bien qu'il n'y ait pas suffisamment de données sur les effets de faible intensité des CEM-ELF statiques pour formuler un tableau séparé, certains effets des CEM-ELF statiques de faible intensité sont également décrits tout au long de ce document. Les effets génotoxiques des ELF se trouvent dans la partie 2, supplément 2, et les ELF dans la flore sont également répertoriés séparément dans la partie 2, supplément 4.

Les effets, cependant, ne se transposent pas facilement du - laboratoire au terrain. Cucurachi et al. [31] ont fait état de 113 cas d'infection par le VIH.

avec un nombre limité d'études écologiques. La majorité de ces études ont été menées en laboratoire sur des embryons ou des œufs d'oiseaux, des petits rongeurs et des plantes. Dans 65% des études, les effets des CEM (50% des études sur les animaux et environ 75% des études sur les plantes) ont été constatés à la fois à des intensités élevées et faibles, ce qui indique des effets potentiels étendus. Mais le manque de normalisation entre les études et la taille limitée de l'échantillonnage ont rendu difficile la généralisation des résultats d'un organisme à un écosystème. Les chercheurs ont conclu qu'en raison du nombre de variables, aucune relation dose-réponse claire n'a pu être déterminée. Néanmoins, les effets de certaines études étaient bien documentés et peuvent servir de prédicteurs des effets sur les oiseaux migrateurs sauvages et d'autres espèces sauvages.

Comme indiqué ailleurs dans ce document, les organismes vivants peuvent détecter et réagir à des champs électromagnétiques de très faible intensité nécessaires à leur survie, comme le montrent, par exemple, les études de Nicholls et Racey [206, 207] sur les chauves-souris et bien d'autres. Les chauves-souris connaissent déjà de graves problèmes en Amérique du Nord en raison du syndrome du nez blanc et des collisions avec les pales des éoliennes commerciales. En raison de l'utilisation accrue des radars de poursuite pour l'étude des oiseaux et des chauves-souris, les impacts ne feront probablement qu'augmenter [22, 23]. La présence de faibles niveaux de radiofréquences provenant des radars de poursuite pourrait nuire à l'activité de recherche de nourriture des chauves-souris, ce qui, à son tour, pourrait affecter la composition des populations d'insectes à proximité. De nombreux insectes, dont les abeilles domestiques (*Apis mellifera* var) et les papillons, dépendent également des champs électromagnétiques de la Terre pour s'orienter et chercher leur nourriture. La présence de RFR exogènes peut perturber ces fonctions. Ceci est particulièrement pertinent pour les insectes pollinisateurs, tels que les abeilles et les papillons. Les pollinisateurs sont essentiels à la production de cultures commerciales destinées à la consommation humaine, notamment les amandes, les pommes, les poires, les cerises, de nombreuses cultures de baies, les agrumes, les melons, les tomates, les tournesols, le soja et bien d'autres encore. L'effet perturbateur le plus fort sur les insectes pollinisateurs se produit à 1,2 MHz, connue sous le nom de fréquence de Larmor [208], qui est liée à la résonance des paires de radicaux et à la formation de radicaux superoxyde. Il s'agit d'une indication importante que les effets des RFR dépendent de la fréquence.

Lai [77], citant Shepherd et al. [209], note que les CEM peuvent perturber le sens de la direction chez les insectes. Le fait que de nombreux animaux soient capables de différencier les pôles nord et sud d'un champ magnétique, connu sous le nom de boussole de polarité [68, 73, 134, 210, 211], indique qu'ils sont susceptibles de voir ce sens important perturbé. Ces caractéristiques de la boussole de polarité confèrent aux organismes une compétitivité en matière de survie, mais sont particulièrement préoccupantes car les signaux directionnels peuvent être facilement perturbés par les CEM d'origine humaine [69, 134, 212].

La migration des oiseaux dépend également d'une détection et d'une orientation appropriées aux champs électromagnétiques naturels. Une étude réalisée par Engels et al. [213] a montré que le bruit magnétique de 2 kHz à 9 MHz (dans la gamme de transmission radio AM) pouvait



perturbent l'orientation de la boussole magnétique chez le merle d'Europe (*Erithacus rubecula*), un oiseau migrateur. Cette perturbation peut se produire à un niveau étonnamment bas de 0,01 V/m, soit 0,0000265  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Des effets similaires d'interférences RFR sur la magnétoréception ont également été rapportés chez un oiseau chanteur migrateur nocturne [214] et chez le merle d'Europe [126]. La migration est déjà une activité éprouvante et dangereuse pour les oiseaux ; ajouter un autre impact négatif potentiel sur la survie des oiseaux est troublant.

Lai [77] a également noté qu'un autre élément à prendre en compte est le "comportement de retour au berceau" de certains animaux qui retournent à leur lieu de naissance pour se reproduire. Il s'agit notamment des tortues de mer [89], des anguilles [90] et des saumons [91]. Les nouveau-nés de ces animaux gardent en mémoire l'intensité et l'angle d'inclinaison du champ - géomagnétique local, qu'ils utilisent ensuite pour localiser leur lieu de naissance lorsqu'ils reviennent se reproduire. Il existe des indications selon lesquelles les CEM d'origine humaine peuvent fausser cette mémoire d'empreinte pour localiser le site (voir "Poissons" et "Tortues" ci-dessous). Cela a des conséquences importantes pour la survie de certaines espèces, car cela interrompt leur processus de reproduction.

Il est clair que des effets biologiques peuvent se produire à des niveaux de RFR d'origine humaine dans notre environnement actuel, ce qui pourrait altérer des écosystèmes délicats en raison d'un danger largement méconnu.

## Mammifères

La majorité des recherches en laboratoire sur les CEM, dont certaines remontent aux années 1800, ont été menées sur diverses espèces de mammifères, notamment des souris, des rats, des lapins, des singes, des porcs et des chiens. (Les deuxième et troisième modèles les plus utilisés sont respectivement sur les insectes et les levures). Ainsi, avec des degrés de confiance variables, nous en savons beaucoup sur la façon dont l'énergie se couple avec les espèces de mammifères de laboratoire et les affecte sur une gamme de fréquences. Toutefois, ces données ne sont pas automatiquement transférées au même niveau de confiance en ce qui concerne la manière dont ce vaste corpus de recherche s'applique à la faune, y compris aux espèces mammifères.

Il y a malheureusement peu de recherches sur le terrain concernant les effets des CEM sur la faune. On trouvera cependant ci-dessous de nombreuses études sur les indicateurs potentiels. Les effets observés concernent la reproduction, le comportement, l'accouplement, la croissance, les hormones, les cellules, etc.

## Rongeurs

Les rongeurs sont l'espèce de mammifère la plus fréquemment utilisée dans les recherches en laboratoire, à des fréquences et des intensités diverses. Bien que les études ne soient pas cohérentes, il existe

assez d'indications troublantes concernant les implications potentielles des CEM pour la faune.

Dans le domaine de la RFR, plusieurs études ont été consacrées à la fertilité et à d'autres questions dans des modèles de rongeurs, avec des citations trop nombreuses pour être mentionnées ici - voir La Vignera et al. [215] et Merhi [216] - mais certaines d'entre elles se distinguent par leur pertinence potentielle pour la faune sauvage.

Magras et Xenos [217] ont étudié les effets des RFR sur le développement prénatal des souris, en utilisant des mesures de RFR et des expériences *in vivo* à plusieurs endroits près d'un "parc d'antennes", avec des densités de puissance de RFR mesurées entre 0,168 et 1,053  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Divisées en deux groupes, 12 paires de souris ont été placées dans des emplacements de différentes densités de puissance, et accouplées cinq fois. Cent dix-huit nouveau-nés ont été recueillis, mesurés, pesés et examinés au niveau macro et microscopique. À chaque génération, les chercheurs ont constaté une diminution progressive du nombre de nouveau-nés par mère, aboutissant à une infertilité irréversible. Cependant, la longueur croupe-couronne, le poids corporel et le nombre de vertèbres lombaires, sacrées et coccygiennes ont été améliorés au cours du développement prénatal de certains nouveau-nés. Le RFR était inférieur aux normes d'exposition et comparable aux expositions aux champs lointains que les souris pourraient subir dans la nature.

Aldad et al [218] ont étudié en laboratoire l'exposition aux RFR des téléphones portables (800-1 900 MHz, DAS de 1,6 W/kg) dans des modèles de souris *in-utero* et les effets sur le neurodéveloppement et le comportement. Ils ont constaté des effets comportementaux significatifs à l'âge adulte chez les souris exposées prénatalement par rapport aux témoins. Les souris exposées *in-utero* étaient hyperactives, présentaient une diminution de la mémoire et de l'anxiété, et une altération de la programmation du développement neuronal. Les souris exposées présentaient une transmission synaptique glutamatergique altérée en fonction de la dose sur les neurones pyramidaux de la couche V du -cortex préfrontal. Il s'agit de la première preuve de neuropathologie chez les souris due à la radiofréquence *in utero* des téléphones cellulaires, qui sont maintenant les plus répandus dans l'environnement. Les effets ont persisté à l'âge adulte et étaient transmissibles aux générations suivantes. De tels changements peuvent affecter la survie des populations sauvages.

Meral et al. [219] ont étudié les effets chez les cobayes (*Cavia colis*) de l'exposition aux fréquences des téléphones cellulaires de 900 MHz sur les tissus cérébraux et les taux sanguins de malondialdéhyde (MDA), de glutathion (GSH), de rétinol (vitamine A), de vitamine D(3) et de tocophérol (vitamine E), ainsi que sur l'activité enzymatique de la catalase (CAT). Quatorze cobayes mâles ont été divisés au hasard en groupes de contrôle et en groupes exposés aux RFR contenant chacun sept animaux. Les animaux ont été exposés à des RFR de 890 à 915 MHz (fréquence d'impulsion de 217 Hz, puissance de crête maximale de 2 W, DAS de 0,95 W/kg) provenant d'un téléphone cellulaire pendant 12 h/jour (11 h 45 min en mode veille et 15 min en mode pic) pendant 30 jours. Les témoins étaient logés dans une pièce séparée sans rayonnement de téléphone cellulaire. Des échantillons de sang ont été prélevés par ponction cardiaque ; l'analyse biochimique du tissu cérébral a été

après décapitation à la fin de la période de 30 jours. Les résultats ont montré que les niveaux de MDA ont augmenté ( $p < 0,05$ ), et que les niveaux de GSH et l'activité de l'enzyme CAT ont diminué, tandis que les niveaux de vitamines A, E et D(3) n'ont pas changé de manière significative dans le tissu cérébral des animaux exposés. Dans les échantillons de sang du groupe exposé, les niveaux de MDA, de vitamines A, D(3) et E, et l'activité de l'enzyme CAT ont augmenté ( $p < 0,05$ ), tandis que les niveaux de GSH ont diminué ( $p < 0,05$ ). Ils ont conclu que les radiations des téléphones cellulaires pouvaient provoquer un stress oxydatif dans le tissu cérébral des cobayes, mais que d'autres études étaient nécessaires pour déterminer si les effets sont nocifs et/ou affectent les fonctions neuronales.

Lai et al. [220] ont constaté que les rats Sprague-Dawley exposés à la RFR pendant le test du labyrinthe aquatique présentaient des déficits de mémoire de travail spatiale par rapport aux témoins. Mais des études similaires [221-223] n'ont pas trouvé d'effets sur les performances dans les tâches spatiales ou d'altérations du développement cérébral après des expositions similaires. Cependant, des études ultérieures menées au cours des deux dernières décennies ont montré des effets sur la mémoire et l'apprentissage chez les animaux et les humains après une exposition aux RFR [224].

Plusieurs études ont également examiné les effets comportementaux des RFR sur des modèles de rongeurs en ce qui concerne l'apprentissage, la mémoire, les troubles de l'humeur et les comportements d'anxiété, avec des résultats contradictoires. Daniels et al. [225] ont constaté une diminution de l'activité locomotrice, une augmentation du toilettage et une augmentation des niveaux de corticostérone basale chez les rats exposés aux RFR pendant 3 heures par jour à 840 MHz, mais aucune différence significative n'a été observée entre les contrôles et les animaux testés dans les tests de mémoire spatiale ou l'évaluation morphologique du cerveau. Les chercheurs ont conclu que l'exposition aux RFR pouvait entraîner un fonctionnement anormal du cerveau.

Lee et al. [226, 227] ont étudié spécifiquement les effets sur la fonction testiculaire des souris et des rats en gestation des caractéristiques combinées des signaux de réseau mobile RFR utilisés dans l'accès multiple par répartition en code à large bande (W-CDMA) ou CDMA utilisé dans les communications mobiles 3G. Les expériences n'ont montré aucun effet négatif observable sur le développement, la reproduction ou la mutation des sujets testés. De même, Poulietier de Gannes et al. [228] n'ont observé aucun effet significatif sur le développement in-utero et post-natal de rats exposés à la radiofréquence (Wi-Fi) à 2 450 MHz. De même, Imai et al. [229] n'ont constaté aucune toxicité testiculaire due au W-CDMA à 1,95 GHz.

Une étude sur les fréquences extrêmement élevées (EHF), comparable à la 5G sur un modèle de souris, réalisée par Kolomytseva et al [230], a porté sur le nombre de leucocytes et l'activité fonctionnelle des neutrophiles du sang périphérique. Chez des souris en bonne santé, des expositions du corps entier à un rayonnement électromagnétique de faible intensité et de très haute fréquence (EHF, 42,0 GHz, 0,15 mW/cm<sup>2</sup>, 20 minutes par jour) ont permis de constater que l'activité phagocytaire des neutrophiles du sang périphérique était supprimée d'environ 50 % ( $p < 0,01$  par rapport au contrôle exposé au simulacre) 2 à 3 heures après l'exposition unique. Les effets ont persisté pendant 1 jour, puis sont revenus à la normale en 3 jours. Mais une modification significative de la

Un profil sanguin leucocytaire a été observé chez les souris exposées aux EHF pendant 5 jours après l'arrêt de l'exposition. Les leucocytes ont augmenté de 44 % ( $p < 0,05$  par rapport aux animaux exposés à l'air libre). Ils ont conclu que les effets des FHE peuvent être médiés par les systèmes métaboliques et ont ajouté que les résultats indiquaient que l'exposition aux FHE à faible intensité sur le corps entier de souris saines avait un effet profond sur les indices d'immunité non spécifique. Ces faibles niveaux seront courants à proximité des infrastructures 5G.

Dans le cadre d'études de terrain bien conçues sur des mammifères non rongeurs, Nicholls et Racey [206, 207] ont constaté que les chauves-souris en quête de nourriture présentaient des réactions comportementales aversives à proximité de grands radars de contrôle du trafic aérien et de radars météorologiques. Quatre stations radar de contrôle du trafic aérien civil (ATC), trois radars ATC militaires et trois radars météorologiques ont été sélectionnés, chacun entouré d'un habitat hétérogène. Trois points d'échantillonnage ont été soigneusement sélectionnés pour correspondre aux habitats, au type, à la structure, à l'altitude et à la classe de terrain environnante à des distances croissantes de chaque station. Les intensités de champ radar ont été relevées à trois distances de la source : à proximité immédiate ( $< 656$  ft/200 m) avec une intensité de CEM élevée  $> 2$  V/m (1,06  $\mu$ W/cm<sup>2</sup>), à un point intermédiaire de la ligne de visée (656-1 312 ft/200-400 m) avec une intensité de CEM  $< 2$  V/m, et à un emplacement de contrôle hors de la vue du radar ( $> 1 312$  ft/400 m) - enregistrant 0 V/m. L'activité des chauves-souris a été enregistrée trois fois pour un total de 90 échantillons, 30 dans chaque catégorie d'intensité de champ. Mesurée du coucher au lever du soleil, ils ont constaté que l'activité des chauves-souris était significativement réduite dans les habitats exposés à un CEM supérieur à 2 V/m par rapport aux sites 0 CEM, mais cette activité réduite n'était pas significativement différente à des niveaux de CEM inférieurs dans un rayon de 400 m du radar. Ils ont conclu que l'activité réduite des chauves-souris était probablement due à l'induction thermique et à un risque accru d'hyperthermie. Il s'agissait d'une étude de grande envergure menée sur le terrain à proximité d'installations radar commerciales, avec des expositions de forte intensité pour la plupart, mais des effets de faible niveau ne peuvent être exclus étant donné la magnétosensibilité connue des chauves-souris.

Dans une autre étude de terrain utilisant un petit radar marin portable nettement moins puissant que leur étude de terrain précédente, Nicholls et Racey [207] ont découvert que le signal plus faible pouvait également dissuader les chauves-souris de chercher leur nourriture. Tout d'abord, au cours de l'été 2007, l'activité des chauves-souris a été comparée sur 20 sites de recherche de nourriture dans le nord-est de l'Écosse lors d'essais expérimentaux avec un radar allumé, et lors de contrôles sans signal radar. Après le coucher du soleil, l'activité des chauves-souris a été enregistrée pendant une période de 30 minutes, l'ordre des essais alternant d'une nuit à l'autre. Ensuite, au cours de l'été 2008, des insectes aériens ont été échantillonnés sur 16 des sites à l'aide de deux petits pièges à succion légers, l'un avec un signal radar, l'autre un contrôle. L'activité et la recherche de nourriture des chauves-souris ont été considérablement réduites lorsque le signal radar était unidirectionnel, créant une exposition maximale de 17,67-26,24 V/m (83-183  $\mu$ W/cm<sup>2</sup>). Le radar n'a eu aucun effet significatif sur l'abondance des insectes capturés par les pièges malgré la réduction de l'activité des chauves-souris.

Balmori [231] a également constaté une réduction significative de l'activité des chauves-souris dans une colonie de chauves-souris à queue libre (*Tadarida teniotis*) où le nombre de chauves-souris a diminué lorsque plusieurs tours de téléphonie cellulaire ont été placées à 80 m de la colonie.

Dans le domaine des ELF, Janać et al. [232] ont étudié les effets des ELF/MF - comparables aux courants de terre des lignes électriques et des tensions parasites - sur les schémas de comportement moteur des gerbilles de Mongolie (*Meriones unguiculatus*) et ont constaté des modifications de la locomotion, de la stéréotypie et de l'immobilité en fonction de l'âge chez les mâles de 3 et 10 mois. Les animaux ont été exposés en continu à des ELF-MF (50 Hz ; 0,1, 0,25 et 0,5 mT) pendant sept jours et leur comportement a été surveillé pendant 60 minutes en champ libre après le 1er, le 2e, le 4e et le 7e jour (pour saisir les effets immédiats), ainsi que trois jours après l'exposition (pour saisir les effets différés). Ils ont constaté que l'exposition à des gerbilles de 3 mois augmentait le comportement moteur (locomotion et stéréotypie), et donc diminuait l'immobilité. Chez les gerbilles de 3 mois, les ELF/MF ont également montré un effet retardé (sauf à 0,25 mT) sur la stéréotypie et l'immobilité. Chez les gerbilles âgées de 10 mois, les ELF/MF de 0,1, 0,25 et 0,5 mT ont induit une diminution de la locomotion, une légère augmentation de la stéréotypie et une stimulation prononcée du comportement moteur. Une augmentation du comportement moteur a été observée trois jours après l'exposition, ce qui indique des effets durables. Les chercheurs ont conclu que chez les gerbilles de 3 et 10 mois, des modèles temporels spécifiques de modifications du comportement moteur ont été induits par les ELF/MF en raison de différences morpho-fonctionnelles liées à l'âge dans les zones du cerveau qui contrôlent le comportement moteur.

Ce qui précède n'est qu'un très petit échantillon d'études sur les rongeurs. Voir les suppléments 1 et 2 de la partie 2 pour plus d'effets génétiques sur les rongeurs, et le supplément 3 pour des études supplémentaires.

## Bovins

En raison de la domestication et de la facilité d'accès, il existe de nombreuses études sur les vaches laitières (*Bos taurus*) qui semblent particulièrement sensibles aux CEM naturels et artificiels. Fedrowitz [71] a publié une étude approfondie avec des citations trop nombreuses pour être mentionnées ici. Cette étude souligne le fait que les bovins, bien que facilement accessibles, sont difficiles à étudier avec précision en raison de leur taille, ce qui crée des problèmes de manipulation et de dosimétrie. Il est également noté que les bovins sont aujourd'hui à leurs limites physiologiques de production de lait et de viande bovine, et que l'ajout d'un facteur de stress, même faible, peut être capable d'altérer un équilibre physiologique bovin fragile. Il ressort clairement de l'étude de Fedrowitz que les vaches réagissent aux expositions environnementales provenant d'un large éventail de fréquences et de propriétés, même si certaines études ne permettent pas une bonne évaluation de l'exposition. L'exposition aux RFR a créé un comportement d'évitement, une réduction des temps de rumination et de repos,

et des altérations des enzymes du stress oxydatif, entre autres problèmes, tandis que les CEM-ELF ont donné lieu à des preuves contradictoires concernant la production de lait, la teneur en graisse, les déséquilibres hormonaux et des changements importants dans d'autres paramètres physiologiques. Les vaches se sont également révélées sensibles aux tensions parasites et aux harmoniques transitoires, avec des effets problématiques sur la production de lait, la santé, la reproduction et le comportement.

La question est de savoir dans quelle mesure ces travaux pourraient s'appliquer à d'autres ruminants et à de grands mammifères sur le terrain ou à l'état sauvage, comme les cervidés, sur le plan du comportement, de la reproduction et de la physiologie. Les tensions parasites et les CEM-ELF à proximité des lignes électriques, ainsi que les RFR des zones rurales provenant d'émetteurs terrestres et satellitaires, par exemple, peuvent affecter les troupeaux migrateurs sauvages et les grands ongulés dans des zones éloignées qui passent inaperçues.

## Bovins et RFR

Loscher et Kas [233] ont observé un comportement anormal dans un troupeau laitier maintenu à proximité d'un émetteur de télévision et de radio. Ils ont constaté une réduction du rendement laitier, des problèmes de santé et des anomalies comportementales. Après avoir évalué d'autres facteurs, ils ont conclu que les niveaux élevés de RFR étaient probablement responsables. Ils ont déplacé une vache au comportement anormal dans une autre étable située à 20 km de l'antenne, ce qui a entraîné une normalisation du comportement en cinq jours. Les symptômes sont réapparus lorsque la vache est retournée dans l'étable située près des antennes. Dans une étude ultérieure, Loscher [234] a également constaté des effets des RFR sur la production, la santé et le comportement des animaux de ferme, notamment un comportement d'évitement, des altérations des - paramètres du stress oxydatif et la durée de la rumination.

Balode [59] a obtenu des échantillons de sang de vaches brunes femelles provenant d'une ferme située à proximité et en face du radar Skrunda - situé en Lettonie dans un système de radar d'alerte précoce fonctionnant dans la gamme de fréquences 156-162MHz - et des échantillons de vaches dans une zone témoin. Ils ont constaté que les micronoyaux dans les érythrocytes périphériques étaient nettement plus nombreux chez les vaches exposées, ce qui indique des dommages à l'ADN.

Stärk et al. [235] ont étudié les ondes courtes (3-30 MHz) des radiofréquences sur les niveaux de mélatonine salivaire chez les vaches laitières, avec un troupeau dans une ferme située à 1 640 pieds/500 m (considérée comme une exposition plus élevée) et un second troupeau témoin situé à 13 123 pieds/4 000 m de l'émetteur (considéré comme non exposé). Les relevés nocturnes moyens de l'intensité du champ magnétique étaient 21 fois plus élevés dans la ferme exposée (1,59 mA/m) que dans la ferme témoin (0,076 mA/m). Dans les deux fermes, après avoir initialement surveillé les concentrations de mélatonine salivaire de cinq vaches à intervalles de 2 heures pendant la phase d'obscurité de la nuit pendant 10 jours consécutifs, et avec l'émetteur à ondes courtes éteint pendant trois des 10 jours (phase d'arrêt), les échantillons ont été analysés à l'aide d'un dosage radio-immunologique. Ils

ont signalé que les valeurs moyennes des deux premières nuits ne présentaient pas de différence statistiquement significative entre les vaches exposées et non exposées et ont conclu qu'une réduction chronique de la mélatonine était peu probable. Mais lors de la première nuit de réexposition, après que l'émetteur ait été éteint pendant trois jours, la différence de concentration de mélatonine salivaire entre les deux fermes (3,89 pg/ml, IC : 2,04, 7,41) était statistiquement significative, indiquant une multiplication par deux à sept de la concentration de mélatonine. Ils ont conclu qu'un effet aigu retardé des CEM sur la concentration de mélatonine ne pouvait être exclu et ont demandé que d'autres essais soient réalisés pour confirmer les résultats.

Hässig et al. [95] ont mené une étude de cohorte pour évaluer la prévalence des cataractes nucléaires chez les veaux de boucherie à proximité des stations de base de téléphonie mobile, avec un suivi de chaque mère et de son veau depuis la conception jusqu'à l'abattage, en passant par le développement fœtal. Un accent particulier a été mis sur le premier trimestre de la gestation (organogenèse). Des antioxydants protecteurs sélectionnés (superoxyde dismutase, catalase, glutathion peroxydase [GPx]) ont été évalués dans l'humeur aqueuse de l'œil afin d'évaluer le statut redox. Ils ont constaté que sur 253 veaux, 79 (32 %) présentaient des cataractes nucléaires à des degrés divers, mais que seuls 9 (3,6 %) veaux présentaient des cataractes nucléaires graves. Ils ont conclu qu'une relation entre l'emplacement des veaux de boucherie présentant des cataractes nucléaires au cours du premier trimestre de la gestation et la force des antennes a été démontrée. Le nombre d'antennes situées dans un rayon de 100 à 199 mètres (328 à 653 pieds) était associé au stress oxydatif et il existait une association entre le stress oxydatif et la distance à l'antenne relais la plus proche. Le stress oxydatif était accru dans les yeux atteints de cataracte (OR par kilomètre : 0,80, intervalle de confiance 95 % 0,62, 0,93). Mais les chercheurs ont également conclu qu'il n'avait pas été démontré que les antennes affectaient réellement le stress. Les statistiques de Hosmer-Lemeshow ont montré une précision de 100 % dans les cas négatifs à faible rayonnement, et une précision de seulement 11,11 % dans les cas positifs à fort rayonnement. Ces résultats montrent, selon eux, qu'il existe bien d'autres causes probables de cataractes nucléaires que les antennes relais et appellent à des études supplémentaires sur les CEM pendant le développement embryonnaire.

Hässig et al. [96] ont également examiné une ferme laitière en Suisse où un grand nombre de veaux sont nés avec des cataractes nucléaires après l'installation d'une station de base de téléphonie mobile près de l'étable. Les veaux présentaient un risque 3,5 fois plus élevé de cataractes lourdes s'ils naissaient dans cette ferme par rapport à la moyenne suisse. Toutes les causes habituelles de cataractes ont pu être exclues mais les chercheurs ont néanmoins conclu que l'incidence restait inconnue.

### **Bovins et porcins : ELF-EMF, courant électrique parasite**

Les bovins semblent exceptionnellement sensibles aux CEM-ELF provenant de courants vagabonds causés par des installations industrielles normales ou défectueuses.

les méthodes de mise à la terre près des lignes de transmission à haute tension à proximité des fermes laitières. Les courants vagabonds peuvent couvrir de grandes surfaces et se produisent lorsque le courant circule entre le conducteur du circuit mis à la terre (neutre) d'une ferme et la terre à travers les équipements de l'exploitation laitière comme les grilles métalliques. Il s'agit généralement de petits courants réguliers à fréquence industrielle [99], et non de chocs transitoires élevés, bien que cela puisse aussi se produire dans des conditions de temps humide. Selon Hultgren [236], les bovins laitiers peuvent percevoir des courants alternatifs supérieurs à 1 mA entre la bouche et les quatre sabots, les effets comportementaux chez les vaches se produisant généralement au-dessus de 3 mA. Les courants vagabonds peuvent constituer un facteur de stress physique important pour les vaches et d'autres animaux [237]. Ce phénomène peut également se produire chez les espèces migratrices sauvages qui se déplacent dans ces zones.

À la demande de producteurs laitiers, de vétérinaires et d'agents de vulgarisation du Michigan (États-Unis), Kirk et al. [238] ont étudié les courants vagabonds dans 59 exploitations laitières du Michigan. Dans 32 fermes, des sources de courant vagabond ont été détectées. Lorsque la tension dépassait 1 V en courant alternatif, un nombre accru de vaches laitières présentaient un comportement anormal dans l'installation de traite et une prévalence accrue de mammites cliniques. La récupération des anomalies induites par les courants vagabonds était liée au type d'anomalie et à l'ampleur de la tension d'exposition.

Burchard et coll. [239], dans le cadre d'une étude sur l'exposition alternée, de petite envergure mais bien contrôlée, de vaches Holstein allaitantes non gestantes, ont constaté un cycle œstral plus long chez les vaches exposées à un champ électrique vertical de 10 kV/m et à un champ magnétique horizontal uniforme de 30  $\mu$ T à 60 Hz, comparativement à celles qui n'étaient pas exposées. Rodriguez et al [240] ont également constaté que l'exposition aux CEM pouvait augmenter la durée du cycle œstral des bovins. Burchard et al. [241] ont évalué les effets sur la production laitière chez des Holstein exposées à un champ électrique vertical de 10 kV/m et à un MF horizontal uniforme de 30  $\mu$ T à 60 Hz et ont constaté une diminution moyenne de 4,97, 13,78 et 16,39 % du rendement laitier, du rendement laitier corrigé de la matière grasse et de la matière grasse du lait, respectivement dans les groupes exposés, et une augmentation de 4,75 % de la consommation alimentaire de matière sèche. Et Buchard et al. [242], dans deux expériences, ont étudié les niveaux de thyroxine (T4) dans le sang chez des vaches Holstein gestantes et non gestantes en lactation - exposées à 10 kV/m, 30  $\mu$ T de CEM et ont trouvé un changement significatif en fonction du moment du prélèvement sanguin dans les groupes exposés. Ils ont conclu que l'exposition des vaches laitières aux CEM-ELF pouvait modérément affecter les niveaux sanguins de thyroxine.

Hillman et al. [93, 94] ont signalé que la distorsion harmonique et la qualité de l'énergie elle-même pourraient être une autre variable de la sensibilité des bovins aux courants vagabonds. Ils ont constaté que le comportement, la santé et la production laitière étaient affectés par des transitoires aux - courants harmoniques 3, 5, 7 et 3 sur les lignes électriques des services publics après qu'une tour de téléphonie cellulaire ait été trouvée en train de charger le neutre de la terre avec 10+ V, ce qui a causé le problème de la distorsion harmonique.



distorsion. Après l'installation d'un transformateur d'isolation neutre blindé entre le service public et la laiterie, la distorsion a été réduite à presque zéro. Le comportement des animaux s'est immédiatement amélioré et la production de lait, qui avait été supprimée pendant trois ans, est progressivement revenue à la normale en 18 mois.

Les porcs (*Sus scrofa domesticus*) - comme les rats et les souris - ont démontré un comportement aversif aux champs électriques ELF-EMF. Hjeresen et al. [243] ont constaté que les porcs miniatures, exposés à des champs électriques de 60 Hz (30 kV/m pendant 20 h/jour, 7 jours/semaine jusqu'à 6 mois) préféraient une absence de champ pendant une période de 23,5 heures en passant plus de temps hors du champ électrique que dedans pendant les périodes de sommeil. Et Sikov et al [244], dans le cadre d'une vaste étude sur les porcs miniatures de Hanford portant sur la toxicologie de la reproduction et du développement (y compris la tératologie) sur trois cycles de reproduction, ont trouvé une forte association entre l'exposition chronique à un champ électrique vertical uniforme (60-Hz, 30-kV/m, pendant 20 h/jour, 7 jours/semaine) et les effets néfastes sur le développement par rapport au contrôle. Ils ont conclu à l'existence d'une association entre l'exposition chronique à des champs électriques puissants et des effets néfastes sur le développement des porcs (75 % de malformations chez les animaux exposés contre 29 % chez les animaux témoins) dans la première génération, avec des résultats cohérents dans les deux générations suivantes.

## Avian

Les oiseaux sont des indicateurs importants du bien-être et de l'état général des écosystèmes. Même les effets subtils peuvent être apparents en raison de leur présence fréquente dans les zones RFR. Leurs plumes creuses ont des propriétés diélectriques et piézoélectriques, ce qui signifie qu'elles sont conductrices et capables d'agir comme un guide d'ondes dirigeant l'énergie RFR externe directement et profondément dans les cavités corporelles des oiseaux [245-249]. Leur crâne fin possède des récepteurs à magnétite et à paires de radicaux (voir "Mécanismes" ci-dessus) et ils sont très mobiles - ils parcourent souvent de grandes distances migratoires de quelques dizaines à une centaine de milliers de kilomètres aller-retour par an, ce qui entraîne des effets cumulatifs multifréquences potentiels dus à des expositions chroniques en champ proche, moyen et lointain. Les populations aviaires sont en déclin dans le monde entier, surtout parmi les espèces migratrices. Cela signifie que les oiseaux peuvent être particulièrement sensibles aux effets néfastes des radiofréquences environnementales puisque leur habitat naturel est aérien et qu'ils volent souvent à des niveaux latéraux avec les émissions des infrastructures, ce qui les rapproche d'autant plus des sources de production.

Les tours et les bâtiments, en tant qu'obstacles directs, sont des dangers connus pour les oiseaux. On estime qu'une tour située à 46 m au-dessus du sol est responsable de la mort de 3 000 oiseaux chanteurs par mois sur les voies de migration.

Les collisions avec les tours de communication ont tué plus de 10 000 oiseaux migrateurs en une nuit sur une tour de télévision dans le Wisconsin [251, 252]. On sait depuis des années que les populations d'oiseaux chanteurs d'Amérique du Nord et d'Europe sont en chute libre. Ce n'est que récemment que les tours ont été considérées comme un facteur important. Mais le problème est-il uniquement dû aux obstacles sur les voies de migration directes ou y a-t-il autre chose en jeu ?

Le rayonnement radioélectrique des tours peut attirer les oiseaux en raison de leur physiologie particulière. Les yeux et le bec des oiseaux sont des récepteurs magnétoréceptifs uniques, dotés d'une paire de récepteurs de magnétite et de radicaux cryptochromes. Une étude définitive de Beason et Semm [253] a démontré que la fréquence commune des téléphones portables (fréquence porteuse de 900 MHz, modulée à 217 Hz) à des intensités non thermiques, produisait des décharges dans plusieurs types de neurones du système nerveux chez les pinsons zébrés (*Taeniopygia guttata*). Les neurones du cerveau d'oiseaux anesthésiés et irradiés ont montré des changements dans l'activité neuronale de 76 % des cellules répondantes, qui ont augmenté leur taux d'excitation d'une moyenne de 3,5 fois par rapport aux témoins. Les autres cellules répondantes ont présenté une diminution des taux d'activité spontanée. L'étude de Beason et Semm [253] pourrait expliquer pourquoi les oiseaux peuvent être attirés par les tours de téléphonie cellulaire, une prémisse théorique qu'ils avaient déjà observée chez les goglus (*Dolichonyx oryzivorus* ; [254]).

Les RFR peuvent également agir comme un facteur de stress/irritant aviaire. Les premiers travaux de Wasserman et al [255] dans le cadre d'études de terrain sur 12 volées d'oiseaux migrateurs soumis à diverses combinaisons de densité de puissance et de durée des micro-ondes dans des conditions hivernales à Monomet, MA, en utilisant des oiseaux de deux autres volées comme témoins, ont montré des niveaux accrus d'agression chez certains des oiseaux irradiés.

D'autres recherches ont mis en évidence une série d'effets capables d'entraîner des conséquences environnementales négatives de grande ampleur. Des études en laboratoire menées par Di Carlo et al. [256] ont révélé une diminution de la production de protéines de choc thermique chez les embryons de poulet. Les chercheurs ont utilisé des RFR de 915 MHz sur des - embryons de poulets domestiques et ont constaté que l'exposition typique de certaines émissions de téléphones portables réduisait les protéines de choc thermique (HSP-70) et provoquait des crises cardiaques et la mort de certains embryons. Les témoins n'ont pas été affectés. Dans des expériences répétées, des résultats similaires ont été trouvés par Grigor'ev [257] et Xenos et Magras [258]. Batellier et al. [259] ont constaté une mortalité embryonnaire significativement plus élevée dans les groupes exposés que dans les groupes témoins d'œufs incubés avec un téléphone portable à proximité appelant de façon répétée un numéro à 10 chiffres à des intervalles de 3 minutes pendant toute la période d'incubation. Les protéines de choc thermique aident à maintenir la conformation des protéines cellulaires pendant les périodes de stress. Une baisse de leur production diminue la protection cellulaire, ce qui peut entraîner un cancer, d'autres maladies, une insuffisance cardiaque et une réduction de la - protection contre l'hypoxie et les rayons ultraviolets.

Les résultats ne sont pas tous négatifs. Tysbulin et al [260, 261] ont étudié l'exposition courte et prolongée au signal d'un téléphone cellulaire GSM 900 MHz sur le développement embryonnaire de la caille (*Coturnix coturnix japonica*), en irradiant des œufs frais fécondés pendant les 38 premières heures et les 14 jours d'incubation à l'aide d'un téléphone cellulaire en mode connexion activé en continu par un système informatique. L'intensité maximale du rayonnement incident sur la surface de l'œuf était de  $0,2 \text{ mW/cm}^2$ . Les résultats ont révélé une augmentation significative ( $p < 0,001$ ) des somites différenciés chez les embryons exposés pendant 38 heures et une augmentation significative ( $p < 0,05$ ) de la survie totale des embryons dans les œufs après 14 jours d'exposition. Ils ont également constaté que le niveau des substances réactives de l'acide thiobarbiturique (TBA) était significativement ( $p = 0,05-0,001$ ) plus élevé dans le cerveau et le foie des éclosions d'embryons exposés et ont émis l'hypothèse qu'il existe un effet facilitateur dû à un métabolisme accru dans les embryons exposés via des mécanismes de per-oxydation. Ils ont conclu que les effets non thermiques de faible niveau du GSM 900 MHz sur la genèse de l'embryon de caille sont possibles et que les effets peuvent être expliqués par un effet d'hormèse induit par les espèces réactives de l'oxygène (ROS).

Les caractéristiques du signal, telles que les impulsions ou les ondes continues, sont également importantes. Berman et al. [262], dans une étude multi-laboratoire des champs magnétiques ELF pulsés, ont constaté une incidence très significative d'anomalies dans les œufs de poussins exposés par rapport aux témoins. Et Ubeda et al. [263] ont constaté que les champs magnétiques pulsés ELF-EMF, courants dans l'environnement actuel, causaient des dommages irréversibles aux embryons de poussins. Les études initiales sur des œufs de poule fraîchement fécondés ont été exposées pendant les 48 premières heures d'incubation après la ponte à des champs - magnétiques pulsés (PMF) avec une fréquence de répétition de 100 Hz, une amplitude crête à crête de  $1,0 \mu\text{T}$  et une durée d'impulsion de  $500 \mu\text{s}$ . Deux formes d'onde d'impulsion différentes ont été utilisées, avec des temps de montée et de descente de  $85 \mu\text{s}$  ou  $2,1 \mu\text{s}$ . Une exposition de deux jours a permis de constater une augmentation significative des anomalies du développement. Dans une recherche de suivi, après l'exposition, les œufs ont été incubés pendant neuf jours supplémentaires sans CMR. Les embryons prélevés sur les œufs ont montré un excès d'anomalies de développement dans les groupes exposés aux CMP par rapport aux échantillons exposés à l'écran. Un taux élevé de mort embryonnaire a été observé dans le temps de montée/descente de  $2,1 \mu\text{s}$ . Les résultats indiquent que les PMF peuvent provoquer des changements irréversibles du développement, confirmant qu'une forme d'onde d'impulsion peut déterminer la réponse embryonnaire aux champs magnétiques ELF courants aujourd'hui.

Entre 1999 et 2005, Fernie et al. ont étudié pour la première fois les divers effets potentiels sur la reproduction d'une espèce de rapace en captivité - la crécerelle d'Amérique (*Falco sparverius*) - des CEM-ELF équivalents à ceux des couples nichant à l'état sauvage sur les lignes de transmission électrique. Dans une série d'études, les couples captifs étaient généralement élevés sous contrôle ou sous exposition aux CEM pendant 1 à 3 cycles de reproduction. En 1999, Fernie et al. [264] ont étudié la mélatonine plasmatique photo phasique chez les oiseaux.

Les chercheurs ont constaté que les CEM affectaient la mélatonine plasmatique chez les crécerelles mâles adultes, la supprimant au milieu de la saison de reproduction, mais l'augmentant à la fin de celle-ci. Dans le cas d'une exposition aux CEM à long terme, mais pas à court terme chez les adultes, la mélatonine plasmatique était également supprimée chez leurs oisillons, ce qui pourrait affecter le succès migratoire. La mue a eu lieu plus tôt chez les mâles adultes exposés aux CEM que chez les témoins. L'exposition aux CEM n'a eu aucun effet sur la mélatonine plasmatique des femelles adultes. Chez les espèces aviaires, la mélatonine est impliquée dans la régulation de la température corporelle, le métabolisme saisonnier, l'activité locomotrice, les habitudes alimentaires, la migration et les changements de couleur du plumage importants pour la sélection des partenaires. La mélatonine joue également un rôle clé dans la croissance et le développement des jeunes oiseaux. Les chercheurs ont conclu qu'il est probable que les résultats soient pertinents pour les rapaces sauvages nichant dans des zones exposées aux CEM.

En 2000, Fernie et al. [265] ont étudié le succès de la reproduction chez des crécerelles d'Amérique en captivité exposées à des CEM-ELF, là encore équivalentes à celles que connaissent les crécerelles sauvages qui se reproduisent. Les crécerelles ont été élevées une saison par an pendant deux ans dans des conditions CEM ou contrôlées. Certaines années, mais pas d'autres, les oiseaux exposés aux CEM ont montré une faible association avec une ponte réduite, une fertilité plus élevée, des œufs plus gros avec plus de jaune, d'albumine et d'eau, mais des coquilles d'œufs plus fines que les œufs témoins. Le succès d'éclosion était plus faible chez les couples exposés aux CEM que chez les couples témoins, mais le succès d'envol était plus élevé que chez les couples témoins en un an. Les chercheurs ont conclu que l'exposition aux CEM, telle que celle que les crécerelles subissent dans la nature, est biologiquement active à plusieurs égards et entraîne une réduction du succès d'éclosion.

Toujours en 2000, Fernie et al. [266] ont étudié les changements de comportement des crécerelles d'Amérique face aux CEM-ELF, toujours chez des oiseaux captifs comparables aux couples nicheurs qui utilisent couramment les structures de transmission électrique pour nicher, se percher, chasser et se percher. Le temps d'exposition aux CEM des crécerelles d'Amérique se reproduisant à l'état sauvage a d'abord été déterminé entre 25 et 75 % du temps observé. Sur une base de 24 heures, l'exposition aux CEM chez les espèces sauvages a été estimée entre 71% pendant la parade nuptiale et 90% pendant l'incubation. Ensuite, les effets des CEM sur le comportement des crécerelles reproductrices en captivité ont été examinés à des expositions comparables de 88% d'une période de 24 heures. De plus, des crécerelles captives ont été exposées à des niveaux de CEM subis par des crécerelles sauvages nichant sous des lignes électriques de 735 kV. Il semble y avoir un effet stimulant/stress. Les femelles captives CEM étaient plus actives, plus alertes et se sont perchées sur le toit de l'enclos plus fréquemment que les femelles témoins pendant la parade nuptiale. Les femelles CEM se sont lissées et reposées moins souvent pendant l'élevage de la couvée. Les crécerelles mâles exposées aux CEM étaient plus actives que les mâles témoins pendant la parade nuptiale et plus alertes pendant l'incubation. Les chercheurs ont conclu que l'augmentation de l'activité des crécerelles pendant la parade nuptiale peut être liée à des changements dans les facteurs suivants

corticostérone, mais pas à la mélatonine, comme cela a été constaté dans des travaux antérieurs [264], mais ils ont déclaré que les changements de comportement observés étaient peu susceptibles d'entraîner les effets précédemment signalés chez les oiseaux exposés aux CEM, comme indiqué ci-dessus. Ils ont ajouté que les changements comportementaux des crécerelles exposées aux CEM en captivité peuvent également être observés chez les crécerelles sauvages, avec des résultats incertains.

En 2001, Fernie et Bird [267] ont étudié les niveaux de stress oxydatif des CEM chez des crécerelles d'Amérique en captivité en utilisant les mêmes paramètres de test que ceux décrits ci-dessus pour voir si l'exposition aux CEM provoquait une réponse du système immunitaire. Chez les crécerelles mâles captives élevées dans des conditions de contrôle ou de CEM équivalentes à celles rencontrées par les crécerelles sauvages, l'exposition aux CEM à court terme (une saison de reproduction) a supprimé les protéines totales du plasma, les hématocrites et les caroténoïdes dans la première moitié de la saison de reproduction. Elle a également supprimé les cellules érythrocytaires et les proportions de lymphocytes, mais a augmenté les proportions de granulosa à la fin de la saison de reproduction. L'exposition aux CEM à long terme (deux saisons de reproduction) a également supprimé les hématocrites dans la première moitié de la période de reproduction. Mais les résultats ont montré que seuls les oiseaux exposés aux CEM à court terme ont connu une réponse immunitaire, en particulier pendant la première moitié de la saison de reproduction. L'élévation des granulocytes et la suppression des caroténoïdes, des protéines totales et de la mélatonine [264] chez la même espèce de crécerelle indiquent que les crécerelles mâles exposées à court terme aux CEM présentaient des niveaux plus élevés de stress oxydatif dus à une réponse immunitaire et/ou à une exposition aux CEM. Les chercheurs ont noté que l'exposition aux CEM à long terme peut être liée à des niveaux plus élevés de stress oxydatif uniquement par l'exposition aux CEM. Le stress oxydatif contribue au cancer, aux maladies neurodégénératives et aux troubles immunitaires. Et en 2005, Fernie et Reynolds [268] ont noté que la plupart des études sur les oiseaux et les CEM indiquent des changements sur le comportement, le succès reproductif, la croissance et le développement, la physiologie et l'endocrinologie, et le stress oxydatif - avec des effets qui ne sont pas toujours cohérents ou dans la même direction dans des conditions de CEM. L'ensemble des travaux de ce groupe de recherche a des implications pour toutes les espèces sauvages qui rencontrent régulièrement un large éventail de CEM.

Dans des études de terrain sur les oiseaux sauvages en Espagne, Balmori [269] a trouvé de fortes corrélations négatives entre les faibles niveaux de rayonnement micro-ondes et la reproduction, la nidification, le perchage et la survie des oiseaux à proximité des tours de communication. Il a documenté l'abandon de nids et de sites, la détérioration du plumage, les problèmes de locomotion et la mort de cigognes des bois (*Mycteria americana*), de moineaux domestiques (*Passer domesticus*), de tourterelles des rochers (*Columba livia*), de pies (*Pica pica*), de tourterelles des bois (*Streptopelia decaocto*) et d'autres espèces. Bien que ces espèces aient été historiquement documentées comme se perchent et nichent dans ces zones, Balmori [269] n'a pas observé ces symptômes avant la construction et l'exploitation de l'usine de traitement des eaux usées.

tours de téléphonie cellulaire. Les résultats ont montré une corrélation négative très forte entre la proximité des antennes et la nidification et la survie des cigognes. Douze nids (40 % de son échantillon d'étude) étaient situés à moins de 200 m des antennes et n'ont jamais réussi à élever des poussins, tandis qu'un seul nid (3,3 %), situé à plus de 300 m, n'a jamais eu de poussins. Des comportements étranges ont été observés sur les sites de nidification des cigognes situés à moins de 100 m d'une ou plusieurs antennes de téléphonie mobile. Les oiseaux touchés directement par le lobe de transmission principal (c'est-à-dire intensité du champ électrique > 2 V/m) comprenaient des jeunes morts de causes inconnues. Dans un rayon de 100 m, les adultes appariés se disputaient fréquemment les bâtons de construction du nid et ne parvenaient pas à faire avancer la construction du nid (les bâtons tombaient au sol). Balmori a également signalé que certains nids n'étaient jamais terminés et que les Cigognes restaient passives devant les antennes des sites cellulaires. L'intensité du champ électrique était plus élevée sur les nids situés à moins de 200 m ( $2,36 \pm 0,82$  V/m ;  $1,48 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) que sur les nids situés à plus de 300 m ( $0,53 \pm 0,82$  V/m,  $0,074 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ). Les niveaux de RF-EMF, y compris pour les nids <100 m des antennes, n'étaient pas assez intenses pour être classés comme des expositions thermiques. Les densités de puissance doivent être d'au moins  $10 \text{ mW}/\text{cm}^2$  pour produire un réchauffement des tissus, même de  $0,5^\circ\text{C}$  [270]. Les résultats de Balmori indiquent que les RFR pourraient potentiellement affecter un ou plusieurs stades de reproduction, notamment la construction du nid, le nombre d'œufs produits, le développement embryonnaire, l'éclosion et la mortalité des poussins et des jeunes aux premiers stades de croissance.

Balmori et Hallberg [271] et Everaert et Bauwens [272] ont trouvé des corrélations négatives fortes similaires chez les moineaux domestiques (*Passer domesticus*) mâles sur de multiples sites en Espagne et en Belgique, associées à des radiofréquences ambiantes comprises entre 1 MHz et 3 GHz à diverses proximités de stations de base GSM. Le déclin du moineau domestique en Europe a été progressif mais cumulatif pour cette espèce historiquement bien adaptée aux environnements urbains. Les déclins de densité d'oiseaux les plus marqués ont été observés chez les moineaux domestiques mâles dans des champs électriques relativement élevés à proximité des stations de base, ce qui indique que l'exposition à long terme à des niveaux de RFR plus élevés a eu un effet négatif sur l'abondance et/ou le comportement des moineaux domestiques sauvages. Dans une autre étude, Balmori [25] a signalé les effets sur la santé des oiseaux irradiés en permanence. Ils ont souffert d'effets à long terme qui comprenaient une réduction de la posture de défense territoriale, une détérioration de la santé des oiseaux, des problèmes de reproduction et une réduction des territoires utiles en raison de la détérioration de l'habitat.

On a observé que les oiseaux évitent les zones où les CEM sont de forte et de faible intensité, de jour comme de nuit. Une première étude réalisée par Southern en 1975 [273] a observé que les poussins de mouettes réagissaient à l'émetteur ELF du projet Sanguin de l'armée américaine. Testés par temps clair dans le champ géomagnétique normal, les oiseaux ont montré un regroupement significatif avec

prévoient un relèvement correspondant à la direction de la migration, mais lorsque la grande antenne était mise sous tension, ils se dispersaient de façon aléatoire. Il a conclu que les champs magnétiques associés à ces conducteurs étaient suffisants pour désorienter les oiseaux. Larkin et Sutherland [274] ont observé que le suivi radar d'oiseaux migrateurs nocturnes individuels volant au-dessus d'un grand système d'antennes à courant alternatif amenait les oiseaux à tourner ou à changer d'altitude plus fréquemment lorsque le système d'antennes fonctionnait que lorsqu'il ne fonctionnait pas. Les résultats suggèrent que les oiseaux détectent les CEM à courant alternatif de faible intensité pendant les vols migratoires nocturnes.

Dans une étude aviaire pluriannuelle bien conçue sur les perturbations magnétiques, Engels et al. [213] ont étudié le "bruit" électromagnétique à large bande émis partout où l'homme utilise des appareils électroniques, y compris des appareils et des infrastructures. Ils ont constaté que les oiseaux migrateurs étaient incapables d'utiliser leur boussole magnétique en présence d'un environnement urbain typique d'aujourd'hui. Les merles d'Europe (*E. rubecula*), exposés au "bruit" électromagnétique de fond présent dans les cabanes en bois non protégées du campus de l'université d'Oldenburg, ne pouvaient pas s'orienter à l'aide de leur boussole magnétique. Mais lorsqu'ils ont été placés dans des huttes blindées en aluminium et mises à la terre, créant ainsi des cages de Faraday qui atténuent le "bruit" électromagnétique d'environ deux ordres de grandeur, ils ont retrouvé leur orientation magnétique. Les chercheurs ont pu déterminer que la gamme de fréquences de 50 kHz à 5 MHz était la plus perturbatrice. Lorsque la mise à la terre a été supprimée ou que du "bruit" électromagnétique à large bande supplémentaire a été délibérément généré à l'intérieur des cabanes blindées et mises à la terre, les oiseaux ont à nouveau perdu leur capacité d'orientation magnétique. Les chercheurs en ont conclu que les effets magnéto-perturbateurs des radiofréquences ne sont pas limités à une bande de fréquences étroite. Les oiseaux testés loin des sources de CEM n'ont eu besoin d'aucun écran pour s'orienter avec leur boussole magnétique. Ces travaux ont mis en évidence un effet reproductible du "bruit" électromagnétique ambiant d'origine anthropique sur le comportement d'un vertébré intact. La boussole magnétique fait partie intégrante des mouvements et de la migration des oiseaux. Les résultats ont clairement démontré un effet non thermique sur les merles d'Europe et servent à prédire les effets sur d'autres oiseaux migrateurs, en particulier ceux qui survolent les zones urbaines. Ces champs sont bien plus faibles que les niveaux minimaux censés produire des effets et bien inférieurs à toutes les normes d'exposition.

Des fenêtres d'intensité ont également été découvertes chez différentes espèces, les effets pouvant être plus extrêmes à des intensités plus faibles qu'à des intensités plus élevées en raison de mécanismes compensatoires tels que l'apoptose cellulaire. Panagopoulos et Margaritis [34] ont découvert une fenêtre d'intensité inattendue à des niveaux thermiques d'environ 10 mW/cm<sup>2</sup> RFR - ce qui n'est pas rare près des tours de téléphonie cellulaire - où les effets étaient plus graves qu'à des intensités supérieures à 200 mW/cm<sup>2</sup>. Cette fenêtre est apparue à un

à une distance de 20 à 30 cm d'une antenne de téléphone portable, ce qui correspond à une distance d'environ 20 à 30 m d'une antenne de station de base. On peut considérer qu'il s'agit d'un effet non linéaire classique et qu'il s'applique aux expositions en champ lointain. Étant donné que les antennes de stations de base de téléphones cellulaires sont fréquemment situées dans des zones résidentielles où les oiseaux nichent, souvent à des distances de 20-30 m de ces antennes, les oiseaux migrateurs, l'avifaune non migratrice et d'autres espèces sauvages peuvent être exposés jusqu'à 24 heures par jour.

L'impact des signaux radio commerciaux sur les oiseaux migrateurs suscite également des inquiétudes. L'anatomie humaine est en résonance avec les bandes FM et les normes d'exposition sont donc plus strictes dans cette gamme. Les émetteurs FM commerciaux de forte intensité (>6 000 W) sont généralement situés sur les terrains les plus élevés disponibles afin de couvrir une zone plus large. Les émetteurs FM de faible puissance (<1 000 W) peuvent être placés plus près de la population humaine. Les emplacements à forte intensité, qui peuvent être des sites à émetteurs multiples (appelés familièrement "fermes d'antennes") pour d'autres services, offrent également des perchoirs et des sites de nidification pratiques pour les oiseaux migrateurs. Les signaux numériques FM, qui simulent des ondes pulsées, posent des problèmes sanitaires supplémentaires aux oiseaux migrateurs. Les oiseaux migrateurs protégés, tels que les pygargues à tête blanche, dont l'envergure des ailes atteint environ 1,83 m (6 pieds) - une correspondance de résonance avec la longueur du signal FM - risquent de subir un effet de résonance sur tout le corps, tant pour les humains que pour les pygargues à tête blanche. Les oiseaux pourraient ressentir des effets thermiques et non thermiques.

Tous les oiseaux migrateurs sont potentiellement en danger, y compris les pygargues à tête blanche, les aigles royaux, les oiseaux dont la conservation est préoccupante [275], les espèces d'oiseaux répertoriées au niveau fédéral et/ou étatique, les oiseaux en péril au niveau national ou régional, ainsi que les oiseaux dont les populations sont stables. Malheureusement, la prise en compte de ces préoccupations - en commençant par des recherches indépendantes menées par des scientifiques n'ayant aucun intérêt direct dans les résultats - n'a pas été une priorité pour les agences gouvernementales ou l'industrie des communications.

## Insectes et arachnides

Les insectes sont les plus abondants et les plus diversifiés de tous les groupes d'animaux, avec plus d'un million d'espèces décrites représentant plus de la moitié de toutes les espèces vivantes connues, et potentiellement des millions d'autres qui doivent encore être découvertes et identifiées. Ils pourraient représenter jusqu'à 90 % de toutes les formes de vie sur Terre. Bien que certains soient considérés comme des nuisibles pour les cultures agricoles et d'autres comme des vecteurs de maladies, les insectes restent essentiels à la vie et à la santé de la planète. Présents dans presque tous les environnements, ils sont les seuls invertébrés à voler, mais les adultes de la plupart des espèces d'insectes marchent, tandis que certains nagent.

En raison de ces différentes adaptations environnementales, les différentes espèces seront exposées à des degrés divers aux CEM. Par exemple, les insectes marchant sur le sol peuvent être plus sensibles aux effets du courant vagabond de 60 Hz, tandis que les insectes volants peuvent être plus sensibles aux expositions sans fil. Cependant, toutes les espèces testées ont été affectées sur une gamme de bandes électromagnétiques non ionisantes.

La plupart des insectes ont un exosquelette, un corps en trois parties composé d'une tête, d'un thorax et d'un abdomen, trois paires de pattes articulées, des structures oculaires composées capables de voir beaucoup plus de couleurs, de largeurs et d'images que les humains, et une paire d'antennes capables de détecter les - changements météorologiques subtils et les champs géomagnétiques de la Terre. Ils vivent en étroite harmonie avec l'environnement naturel pour survivre et s'accoupler. Les groupes d'insectes les plus divers ont évolué conjointement avec les plantes à fleurs, dont beaucoup ne survivraient pas sans elles. La plupart des espèces d'insectes sont très sensibles aux variations de température et aux changements climatiques, car elles ne dissipent pas efficacement la chaleur.

Presque tous les insectes éclosent à partir d'œufs qui sont pondus de multiples façons et dans de nombreux habitats. La croissance implique une série de mues et de stades (appelés instars), les stades immatures étant très différents des insectes adultes en termes d'apparence, de comportement et d'habitat préféré. Certains subissent une métamorphose en quatre étapes (avec un stade nymphal) et d'autres une métamorphose en trois étapes à travers une série de stades nyphaux.

Si la plupart des insectes sont solitaires, certains - comme les abeilles, les termites et les fourmis - ont évolué vers des réseaux sociaux, vivant en colonies organisées "coopératives" qui peuvent fonctionner comme une seule unité, comme en témoignent les comportements d'essaimage. Certains font même preuve de soins maternels pour les œufs et les jeunes. Ils communiquent par le biais de divers sons, phéromones, signaux lumineux et par leurs antennes, comme lors de la "danse de l'agitation" des abeilles (voir ci-dessous).

Dès les années 1800, même si les méthodes de test étaient primitives par rapport aux normes actuelles, les chercheurs étaient curieux de connaître l'effet de l'électromagnétisme sur le - développement des insectes, en particulier la tératogénicité [276]. La recherche sur les CEM à travers les fréquences et les populations d'insectes est en cours depuis au moins les années 1930 dans le but d'utiliser l'énergie comme insecticide et anti-contaminant dans les céréales, généralement à des expositions thermiques de haute intensité qui n'existeraient pas dans l'environnement naturel. McKinley et Charles [277] ont constaté que les guêpes mouraient en quelques secondes après une exposition à haute fréquence. Mais tous les premiers travaux n'étaient pas strictement de haute intensité, et tous les effets observés n'étaient pas dus à des facteurs thermiques.

Les premiers chercheurs ont présenté des théories intéressantes sur la façon dont l'énergie se couple avec les différentes espèces d'insectes. Frings [278] a constaté que les stades larvaires sont plus

plus tolérants à la chaleur que les insectes adultes dont les appendices peuvent servir de voies conductrices vers le corps, et que plus l'espèce d'insecte est spécialisée, plus elle semble sensible à l'exposition aux micro-ondes. Carpenter et Livingstone [279] ont étudié les effets de micro-ondes à ondes continues de 10 GHz à 80 mW/cm<sup>2</sup> pendant 20 ou 30 minutes, ou à 20 mW/cm<sup>2</sup> pendant 120 minutes sur des chrysalides de ténébrions (*Tenebrio molitor*) - clairement dans les plages thermiques. Dans les groupes témoins, 90 % se sont métamorphosés en coléoptères adultes normaux alors que seulement 24 % des groupes exposés se sont développés normalement, 25 % sont morts et 51 % se sont développés anormalement. Les effets ont été considérés comme des anomalies induites par la chaleur jusqu'à ce qu'ils simulent la même exposition à la température en utilisant la chaleur rayonnante et constatent que 80 % des chrysalides se développaient normalement. Ils ont conclu que les micro-ondes étaient capables d'induire des effets anormaux autrement que par des dommages thermiques.

## Mouches à fruits

Les insectes à tous les stades métamorphiques du développement ont été étudiés à l'aide de la RFR, y compris les stades de l'œuf, de la larve, de la nymphe et de l'adulte. De nombreux travaux ont été réalisés sur les effets génétiques et autres avec des mouches à fruits (*D. melanogaster*) en raison de leur système génétique bien décrit, de la facilité d'exposition, de la grande taille des couvées, de l'espace minimal requis en laboratoire et des taux de reproduction rapides. Pendant plusieurs décennies, Goodman et Blank, en utilisant les CEM-ELF sur des modèles de *drosophiles*, ont constaté des effets sur les protéines de choc thermique et plusieurs autres effets ([201] ; et voir "Mécanismes" ci-dessus). Elle est considérée comme un modèle comparable aux autres insectes sauvages de cette taille. *D. melanogaster* est peut-être l'insecte le plus étudié en laboratoire sur Terre, même si les espèces d'abeilles domestiques et apparentées, en raison de leurs pertes dévastatrices au cours de la dernière décennie et de leur importance pour l'agriculture, rattrapent rapidement leur retard.

Michaelson et Lin [50] ont noté que les insectes exposés aux RFR réagissent d'abord en tentant de s'échapper, puis en perturbant leur coordination motrice, en se raidissant, en s'immobilisant et finalement en mourant, selon la durée d'exposition et le type d'insecte. Par exemple, *D. melanogaster* a survécu plus de 30 min alors que certains insectes tropicaux ne vivent que quelques secondes à la même intensité de champ. On a également noté des changements de concentration de nombreux produits métaboliques et des effets sur l'embryogenèse - la période nécessaire à un papillon pour achever sa métamorphose - avec une accélération de la gastrulation et de la croissance des larves [17]. Michaelson et Lin [50] ont cité plusieurs études négatives sur la croissance larvaire de *D. melanogaster* exposé à des ondes continues de RF entre 25 et 2 450 MHz [280, 281] et sur la mutagénicité [282]. Cela s'est produit après que Heller et Mickey [283] ont constaté que le nombre de mutations récessives liées au sexe était multiplié par dix avec les RFR pulsés.



entre 30 et 60 MHz. Il s'agit de l'une des premières études à avoir constaté que les pulsations seules constituaient une exposition biologiquement active.

Comme l'ont signalé Michaelson et Lin [50], Tell [284] a examiné les propriétés d'absorption physiologique de *D. melanogaster* et a constaté qu'un groupe de mouches mâles de type sauvage âgées de 6 jours, exposées à 2 450 MHz pendant 55 minutes dans un champ intense, ont subi une réduction spectaculaire de 65 % de leur poids corporel. Cette réduction a été attribuée à la déshydratation. Ils ont ensuite cherché à calculer les propriétés d'absorption de la mouche à fruits par rapport aux ondes électromagnétiques planes et ont constaté qu'une mouche n'a qu'une surface effective de 1/1 000ème de sa section transversale géométrique et qu'elle est donc une espèce de test inefficace pour les radiations micro-ondes absorbées. Cependant, ils ont conclu que les mouches à fruits étaient sensibles à l'énergie absorbée à des niveaux thermiques comme un résonateur à corps noir à une densité de puissance de  $1,044 \times 10^4 \text{ mW/cm}^2$ , correspondant à une densité de flux thermique de  $0,562 \times 10^{-3} \text{ cal}$ . Ce sont les niveaux que l'on trouve aujourd'hui à proximité des installations de radiodiffusion et des tours de téléphonie cellulaire.

Des études plus récentes sur le rayonnement radioélectrique menées par Weisbrot et al. [285] à l'aide de téléphones mobiles GSM multibandes (900/1 900 MHz ; DAS d'environ 1,4 W/kg) sur *D. mela-nogaster* pendant la période de développement de 10 jours, de la ponte à la nymphose, ont montré que le rayonnement non thermique augmentait le nombre de descendants, les niveaux de protéine de choc thermique 70, la liaison à l'ADN de l'élément de réponse au sérum (SRE) et induisait la phosphorylation du facteur de transcription nucléaire ELK-1. En quelques minutes, on a observé une augmentation rapide de la hsp70, qui n'était apparemment pas un effet thermique. Avec les composants identifiés des voies de transduction du signal, les chercheurs ont conclu que l'étude fournissait des bio-marqueurs sensibles et fiables pour des directives de sécurité réalistes en matière de RFR.

Panagopoulos et al. [286] ont constaté des effets graves sur l'ovogenèse aux stades précoce et intermédiaire chez *D. melanogaster* lorsque les mouches ont été exposées *in vivo* au rayonnement GSM 900-MHz ou DCS 1 800-MHz d'un téléphone cellulaire numérique commun, à des niveaux non thermiques, pendant quelques minutes par jour au cours des 6 premiers jours de la vie adulte. Les résultats suggèrent que la diminution de la ponte précédemment signalée [287-289] est due à la dégénérescence d'un grand nombre de chambres d'œufs après fragmentation de l'ADN de leurs cellules constitutives, induite par les deux types de rayonnement des téléphones mobiles. La mort cellulaire induite a été enregistrée pour la première fois dans tous les types de cellules constituant une chambre d'ovule (cellules folliculaires, cellules nourricières et ovocyte) et dans tous les stades de l'ovogenèse précoce et moyenne, du germarium au stade 10, au cours duquel la mort cellulaire programmée ne se produit pas physiologiquement. Le germarium et les stades 7-8 se sont avérés être les stades de développement les plus sensibles au stress électromagnétique induit par les champs GSM et DCS. Le germarium était également

se sont révélés plus sensibles que les stades 7-8. Ces articles, pris collectivement, indiquent de graves effets potentiels pour toutes les espèces d'insectes de taille similaire à celle des mouches à fruits, dus à la technologie des téléphones portables, y compris l'infrastructure et les dispositifs de transmission.

Les mouches à fruits se sont également révélées sensibles aux CEM-ELF. Gonet et al. [290] ont constaté qu'une exposition aux CEM-ELF de 50 Hz affectait tous les stades de développement de la ponte et du développement des femelles de *D. melanogaster*, et affaiblissait la ponte dans les générations suivantes.

Savić et al. [291] ont constaté que les champs magnétiques statiques influençaient à la fois le développement et la viabilité de deux espèces de *drosophiles* (*D. melanogaster* et *D. hydei*). Les deux espèces ont terminé leur développement (de l'œuf à l'adulte), dans et hors du champ magnétique statique induit par un double - aimant en fer à cheval. Les flacons traités contenant les œufs ont été placés dans l'espace entre les pôles magnétiques (47 mm) et exposés à l'induction magnétique moyenne de 60 mT, tandis que les groupes témoins ont été maintenus loin de la source de champ magnétique. Ils ont constaté que l'exposition au champ magnétique statique réduisait le temps de développement des deux espèces, mais que seuls les résultats pour *D. hydei* étaient statistiquement significatifs. En outre, la viabilité moyenne des deux espèces était significativement plus faible par rapport aux témoins. Ils ont conclu qu'un champ magnétique statique de 60 mT pouvait être un facteur de stress potentiel, influençant à différents niveaux le développement embryonnaire et post-embryonnaire des mouches des fruits.

## Coléoptères

D'autres espèces d'insectes réagissent également aux CEM-ELF et aux CEM-FR. Newland et al. [292] ont constaté que les blattes (*Periplaneta americana*) évitaient par leur comportement les champs électriques statiques omniprésents dans l'environnement, qu'ils soient d'origine naturelle ou humaine. Ces champs peuvent exister à proximité des lignes électriques ou là où les services publics mettent les lignes neutres à la terre. Ils ont constaté des changements de comportement chez les insectes en réponse aux champs électriques, testés dans une chambre à choix en Y avec un champ électrique généré dans un bras de la chambre. Le comportement locomoteur et l'évitement étaient affectés par la magnitude des champs électriques, avec jusqu'à 85 % des individus évitant le bras chargé lorsque le champ électrique statique à l'entrée du bras était supérieur à 8-10 kV/m. Cherchant à déterminer les mécanismes de perception et d'interaction, ils ont ensuite procédé à l'ablation chirurgicale des antennes et les cafards ont été incapables d'éviter les champs électriques. Ils en ont conclu que les antennes sont cruciales dans la détection des champs électriques par les blattes, ce qui les aide à éviter ces champs. Ils ont également noté que la capacité des blattes à détecter les champs électriques est due à leurs longues antennes qui sont facilement chargées et déplacées par ces champs, et non à un système de détection spécialisé. Cela conduit à la

la possibilité que d'autres insectes puissent également répondre aux champs électriques par le biais de leurs seules antennes.

Vácha et al. [208] ont constaté que les blattes (*P. americana*) étaient sensibles aux faibles champs RFR et que la fréquence de Larmor à 1,2 MHz en particulier avait un "effet assourdissant" sur la magnétoréception. Le paramètre qu'ils ont étudié était l'augmentation de l'activité locomotrice des cafards induite par des changements périodiques de 60° de la position du Nord géomagnétique. Le début de l'effet perturbateur d'un champ de 1,2 MHz a été trouvé entre 12 et 18 nT alors que le seuil d'un champ de fréquence deux fois plus élevée (2,4 MHz) se situait entre 18 et 44 nT. Un champ de 7 MHz n'a montré aucun effet significatif, même à un seuil maximal de 44 nT. Les résultats suggèrent des effets de résonance et que les insectes pourraient être équipés du même système de magnétoréception que les oiseaux.

Prolie et al. [293] ont étudié les changements de comportement via le système nerveux de coléoptères cérambycides (*Morimus fune-reus*) dans un champ ouvert avant et après l'exposition à un ELF-MF de 50 Hz à 2 mT. Les groupes expérimentaux ont été divisés en plusieurs catégories d'activité. Les résultats ont montré que l'activité augmentait dans les groupes ayant une activité motrice moyenne et faible, mais diminuait chez les individus très actifs. Une grande variabilité individuelle a été constatée dans les groupes expérimentaux, ainsi que des différences dans les activités motrices entre les sexes avant et après l'exposition aux CEM-FE. Ils ont supposé que les changements d'activité chez les deux sexes étaient dus à l'exposition aux ELF-MF. Seule une analyse détaillée de l'activité locomotrice à intervalles d'une minute a montré des - différences de comportement statistiquement significatives entre les sexes.

## Fourmis

Les fourmis constituent un autre taxon sensible aux CEM. Les fourmis représentent entre 15 et 25 % de la biomasse animale terrestre et prospèrent dans la plupart des écosystèmes sur presque toutes les masses continentales de la Terre. À titre de comparaison, la biomasse totale estimée (poids) de toutes les fourmis du monde équivaut à la biomasse totale estimée de tous les humains. Leur organisation sociale complexe en colonies, avec des capacités de résolution de problèmes, la division du travail et la communication individuelle et avec l'ensemble de la colonie par le biais de signaux comportementaux et phéromonaux complexes, peut expliquer leur succès dans tant d'environnements. Certaines espèces de fourmis (par exemple, le groupe *Formica rufa*) sont connues pour construire des colonies sur des failles sismiques actives et on a constaté qu'elles changeaient de comportement plusieurs heures avant les tremblements de terre [294], ce qui démontre les possibilités de prédiction. Les fourmis peuvent modifier les habitats, influencer le cycle des nutriments, disséminer les graines, exploiter les ressources et se défendre. Les fourmis ont évolué conjointement avec d'autres espèces, ce qui a conduit à de nombreux types de relations mutuellement bénéfiques et antagonistes.

Les fourmis (par exemple, *Solenopsis invictus*) sont connues depuis longtemps pour être sensibles aux champs magnétiques, qu'ils soient naturels ou artificiels [295]. On a constaté que les fourmis (par exemple *Atta colombica*), comme les oiseaux, sont sensibles aux champs naturels de la Terre et utilisent à la fois une boussole solaire les jours ensoleillés et une boussole magnétique en cas de couverture nuageuse [296]. Dander et Dander [297] ont également constaté que les fourmis tisserandes (*Oecophylla* spp) avaient une orientation de boussole lumineuse plus efficace et une orientation de boussole magnétique beaucoup moins efficace, ce qui suggère qu'elles passent de la première à la seconde lorsque les repères visuels de la boussole céleste deviennent indisponibles. Esquivel et al. [298] ont démontré que cette magnétoréception est due à la présence de particules de magnétite de taille variable et à la résonance paramagnétique chez les fourmis de feu (*Solenopsis* spp). Mais Riveros et Srygley [299] ont trouvé une relation plus complexe avec une boussole magnétique plutôt qu'avec la seule présence de magnétite lorsque des fourmis coupeuses de feuilles (*Atta colombica*) ont été soumises à une impulsion magnétique brève mais forte qui a provoqué une désorientation complète pour la recherche du nid. Ils ont constaté que les expositions externes pouvaient interférer avec la boussole magnétique naturelle des fourmis dans l'intégration du chemin du foyer, ce qui indique la preuve d'une boussole basée sur des particules multi-domaines et/ou super-paramagnétiques plutôt que sur des particules à domaine unique comme la magnétite.

Acosta-Avalos et al. [300] ont découvert que les fourmis de feu sont sensibles aux champs magnétiques alternatifs de 60 Hz ainsi qu'aux champs magnétiques constants, modifiant leur orientation magnétique et leur magnétosensibilité en fonction de la relation entre les deux types de champs magnétiques. Le courant alternatif avait la capacité de perturber l'orientation des fourmis, ce qui soulève la question des effets sur les espèces sauvages des câblages souterrains et de la pratique courante des compagnies d'électricité qui utilisent la terre comme voie de retour neutre vers les sous-stations, créant ainsi des courants vagabonds en cours de route [99].

Camelítepe et al. [301] ont testé la réponse des fourmis des prés noires (*Formica pratensis*) sous des CEM statiques géomagnétiques naturels et artificiels de force terrestre (24,5  $\mu$ T). Ils ont constaté que sous le champ géomagnétique naturel, lorsque tous les autres indices d'orientation étaient éliminés, il y avait une hétérogénéité significative de la distribution des fourmis, la - majorité recherchant le nord géomagnétique dans l'obscurité, tandis que dans des conditions de lumière, les fourmis ne discriminaient pas le nord géomagnétique. Sous exposition artificielle aux CEM, cependant, l'orientation des fourmis était principalement sur l'axe magnétique artificiel N/S avec une préférence significative pour le nord artificiel dans les deux conditions de lumière et d'obscurité. Cela indique la capacité des CEM à modifier l'orientation des fourmis.

Il a également été démontré que les fourmis réagissent aux radiofréquences [302, 303]. Cam-maerts et al. [304] ont découvert que des expositions au GSM 900 MHz à 0,0795  $\mu$ W/cm<sup>2</sup> inhibaient de manière significative la mémoire et la capacité de réaction des fourmis.

l'association entre les sites de nourriture et les indices visuels et olfactifs chez les fourmis (*Myrmica sabuleti*) et a fini par effacer complètement la mémoire. Une exposition ultérieure, après une brève - période de récupération, a accéléré la perte de mémoire/olfaction en quelques heures contre quelques jours, indiquant un effet cumulatif même à très faible intensité. L'état général des colonies de fourmis exposées a fini par ressembler à celui du trouble d'effondrement des colonies d'abeilles (*Apis mellifera*). Bien que l'impact du rayonnement GSM 900 MHz ait été plus important sur la mémoire visuelle que sur la mémoire olfactive, les chercheurs ont conclu que de telles expositions - communes aux téléphones cellulaires/tours - étaient capables d'avoir un impact désastreux sur un large éventail d'insectes utilisant la mémoire olfactive et/ou visuelle, y compris les abeilles. De nombreuses espèces de fourmis (par exemple, *Lasius neglectus*, *Nylanderia fulva*, *Camponotus* spp, *Hymenoptera formicidae*, *Solenopsis invicta*, entre autres) sont attirées par l'électricité, les appareils électroniques et les lignes électriques, provoquant ainsi des courts-circuits et des incendies. Selon une hypothèse [305], l'accumulation de fourmis dans les équipements électriques pourrait être due au fait que quelques "fourmis ouvrières" en quête de chaleur se frayent un chemin dans les petits espaces, réalisant des contacts électriques qui provoquent ensuite une libération de phéromones de la glande exocrine d'alarme qui attirent d'autres fourmis, qui suivent ensuite le même cycle. Dans leur étude, ils ont constaté que les ouvrières soumises à un courant alternatif de 120 V libéraient des alcaloïdes de venin, des phéromones d'alarme et des phéromones de recrutement qui provoquaient à la fois l'attraction et l'orientation des fourmis, ainsi que d'autres substances inconnues modifiant le comportement. Mais étant donné la façon dont les fourmis sont affectées par les CEM en général, il est probable qu'un facteur d'attraction soit également impliqué, et pas seulement la chaleur et les petits espaces.

Il existe des preuves que les fourmis utilisent leurs antennes comme "antennes" dans des communications électrochimiques bidirectionnelles. Il y a plus de 100 ans, le chercheur suisse Auguste Forel [306] a retiré les antennes de différentes espèces de fourmis et les a rassemblées dans un même endroit. Ce qui aurait normalement dû susciter des comportements agressifs entre les différentes espèces ne s'est pas produit et elles se sont entendues comme si elles appartenaient à la même colonie. Pour Forel, cela indiquait une capacité des antennes de fourmis à aider les différentes espèces de fourmis à s'identifier entre elles.

Deux mécanismes chez les fourmis sont connus depuis longtemps pour la réceptivité chimique ainsi que la sensibilité électromagnétique. Récemment, Wang et al. [307] ont trouvé des preuves que les signaux chimiques situés spécifiquement sur les antennes par rapport à d'autres zones du corps attirent davantage l'attention des compagnons de nidification. Lorsque les hydrocarbures cuticulaires (CHCs) ont été enlevés des antennes par un solvant, les compagnons de nidification ont répondu de manière moins agressive qu'à d'autres zones du corps, indiquant que les antennes révèlent l'identité du compagnon de nidification, transmettant et recevant des signaux sociaux. En ce qui concerne la magnétoréception, des mesures magnétiques [308-310] ont révélé la présence de magnétite biogénique.

était concentré dans les antennes et d'autres parties du corps de la fourmi *Pachycondyla marginata*. De Oliveira et al. [311] ont également trouvé des preuves de magnétite et d'autres matériaux magnétiques incrustés à divers endroits du tissu des antennes de *P. marginata*, ce qui indique que les antennes fonctionnent comme des magnétorécepteurs. La quantité de matériau magnétique semblait suffisante pour produire une sortie méca-nosensorielle modulée par le champ magnétique et a donc démontré l'existence d'un sens de magnéto-réception/transduction chez les fourmis migratrices.

## Tiques

Les tiques sont des membres de l'ordre des Arachnides, partagé avec les scorpions et les araignées. Des articles récents sur une espèce de tique (*Dermacentor reticulatus*) reflètent une attraction pour certaines fréquences mais pas pour d'autres. Vargová et al. [312, 313] ont découvert que l'exposition aux RFR pouvait être un facteur potentiel modifiant à la fois la présence et la distribution des tiques dans l'environnement. Des études ont été menées pour déterminer l'affinité potentielle des tiques pour les RFR en utilisant des tubes blindés contre les radiations (RST) dans des conditions contrôlées dans un laboratoire de compatibilité électromagnétique dans une chambre anéchoïque. Les tiques ont été irradiées à l'aide d'une antenne cornet à guide d'ondes à double tranchant à des RF-EMF à 900 et 5 000 MHz ; 0 MHz a servi de contrôle. Les résultats ont montré que les RF de 900 MHz induisaient une concentration plus élevée de tiques sur le bras irradié du RST alors qu'à 5 000 MHz, les tiques s'échappaient vers le bras blindé. En outre, il a été démontré que les RFR à 900 MHz provoquaient des mouvements soudains, spécifiques et inhabituels des tiques pendant l'exposition, se manifestant par des secousses du corps ou des jambes [312]. Ces études constituent la première preuve expérimentale de la préférence pour les RFR et des changements comportementaux chez *D. reticulatus*, avec des implications pour les RFR introduits dans l'environnement naturel par les appareils et les infrastructures. Dans une autre étude, Frątczak et al. [314] ont rapporté que les tiques *Ixodes ricinus* étaient attirées par le RFR 900 MHz à  $0,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , en particulier celles infectées par la Rickettsia (fièvre boutonneuse).

La radiofréquence peut être un nouveau facteur de distribution des tiques, au même titre que des facteurs connus comme l'humidité, la température et la présence d'hôtes, provoquant une distribution concentrée non homogène ou en mosaïque des tiques dans les habitats naturels. La préférence des tiques pour les fréquences de 900 MHz communes à la plupart des téléphones portables pourrait avoir des conséquences écologiques et épidémiologiques importantes. L'augmentation des expositions dues à l'utilisation d'appareils personnels et d'infrastructures dans les habitats naturels où l'on trouve des tiques peut accroître à la fois l'infestation par les tiques et la transmission de maladies. D'autres études doivent se pencher sur ces travaux, étant donné l'omniprésence des tiques aujourd'hui, leur propagation vers le nord en raison du changement climatique dans l'hémisphère nord, et l'augmentation des maladies, parfois mortelles, qu'elles transmettent aux humains, aux animaux domestiques et à la faune sauvage.

## Papillons monarques

Le papillon monarque américain (*D. plexippus*) fascine les chercheurs depuis plus de 100 ans, car c'est le seul insecte connu pour migrer en plusieurs générations [315-319], avec la capacité de trouver leur lieu de naissance exact sur des plantes d'asclépiade spécifiques (*Asclepias* spp.) à de grandes distances à travers la terre et les océans.

Les monarques (*D. plexippus*), que l'on trouve dans tout le sud du Canada, aux États-Unis et en Amérique du Sud, sont généralement divisés par les Rocheuses en groupes migratoires orientaux et occidentaux. Leur population a précipitamment décliné de 99,4 % depuis les années 1980 (dont 85 % depuis 2017) et de 90 % au cours des deux dernières décennies dans les populations occidentales et orientales [13, 15]. Ces déclins abrupts sont dus à de nombreuses causes anthropiques et pourraient avoir déjà franchi les seuils d'extinction, nous privant ainsi non seulement de leur beauté et de leur inspiration, mais aussi du modèle parfait pour l'étude des migrations animales sur de longues distances en général.

Les papillons monarques comptent parmi les invertébrés les plus appréciés d'Amérique du Nord. Depuis des siècles, ils parcourent des milliers de kilomètres au cours d'une migration automnale emblématique depuis le sud du Canada et le centre et le nord-est des États-Unis jusqu'à une petite zone d'environ 2 072 kilomètres carrés dans le centre du Mexique, où ils hivernaient autrefois par millions dans de petites forêts de sapins oyamel isolées. Lorsqu'ils atteignent leur destination finale, certains auront parcouru des distances dépassées uniquement par certaines espèces d'oiseaux de mer migrants. Le monarque est le seul insecte connu pour migrer chaque année sur plus de 4 828 km à raison de 402 km par jour à l'automne, de la frontière canadienne au Mexique, et au printemps pour y revenir. Comme certaines espèces d'oiseaux, c'est le seul papillon connu à avoir un schéma de migration à double sens. Le monarque n'est suivi que par le ver gris de l'armée (*Euxoa auxiliaris*) qui peut migrer sur plusieurs milliers de kilomètres vers des sites en altitude dans les montagnes Rocheuses pour échapper à la chaleur et à la sécheresse des basses terres.

Mais les monarques sont plus intéressants que ce seul exploit migratoire. La façon dont ils y parviennent est un mystère de longue date, car l'ensemble de leur cycle de vie, y compris leur migration de retour en deux étapes au printemps, est multigénérationnel, ce qui indique que les facteurs génétiques dans la cartographie directionnelle, puisque la migration de retour finale à l'automne vers le sud ne peut être considérée comme "apprise". "Plusieurs - mécanismes à facettes multiples doivent entrer en jeu, ainsi que des complexités peu comprises dans la façon dont ces mécanismes coopèrent et s'équilibrent entre eux dans différentes circonstances environnementales. Les monarques passent également du statut d'insectes solitaires pendant les premiers stades de leur développement, confinés dans des endroits spécifiques, à celui d'insectes sociaux après que la troisième génération a atteint les latitudes nord et s'est tournée vers le sud.

vers le sud pendant la dernière migration d'automne. Et tout cela se passe dans un cerveau de la taille d'un grain de sable.

Reppert et al. [320] ont publié en 2010 une excellente étude sur les complexités de la migration des monarques, notant que " ... **des** études récentes sur la migration automnale ont mis en lumière les mécanismes qui sous-tendent la navigation vers le sud, à l'aide d'une boussole solaire compensée par le temps. Les indices de luminosité, tels que le soleil lui-même et la lumière polarisée, sont traités par les deux yeux et probablement intégrés dans le complexe central du cerveau, site présumé de la boussole solaire. La compensation temporelle est assurée par des horloges circadiennes dotées d'un mécanisme moléculaire distinct et résidant dans les antennes. Les monarques peuvent également utiliser une boussole magnétique, car ils possèdent deux cryptochromes qui ont la capacité moléculaire de magnétoréception dépendante de la lumière. De multiples approches génomiques sont utilisées pour identifier les gènes de navigation. Les papillons monarques apparaissent donc comme un excellent organisme modèle pour étudier les bases moléculaires et neurales de la migration sur de longues distances. "Reppert et de Roode [321] ont mis à jour cette information en 2018.

Bien que l'on sache depuis un certain temps que les monarques - utilisent une boussole solaire directionnelle à compensation temporelle du rythme circadien [316, 322-338], de nombreuses questions subsistent quant à sa dynamique et aux préoccupations concernant les effets des rayonnements.

On sait que les antennes des monarques contiennent de la magnétite [339, 340] et des cryptochromes [335, 336, 341, 342], qui jouent tous deux un rôle dans la magnétoréception (voir "Mécanismes" ci-dessus). Une première étude de Jones et MacFadden [343] a révélé la présence de matériaux magnétiques principalement dans la tête et le thorax de monarques disséqués. Plus récemment, Guerra et al. [16] ont trouvé des preuves convaincantes que les monarques utilisent une boussole magnétique pour faciliter leur longue migration automnale vers le Mexique. Ces chercheurs ont utilisé des études de simulateur de vol pour montrer que les migrants possèdent une boussole magnétique d'inclinaison - pour aider la migration d'automne vers l'équateur. Ils ont découvert que cette boussole d'inclinaison dépend de la lumière, utilisant la lumière ultraviolette A/bleue entre 380 et 420 nm et ont noté que l'importance de la lumière (<420 nm) pour la fonction de boussole d'inclinaison n'avait pas été prise en compte dans les études précédentes sur les monarques. Ils ont également noté que les antennes sont importantes pour une boussole d'inclinaison car elles contiennent des magnéto-capteurs sensibles à la lumière. À l'instar de certains oiseaux migrants, la présence d'une boussole d'inclinaison servirait de mécanisme d'orientation lorsque les repères directionnels de la lumière du jour sont entravés par un temps nuageux ou inclément ou pendant le vol de nuit. Elle peut également augmenter l'orientation de la boussole solaire compensée par le temps pour une directionnalité appropriée tout au long de la migration. On a constaté que la boussole d'inclinaison fonctionnait à des champs magnétiques de force terrestre, un paramètre important.



La question reste posée : La boussole magnétique des monarques peut-elle être perturbée par les CEM anthropiques comme c'est le cas pour l'orientation géomagnétique des oiseaux migrateurs [213]. Certains éléments indiquent que c'est possible. Perez et al. [330] ont constaté que les monarques étaient complètement désorientés après avoir été exposés à un champ magnétique puissant (0,4 T MF pendant 10 s, soit environ 15 000 fois le champ magnétique terrestre) immédiatement avant d'être relâchés, par rapport aux témoins. Il s'agit d'une exposition élevée, mais qui se situe dans la fourchette des expositions artificielles actuelles, à proximité des lignes électriques.

## Abeilles, guêpes et autres

Les pollinisateurs, et les abeilles en particulier, sont des espèces clés sans lesquelles la disparition des pollinisateurs aurait des effets néfastes sur l'ensemble des réseaux alimentaires et du biome terrestre. En raison de leur rôle central et de leur accessibilité pour la recherche, les études sur les abeilles ont permis de créer une mine d'informations, notamment sur les CEM anthropiques.

Les abeilles - en particulier les abeilles mellifères et les bourdons - sont une autre espèce d'insecte emblématique, appréciée pour son rôle dans la pollinisation, la production de miel, de propolis, de gelée royale et de cire d'abeille, son importance capitale pour notre alimentation et son rôle crucial dans la santé et la stabilité écologiques mondiales. Présentes sur tous les continents, à l'exception de l'Anarctique, partout où il y a des plantes à fleurs nécessitant une pollinisation par les insectes, il existe plus de 16 000 espèces d'abeilles connues, réparties en sept familles biologiques différentes, comprenant quatre branches principales. Certaines espèces vivent socialement en colonies tandis que d'autres sont solitaires. L'abeille domestique occidentale (*Apis mellifera*) est la plus connue et la plus étudiée, notamment en raison de son rôle central dans l'agriculture. Les abeilles se nourrissent de nectar pour l'énergie et de pollen pour les protéines et les nutriments, et ont évolué conjointement avec de nombreuses espèces végétales de manière étonnamment complexe. Elles sont également très sensibles aux champs électromagnétiques naturels et anthropiques. La cire d'abeille elle-même a des propriétés électriques [50].

L'apiculture humaine est pratiquée depuis l'époque des anciennes cultures égyptienne et grecque et les abeilles sont étudiées de près depuis les années 1800. Presque toutes les espèces d'abeilles, y compris les espèces sauvages et celles élevées à des fins commerciales, subissent depuis des décennies de multiples agressions. Il s'agit notamment des pesticides, des herbicides, du changement climatique, de diverses maladies bactériennes et virales, des infestations par des espèces d'acariens parasites - en particulier *Apis cerana*, *Varroa destructor* et *Varroa jacobsoni* à partir du milieu des années 1980 - et de la prédation par des espèces introduites qui s'attaquent directement aux abeilles (par exemple, le frelon géant mangeur d'abeilles *Vespa mandarinia*), et qui modifient l'écologie des plantes au fil du temps pour nuire à l'approvisionnement alimentaire des abeilles. Certains ont suggéré que la disparition des abeilles pourrait également être liée à un vieillissement prématuré dû à un raccourcissement des télomères causé par l'environnement [344].

Le trouble de l'effondrement des colonies (CCD) est la manifestation la plus dramatique de la disparition des abeilles domestiques. Les abeilles ouvrières disparaissent brusquement d'une ruche sans laisser de trace, ce qui donne une ruche vide avec peut-être une reine restante et quelques abeilles ouvrières malgré les ressources abondantes laissées sur place. Peu d'abeilles mortes, voire aucune, ne sont retrouvées à proximité de la ruche. La CCD a été décrite pour la première fois aux États-Unis en 2006, en Floride, dans des colonies commerciales d'abeilles domestiques occidentales. Van Engelsdorp et al. [345] ont quantifié les pertes d'abeilles dans toutes les exploitations apicoles et ont estimé qu'entre 0,75 et 1,00 million de colonies d'abeilles domestiques sont mortes aux États-Unis au cours de l'hiver 2007-2008. Jusqu'à cette étude, les estimations du déclin des populations d'abeilles mellifères ne tenaient pas compte des pertes survenant pendant la période d'hivernage, ce qui sous-estimait la mortalité réelle des colonies.

Le même phénomène avait été décrit par des apiculteurs en France en 1994 [346] - attribué par la suite au moment de la floraison des tournesols et à l'utilisation de l'imidaclopride (IMD), un insecticide à base de nicotine chlorée ou "néonicotinoïde" appliqué pour la première fois sur les tournesols dans ce pays [347]. Semblables au DDT mais considérés comme plus sûrs pour les mammifères, y compris l'homme, les néonicotinoïdes sont une classe de neurotoxines à libération lente qui bloquent le système nerveux des insectes via les récepteurs d'acétylcholine, interférant avec la signalisation neuronale à travers les synapses. Des doses sublétales peuvent perturber la navigation des abeilles.

Depuis, des phénomènes similaires ont été observés en Europe [348] et dans certains pays d'Asie. Les hypothèses de causalité incluent tous les facteurs susmentionnés, avec une concentration variable sur les classes de pesticides comme les néonicotinoïdes et les cultures génétiquement modifiées, mais aucun agent unique n'explique de manière adéquate le CCD. Bromenshenk et al. [349] ont cependant identifié une paire/co-infection pathogène avec deux virus à ARN non signalés auparavant - *V. destructor-1*, et les virus Kakugo, et un nouveau virus iridescent (IIV) (*Iridoviridae*) ainsi que *Nosema ceranae* - chez les abeilles domestiques d'Amérique du Nord qui étaient associées à toutes les colonies CCD échantillonnées. L'appariement des agents pathogènes n'a pas été observé dans les colonies non CCD. Des essais ultérieurs en cage avec l'IIV type-6 et *N. ceranae* ont confirmé que la co-infection avec ces deux agents pathogènes était plus mortelle pour les abeilles que l'un ou l'autre agent pathogène seul. De nombreuses questions subsistent.

Il existe deux groupes d'enquête nationaux aux États-Unis - le ministère américain de l'Agriculture (USDA) qui a commencé à enquêter sur les populations d'abeilles gérées en 2015 mais dont le financement a été coupé fin 2019 ; et le Bee Informed Partnership (BIP), un organisme à but non lucratif qui coordonne avec les installations de recherche et les universités. Avant les réductions de financement de l'USDA, les colonies gérées ont diminué de 40 % à cause du CCD [350], avec 26 % supplémentaires sur le même trimestre en 2019 [351]. La période d'enquête de BIP du 1er avril 2018 au 1er avril 2019 a révélé que les apiculteurs américains ont perdu environ 40,7 % de leurs colonies d'abeilles domestiques gérées. L'année précédente a connu un taux annuel similaire



des pertes de 40,1 %. Le taux annuel moyen de pertes rapporté par les apiculteurs depuis 2010-2011 était de 37,8 % [352].

Toujours aux États-Unis [...] pour la première fois en 2016, sept espèces d'abeilles hawaïennes à face jaune (*Hylaeus anthracinus*, *Hylaeus longiceps*, *Hylaeus assimulans*, *Hylaeus facilis*, *Hylaeus hilaris*, *Hylaeus kuakea* et *Hylaeus mana*) ont été ajoutées à la liste fédérale des espèces en danger, ainsi que le bourdon à pattes rouillées (*Bombus affinis*) qui, avant la fin des années 1990, était largement dispersé dans 31 États américains. États-Unis [353]. Mathiasson et Rehan [354] ont examiné 119 espèces dans des spécimens de musées du New Hampshire remontant à 125 ans et ont conclu que 14 espèces présentes dans toute la Nouvelle-Angleterre étaient en déclin dans une proportion allant jusqu'à 90 %, y compris les abeilles mineuses et les martinets, moins étudiés, qui nichent dans le sol, contrairement aux abeilles domestiques qui nichent dans des ruches commerciales ou dans les arbres, les arbustes et les crevasses des rochers dans la nature.

Dans le monde entier, de nombreuses populations d'abeilles et d'autres pollinisateurs ont également décliné au cours des deux dernières décennies. Les colonies d'abeilles domestiques (*Apis mellifera*) ont diminué de 25 % en 20 ans en Europe et de 59 % en 58 ans en Amérique du Nord, et de nombreuses populations de bourdons sauvages en Europe et en Amérique du Nord ont disparu localement [355-358]. Mais si des contractions dramatiques de l'aire de répartition ont été observées, toutes les abeilles ne sont pas en déclin partout ; certaines populations se développent en fonction de facteurs opportunistes et d'adaptabilité des espèces. Pour de nombreuses espèces, les données sont encore insuffisantes, de mauvaise qualité ou inexistantes [359]. En outre, le déclin des abeilles peut affecter la survie de la flore. Miller-Struttmann et al. [360] ont enregistré un déclin des fleurs de 60 % après 40 ans de réchauffement climatique dans les prairies alpines - des zones largement protégées des changements d'utilisation des terres. Les insectes sont très sensibles aux changements de température.

Une enquête britannique exhaustive sur les espèces de pollinisateurs [361] a révélé que sur 353 espèces d'abeilles sauvages et de syrphes présentes en Grande-Bretagne entre 1980 et 2013, 25 % avaient disparu des lieux qu'elles habitaient en 1980. D'autres estimations ont révélé une perte nette de plus de 2,7 millions d'individus dans des mailles de 1 km (0,6 mi) pour toutes les espèces. La diminution de la régularité des pollinisateurs suggère que les pertes sont concentrées sur les espèces rares. Des pertes liées à des habitats spécifiques ont également été identifiées, avec un déclin de 55 % parmi les espèces sauvages des hautes terres, tandis que les pollinisateurs des cultures dominantes ont augmenté de 12 %, probablement en raison des interventions des entreprises agricoles. Les déclins généraux ont révélé une détérioration fondamentale de la biodiversité au sens large et des services de pollinisation non agricoles.

Il ne fait aucun doute que l'immense diversité des espèces de pollinisateurs sur la planète souffre et que les pertes pourraient être catastrophiques : on estime que 90 % des plantes sauvages et 30 % des cultures mondiales sont menacées [362].

Il est probable que l'augmentation des niveaux de fond des CEM joue un rôle. Les abeilles sont connues depuis des décennies pour avoir une

Les abeilles ont un sens aigu des champs magnétiques DC de la Terre [363, 364] et dépendent de cette perception pour leur survie. Pendant des siècles, les apiculteurs ont remarqué des mouvements curieux dans les ruches, mais l'éthologiste autrichien Karl von Frisch a fini par interpréter cette activité dans les années 1940 et a obtenu le prix Nobel en 1973 pour ce qui est connu sous le nom de "danse de l'agitation" des abeilles. "Par le biais de cercles complexes et de motifs d'agitation, les abeilles communiquent l'emplacement des sources de nourriture aux autres membres de la ruche, en utilisant l'orientation du soleil et les champs magnétiques de la Terre comme vecteur de gravité, en "dansant" une carte que les membres de la ruche peuvent suivre comme le GPS intégré de la nature. Les abeilles détectent également la direction du soleil grâce à la lumière polarisée et, par temps couvert, utilisent les champs magnétiques de la Terre, probablement grâce à la présence de magnétite dans leur abdomen, et font appel à un apprentissage et une mémoire associatifs complexes [365].

S'appuyant sur les travaux antérieurs de Gould et al. [119], Kobayashi et Kirschvink [52] ont noté que la magnétite biogène chez les abeilles à miel se trouve principalement dans la partie dorsale antérieure de l'abdomen. Lorsque de petits bouts de fil de fer magnétisés ont été collés sur ces zones, ils ont interféré avec la capacité des abeilles à apprendre à distinguer les anomalies magnétiques dans les expériences de conditionnement, alors que le fil de fer non magnétisé utilisé dans les contrôles n'a pas interféré [366]. Kirschvink et Kobayashi [367] ont constaté que lorsque des techniques de remagnétisation par impulsions étaient utilisées sur des abeilles entraînées à sortir d'un labyrinthe en T, les abeilles en direction du nord pouvaient être converties en direction du sud, comme cela a été observé dans les magnétobactéries et la réorientation artificielle par Blakemore [113]. Les abeilles peuvent également être entraînées à réagir à de très faibles variations de l'intensité du champ géomagnétique [368]. Valkova et Vacha [369] ont étudié la possibilité que les abeilles utilisent une combinaison de paires de radicaux/cryptochromes et de magnétite pour détecter le champ géomagnétique et l'utiliser pour s'orienter comme de nombreux oiseaux.

Compte tenu de ces sensibilités, il est possible que les abeilles réagissent négativement, par des mécanismes multisensoriels, aux nombreuses sources d'interférences multifréquences d'origine anthropique. Les bourdons (*Bombus terrestris*), une espèce solitaire, et les abeilles domestiques (*Apis mellifera*), une espèce de ruche sociale, sont connus pour détecter les champs électriques faibles dans différents contextes comportementaux, en utilisant différents mécanismes sensoriels. La détection des champs électriques par les bourdons se fait probablement par l'intermédiaire de poils mécanosensoriels [370-372], tandis que les abeilles mellifères utilisent leurs antennes [373] qui sont couplées électromécaniquement au champ électrique environnant, dans l'organe antennaire de Johnston. Greggers et al. [373] ont découvert que les antennes des abeilles à miel oscillent sous l'effet d'une stimulation par champ électrique qui peut ensuite stimuler l'activité du nerf antennaire. Ce phénomène est dû au fait que les abeilles sont chargées électriquement et sont donc soumises à des forces électrostatiques. Erickson [374] a constaté que différentes surfaces

Colin et al. [375] ont constaté une variabilité saisonnière entre les - charges positives et négatives chez les abeilles au repos. Il a - également été démontré que les abeilles mellifères dont les antennes ont été enlevées ou fixées sont moins capables d'associer la récompense alimentaire à des stimuli de champ électrique et que les abeilles émettent des champs électriques modulés lorsqu'elles bougent leurs ailes (à environ 230 Hz) et leur corps (à environ 16,5 Hz) pendant la danse de l'agitation [373].

L'interaction électro-écologique entre les fleurs et les pollinisateurs est également connue depuis les années 1960 et est essentielle au transfert du pollen des fleurs aux abeilles [376-378]. On sait que lorsque les abeilles volent dans l'air, elles accumulent une charge positive. Les fleurs, en revanche, qui sont électriquement mises à la terre par leur système racinaire, ont tendance à avoir une charge négative dans leurs pétales, créée par l'air environnant qui transporte environ 100 V pour chaque mètre au-dessus du sol. La charge positive accumulée autour de la fleur induit une charge négative dans ses pétales, qui interagit ensuite avec la charge positive des abeilles. En fait, les abeilles n'ont même pas besoin de se poser sur les fleurs pour que le transfert de pollen ait lieu ; le pollen peut "sauter" de la fleur à l'abeille lorsque celle-ci s'approche, en raison des différences de charge entre les deux. Il semble donc que les abeilles et les fleurs aient toujours "communiqué" par le biais de champs électriques [379]. - Les abeilles peuvent également apprendre plus rapidement des tâches de discrimination de couleur lorsque les indices de couleur sont associés à des indices de champ électrique artificiels similaires à ceux qui entourent les fleurs naturelles, mais elles n'ont pas appris aussi facilement dans un environnement électriquement neutre [370].

Ces preuves indiquent que les champs électriques floraux sont utilisés dans une relation symbiotique coévolutive avec les abeilles. Clarke et al. [370, 371] ont même découvert que les bourdons peuvent distinguer les fleurs qui émettent des champs électriques différents comme signaux floraux pour attirer les pollinisateurs. Comme les indices visuels, les champs électriques floraux présentent des variations complexes de motifs et de structures que les bourdons peuvent distinguer, contribuant ainsi à la myriade d'indices complexes qui créent la mémoire des pollinisateurs des sources de nourriture florales. Et comme les champs électriques floraux peuvent changer - et changent effectivement - dans les secondes qui suivent la visite des pollinisateurs, cette capacité sensorielle facilite probablement un "échange d'informations" rapide et dynamique entre les fleurs et leurs pollinisateurs. Les bourdons peuvent même, de manière étonnante, utiliser les informations du champ électrique pour distinguer les fleurs offrant du nectar de celles qui n'en offrent pas [370].

### **Abeilles, sauterelles : ELF-EMF**

Les abeilles sont également connues pour être sensibles aux CEM-ELF anthropiques. En 1973, Wellenstein [380] a découvert que les - lignes électriques à haute tension avaient un effet négatif sur les abeilles domestiques dans les ruches en bois. Cela a en partie incité la Bonneville Power

Administration, une agence fédérale américaine opérant dans le nord-ouest du Pacifique sous l'égide du ministère de l'Énergie des États-Unis (U.S. DOE), pour étudier en 1974 [381-384] les effets des lignes de transmission sur les personnes, les plantes et les animaux, y compris les abeilles. Le groupe industriel, Electric Power Research Institute, a également suivi les recherches sur les abeilles [385, 386]. Ces deux études ont confirmé que les champs électriques des lignes de transmission peuvent affecter les abeilles à l'intérieur des ruches en bois, car le bois est un mauvais isolant et un courant peut être induit lorsque les ruches sont placées dans des champs électriques, qu'il y ait du métal ou non. L'intensité du courant à l'intérieur de la ruche a été influencée par l'intensité du champ électrique, la hauteur de la ruche et les conditions d'humidité, les effets étant perceptibles lorsque le courant induit dépasse 0,02-0,04 mA. En fonction de la hauteur de la ruche, cela se produit pour des intensités de champ comprises entre 2 et 4 kV/m. Les effets comprennent une augmentation de l'activité motrice avec une augmentation transitoire de la température de la ruche, une production excessive de propolis - (une matière résineuse utilisée par les abeilles pour sceller la ruche), une diminution des gains de poids de la colonie, une augmentation de l'irritabilité et de la mortalité, une production anormale de cellules royales, une perte de reine, une diminution du couvain de phoque et une faible survie de la colonie pendant l'hiver [387]. Les impacts ont été très probablement causés par des chocs électriques à l'intérieur des ruches [386, 388]. Les effets ont été atténués par la mise à la terre d'un écran/blindage métallique des ruches [385] ; cependant, les abeilles ne semblent pas affectées par les champs magnétiques qui pénètrent dans les blindages métalliques. Les auteurs ont conclu que les résultats du blindage indiquaient que les abeilles n'étaient pas affectées par le vol à travers un champ électrique externe allant jusqu'à 11 kV/m, mais ont noté que la conception de l'étude ne pouvait pas révéler si des effets subtils se produisaient.

Une étude plus récente des champs électriques réalisée par Migdał [389] s'est concentrée sur les effets comportementaux des abeilles sur la marche, le toilettage, le vol, l'immobilité, le contact entre individus et le mouvement des ailes. Ils ont constaté que la - fréquence, l'intensité et la durée d'exposition choisies ont des effets sur le comportement des abeilles. Les abeilles ont été exposées pendant 1, 3 et 6 heures à des champs électriques de 5,0 kV/m, 11,5 kV/m, 23,0 kV/m ou 34,5 kV/m (avec des témoins sous champ électrique <2,0 kV/m). Dans les groupes exposés, les résultats ont montré que l'exposition pendant 3 heures a entraîné une diminution du temps passé par les abeilles sur certains comportements ainsi que de la fréquence des comportements, alors qu'après 1 et 6 heures, les paramètres comportementaux ont augmenté dans les groupes. Les chercheurs ont conclu qu'une barrière permettant aux schémas comportementaux de se normaliser pendant certaines périodes était indiquée, bien qu'aucun des groupes exposés ne soit revenu aux valeurs de référence des témoins qui ont adhéré à des schémas comportementaux normaux. Les abeilles peuvent avoir des fenêtres de compensation qui semblent dépendre à la fois du temps et de l'intensité des champs électriques. L'importance de cette étude réside dans le fait que les abeilles doivent accomplir certaines activités - comme la fréquence de vol et la " danse de l'agitation " de l'abeille mellifère mentionnée plus haut - qui sont liées aux champs électriques.

critique pour l'espérance de vie et la survie. Même de légères perturbations séquentielles peuvent avoir des effets en cascade.

Dans une étude réalisée au début de 1988, Korall et al. [390] ont également constaté que les champs magnétiques (MF) avaient des effets sur les abeilles. Des rafales comparables à certaines expositions pulsées actuelles de MF artificiels à 250 Hz - la fréquence du bourdonnement pendant la danse de l'agitation - ont été appliquées parallèlement aux lignes de champ CEM naturelles et ont induit des "sauts" non équivoques de mauvaise orientation allant jusqu'à  $+10^\circ$  chez les abeilles pendant la danse de l'agitation. À lui seul, ce phénomène pourrait provoquer une confusion directionnelle dans les ruches. Des champs continus de 250 Hz avec des salves perpendiculaires à la MF statique n'ont cependant provoqué aucun effet. Ils ont conclu qu'une relation de résonance autre que les modèles de résonance classiques était indiquée (voir "Mécanismes" ci-dessus). Ces premiers travaux ont des implications pour les pulsations numériques ultérieures et toute la technologie sans fil à large bande.

Des travaux plus récents sur les abeilles domestiques et les CEM-ELF, menés par Shepherd et al [209] en 2018, ont révélé que l'exposition aiguë à des champs de 50 Hz à des niveaux allant de 20-100  $\mu\text{T}$  (au niveau du sol sous les conducteurs des lignes électriques), à 1 000-7 000  $\mu\text{T}$  (à moins de 1 m des conducteurs), réduisait l'apprentissage olfactif, la réussite du vol de butinage vers les sources de nourriture et l'alimentation, ainsi que la dynamique de vol altérée. Leurs résultats indiquent que les CEM-ELF 50 Hz des lignes électriques constituent un important facteur de stress environnemental pour les abeilles mellifères, avec des impacts potentiels sur les capacités cognitives et motrices.

Certaines espèces de guêpes se sont également révélées sensibles aux CEM-ELF. Pereira-Bomfim et al. [391] ont étudié la sensibilité magnétique de la guêpe sociale à papier (*Polybia paulista*) en analysant son comportement dans des champs géomagnétiques normaux et en présence de champs magnétiques externes modifiés par des aimants permanents (champs continus) ou par des bobines de Helmholtz (champs alternatifs). Ils ont évalué la modification du rythme de recherche de nourriture et du comportement de la colonie, ainsi que la fréquence des vols de départ/retour et les réponses comportementales des guêpes ouvrières situées sur la surface extérieure du nid. Ils ont constaté que la modification du champ - magnétique de l'aimant permanent à courant continu entraînait une augmentation de la fréquence des vols de recherche de nourriture et que les guêpes se regroupaient sur la surface du nid devant l'aimant, leur tête et leurs antennes étant dirigées vers la source de perturbation, ce qui pourrait indiquer une réaction à une menace potentielle et une stratégie de défense. Les témoins n'ont pas montré un tel comportement de regroupement. Les champs alternatifs créés par les bobines de Helmholtz ont également augmenté les vols de recherche de nourriture, mais les individus n'ont pas montré de comportement de regroupement. En revanche, les champs alternatifs ont incité les guêpes à effectuer des " vols d'apprentissage ". "Ils ont conclu que pour la première fois, *P. paulista* a démontré une sensibilité à une modification artificielle du champ géomagnétique local et que les mécanismes peuvent être dus à la fois aux paires cryptochrones/radicalaires et à la magnétite.

Un autre modèle d'insecte volant - le criquet pèlerin (*Schistocerca gregaria*) - s'est révélé sensible à l'entraînement par les CEM-ELF. Dans une étude complexe, Shepherd et al. [392] ont analysé l'exposition aiguë à des CEM sinusoidaux de 50 Hz en courant alternatif (gamme d'intensité de champ : 10 à 10 000  $\mu\text{T}$ ) par rapport à des contrôles sur des vols de criquets individuels attachés entre des bobines de fil de cuivre générant des CEM à diverses fréquences et enregistrés sur une vidéo à haute vitesse. Les résultats ont révélé qu'une exposition aiguë à des CEM de 50 Hz augmentait significativement la variation absolue des battements d'ailes d'une manière dépendante du champ. En appliquant une gamme de CEM-ELF proche de l'occurrence normale des battements d'ailes, ils ont constaté que les criquets s'entraînaient à la fréquence exacte du CEM appliqué. Ils ont conclu que l'exposition aux CEM peut entraîner des changements faibles mais significatifs dans les battements d'ailes des criquets, probablement en raison des effets aigus directs sur la physiologie des insectes (par rapport à la magnétoréception basée sur le cryptochrome ou la magnétite) et/ou des réponses comportementales d'évitement au stress moléculaire/physio-logique. Wyszowska et al. [393] ont également constaté des effets sur les criquets : l'exposition à des CEM-ELF supérieurs à 4 mT a eu des effets spectaculaires sur le comportement, la physiologie et l'expression accrue de la protéine Hsp70. Des expositions aussi élevées peuvent être observées à proximité de lignes à haute tension.

#### Les abeilles : RF-EMF

Les effets des CEM-FR sur les abeilles sont d'un intérêt croissant car il s'agit de l'exposition environnementale aux CEM qui a augmenté le plus rapidement au cours des 30 dernières années [369]. Au début des années 2000, des études sur les téléphones portables placés au fond des ruches ont commencé à apparaître. Les abeilles domestiques ont montré un comportement perturbé lorsqu'elles retournaient à la ruche après avoir butiné et sous diverses expositions aux RFR [394-396]. Les premières méthodologies, cependant, n'étaient pas bien conçues ou contrôlées. Par exemple, Favre [397] a constaté une augmentation du piping, un signal de détresse émis par les abeilles pour alerter leurs compagnons de ruche en cas de menace et/ou pour annoncer le processus d'essaimage. Des combinés de téléphones portables actifs et inactifs ont été placés à proximité des abeilles et les sons ont été enregistrés et analysés. Les audiogrammes et les spectrogrammes ont montré que les combinés téléphoniques actifs avaient un effet spectaculaire sur le comportement des abeilles en induisant l'essaimage des ouvrières. Cette étude a été critiquée par Darney et al. [398] pour avoir utilisé de la musique dans l'exposition au RFR actif, ce qui aurait pu introduire une variable capable d'affecter le piping des abeilles en réponse au seul son ajouté.

Dans une étude complexe, Darney et al [398] ont testé la haute fréquence (HF) et l'ultra haute fréquence (UHF) utilisées dans la technologie RFID afin de développer une méthode d'enregistrement automatique des abeilles à miel entrant et sortant des ruches. Ils ont collé des étiquettes RFID sur la face dorsale de chaque abeille, qui ont été détectées à l'entrée de la ruche par des lecteurs émettant des ondes radio HF. Ils ont ensuite cherché à savoir s'il existait des ondes HF indésirables



effets sur la survie **des** abeilles mellifères. Des abeilles âgées de huit jours ont été exposées à des radiofréquences HF 13,56 MHz ou UHF 868 MHz pendant deux heures, divisées en périodes ON et OFF de durées différentes. Les abeilles mortes ont été comptées quotidiennement et les taux de mortalité cumulés des abeilles exposées et non exposées ont été comparés sept jours après l'exposition. Deux des cinq conditions expérimentales ont révélé une augmentation de la mortalité, une fois après une exposition HF et une fois après une exposition UHF, avec une durée d'arrêt de 5 minutes ou plus, après quoi ils ont recommandé de limiter l'exposition des abeilles mellifères aux RFR à moins de 2 heures par jour. Ils ont également conclu, curieusement, que les paramètres RFID qu'ils ont utilisés pour surveiller l'activité de la ruche ne présentaient aucun effet indésirable, mais que les pics d'exposition multifréquence et les accessoires RFID devaient être étudiés plus avant à la lumière d'autres travaux sur les effets de la RFID (voir la partie 1 pour une discussion sur la RFID).

Dans une autre étude utilisant un téléphone cellulaire actif fixé aux cadres de la ruche, Odemer et Odemer [399] ont étudié les effets des RFR sur le développement des reines d'abeilles et le succès de l'accouplement. Les ruches témoins étaient équipées d'un téléphone cellulaire inactif. Après avoir exposé des larves de reines d'abeilles domestiques à des RFR GSM 900 MHz pendant toutes les étapes du développement pré-adulte (y compris la nymphose), l'éclosion des reines adultes a été évaluée 14 jours après l'exposition et le succès de l'accouplement après 11 jours supplémentaires. Ils ont constaté que l'exposition chronique aux RFR réduisait considérablement l'éclosion des reines d'abeilles mellifères, que les mortalités se produisaient pendant la nymphose mais pas aux stades larvaires, que le succès de l'accouplement n'était pas affecté par l'irradiation et qu'après l'exposition, les reines survivantes étaient capables d'établir des colonies intactes. Ils ont donc déterminé que le rayonnement des téléphones mobiles avait réduit de manière significative le taux d'éclosion mais pas le succès de l'accouplement si les reines survivaient, et que si les reines traitées s'accouplaient avec succès, le développement de la colonie n'était pas affecté. Même s'ils ont trouvé des preuves solides de l'effet négatif des RFR des téléphones portables sur le développement des nymphes, ils ont mis en garde contre leur interprétation, notant que le scénario d'exposition le plus défavorable de l'étude correspondait à l'équivalent d'un téléphone portable tenu sur la tête d'un utilisateur, et non au niveau que l'on trouve dans les environnements urbains ou ruraux typiques des ruches. Ils ont conclu que si aucun effet négatif aigu sur la santé des abeilles n'a été observé à moyen terme, ils ne pouvaient pas non plus exclure des effets sur la santé des abeilles à des doses chroniques plus faibles, comme celles que l'on trouve dans les environnements ambiants, et ont lancé un appel urgent à la recherche à long terme sur les expositions sublétales présentes dans les environnements des grandes villes.

Sharma et Kumar [400] ont constaté des anomalies similaires dans le comportement des abeilles mellifères lorsqu'ils ont comparé les performances des abeilles mellifères dans des colonies exposées et non exposées aux radiofréquences. Deux des quatre colonies de test ont été désignées et chacune équipée de deux téléphones cellulaires fonctionnels – une exposition élevée – placés sur deux parois latérales différentes de la ruche en mode appel à GSM 900 MHz. La densité de puissance RFR moyenne

a été mesurée à  $8,549 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ( $56,8 \text{ V/m}$ , champ électrique). Une colonie témoin disposait d'un téléphone factice ; l'autre n'avait pas de téléphone. L'exposition a été délivrée par intervalles de 15 min, deux fois par jour pendant la période de pic d'activité des abeilles. L'expérience a été réalisée deux fois par semaine de février à avril. Elle a couvert deux cycles de couvain avec tous les aspects du comportement de la ruche observés, y compris la surface de couvain comprenant les œufs, les larves et le couvain operculé ; la compétence de la reine en matière de taux de ponte ; le butinage, le comportement de vol, la capacité de retour ; la force de la colonie, y compris le stockage du pollen ; et d'autres variables. Les résultats comprennent une baisse significative de la force de la colonie et de la ponte, ainsi qu'une réduction de la recherche de nourriture au point qu'il n'y avait plus de pollen, de miel, de couvain ou d'abeilles à la fin de l'expérience. Une différence notable dans cette étude est que le nombre d'abeilles quittant la ruche a diminué après l'exposition. Il n'y a pas eu d'exode immédiat des abeilles à la suite de l'exposition – au contraire, les abeilles sont devenues calmes, immobiles et/ou confuses "... comme si elles étaient incapables de décider quoi faire...", ont déclaré les chercheurs. Une telle réaction n'avait jamais été signalée auparavant. Les auteurs ont conclu que le trouble de l'effondrement des colonies est lié à l'exposition aux radiations des téléphones portables.

Vilić et al. [401] ont étudié le RFR et le stress oxydatif ainsi que la génotoxicité chez les abeilles domestiques, plus particulièrement sur l'activité de la catalase, de la superoxyde dismutase, de la glutathion S-trans-ferase, les niveaux de peroxydation lipidique et les dommages à l'ADN. Des larves ont été exposées à des RFR de 900 MHz à des niveaux de champ de 10, 23, 41 et  $120 \text{ V m}^{-1}$  pendant 2 h. À un niveau de champ de  $23 \text{ V m}^{-1}$ , l'effet d'une modulation sinusoïdale de 80 % AM 1 kHz et 217 Hz a également été étudié. Ils ont constaté que l'activité de la catalase et les niveaux de peroxydation lipidique diminuaient de manière significative chez les larves exposées au champ non modulé à  $10 \text{ V m}^{-1}$  ( $27 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) par rapport au contrôle. L'activité de la superoxyde dismutase et de la glutathion S-transférase chez les larves d'abeilles exposées aux champs non modulés n'était pas statistiquement différente par rapport au témoin. Les dommages à l'ADN ont augmenté de manière significative chez les larves exposées à un champ modulé (80 % AM à 1 kHz) à  $23 \text{ V m}^{-1}$  ( $140 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) par rapport au témoin et à tous les autres groupes d'exposition. Leurs résultats suggèrent que les effets des RFR chez les larves d'abeilles domestiques ne se manifestent qu'après certaines conditions d'exposition aux CEM. De manière intéressante, ils ont constaté que l'augmentation des niveaux de champ n'entraînait pas une dose-réponse linéaire pour aucun des paramètres mesurés, tandis que le RFR modulé produisait des effets plus négatifs que le champ non modulé correspondant. Ils ont conclu que même si les abeilles mellifères dans les environnements naturels ne seraient pas exposées aux fortes expositions de leurs expériences, les résultats indiquent que des recherches intensives supplémentaires sont nécessaires à tous les stades du développement des abeilles mellifères, car les effets cellulaires observés pourraient affecter des aspects critiques de la santé et de la survie des abeilles.

Kumar et al. [402] ont également constaté des changements biochimiques chez les abeilles ouvrières exposées au RFR. Une boîte en bois a été conçue avec du verre à l'avant et à l'arrière et une gaze métallique pour la ventilation sur deux côtés pour les abeilles exposées et les témoins. Les téléphones portables (même marque, même modèle et même connexion réseau) ont été maintenus en mode écoute-parole pendant 40 minutes. A intervalles de 10, 20 et 40 min, 10 abeilles exposées et 10 abeilles témoins ont été collectées aux mêmes moments. L'hémolymphe a ensuite été extraite de la région inter-segmentaire de l'abdomen des abeilles et analysée. Les résultats comprennent une augmentation de la concentration en hydrates de carbone totaux chez les abeilles exposées pendant la période d'exposition de 10 min par rapport aux abeilles non exposées. L'augmentation du temps d'exposition à 20 minutes a entraîné une nouvelle augmentation de la concentration, mais l'exposition à 40 minutes a eu un effet inverse avec une diminution de la concentration en glucides, bien qu'elle soit toujours supérieure à celle des témoins. La teneur en glycogène et en glucose de l'hémolymphe a également montré le même schéma d'exposition - augmentation de la teneur jusqu'à 20 min, puis légère baisse, mais toujours supérieure à celle des témoins. Les changements dans les lipides totaux/cholestérol - les principales réserves énergétiques des insectes - peuvent affecter de nombreux processus biologiques. Certains lipides sont des composants cruciaux de la structure membranaire tandis que d'autres servent de matière première aux hormones et aux phéromones. Les modifications de ces paramètres sont importantes pour toutes les activités biologiques, y compris la reproduction. Cette étude a également montré qu'à mesure que le temps d'exposition augmentait, les abeilles semblaient avoir identifié la source de perturbation. Les ouvrières se sont déplacées à grande échelle vers le mode conversation (avec une exposition plus élevée aux RFR pendant la fonction de transmission) mais pas vers le mode écoute. Les abeilles ont également fait preuve d'une légère agressivité et d'une certaine agitation en battant des ailes. Les chercheurs ont émis l'hypothèse que cette activité accrue pourrait être responsable d'une augmentation de la consommation d'énergie, expliquant ainsi la diminution de la concentration en glucides et en lipides dans l'échantillon exposé pendant 40 minutes. Les chercheurs ont conclu que les radiations des téléphones portables influencent le comportement et la physiologie des abeilles. Sharma [403] a également rapporté une augmentation des niveaux de glycogène et de glucose dans les pupes d'abeilles exposées.

Il faut souligner que les conditions d'émission des téléphones cellulaires utilisées dans certaines expériences sont discutables, en particulier lorsqu'il n'y avait aucun détail sur la façon dont les téléphones étaient activés pour obtenir une émission.

Toutes les études n'ont pas démontré d'effets négatifs. Mall et Kumar [404] n'ont constaté aucun effet apparent de la RFR sur l'élevage du couvain, la production de miel ou le comportement de butinage des abeilles dans des ruches équipées de téléphones cellulaires à l'intérieur ou à proximité d'une tour de téléphonie cellulaire ; Mixon et al. [405] n'ont pas non plus constaté d'effets de la RFR des signaux GSM sur l'augmentation de l'agressivité des abeilles. Ils ont conclu que le RFR n'avait pas d'impact sur le comportement de butinage ou la navigation des abeilles et qu'il était donc peu probable qu'il ait un impact sur la santé des colonies.

Bien qu'il existe plusieurs rapports anecdotiques sur les pertes d'insectes à proximité des tours de communication, il n'y a qu'une poignée d'études de terrain sur les RFR ambiants menées sur les invertébrés jusqu'à présent. Dans la première grande enquête sur les espèces pollinisatrices sauvages à des distances variables des tours de téléphonie cellulaire, Lázaro et al. [406] ont trouvé des effets positifs et négatifs des RFR sur un large éventail d'insectes sur deux îles (Lesvos et Limnos) dans le nord-est de la mer Égée, près de la Grèce. Les niveaux de RFR ambiants mesurés comprenaient toutes les gammes de fréquences utilisées dans les communications cellulaires ; la radiodiffusion RFR est absente sur les îles. Les valeurs de RFR ne différaient pas de manière significative entre les îles (Lesvos :  $0,27 \pm 0,05$  V/m ; Limnos :  $0,21 \pm 0,04$  V/m ;  $\chi^2 = 0,08$ ,  $p=0,779$ ) et ne diminuaient pas avec la distance à l'antenne, probablement, selon leur hypothèse, parce que certains points d'échantillonnage près de l'antenne pouvaient se trouver à l'extérieur ou au bord des lobes d'émission. Ils ont mesuré le RFR à quatre distances de 50, 100, 200 et 400 m (164, 328, 656 et 1 312 pieds, respectivement) de 10 antennes (5 sur l'île de Lesvos et 5 sur l'île de Limnos) et ont corrélié les valeurs du RFR avec l'abondance (nombre d'insectes) et la richesse (santé et vitalité générales) des insectes - cette dernière uniquement pour les abeilles sauvages et les syrphes. Les chercheurs ont effectué des inventaires minutieux des plantes à fleurs, des arbres et des insectes dans plusieurs zones de prairies de basse altitude, notamment pour les abeilles sauvages, les syrphes, les mouches des abeilles, les autres mouches restantes, les coléoptères, les papillons et d'autres types. Les abeilles domestiques n'ont pas été incluses dans cette étude car elles sont une espèce gérée soumise aux décisions des apiculteurs et ne sont donc pas une espèce sauvage. Sur Lesvos 11 547 insectes ont été collectés et sur Limnos 5 544. Des pièges de couleur variée ont été utilisés pour les échantillons nocturnes et diurnes. Les résultats ont montré que tous les groupes de pollinisateurs, à l'exception des papillons, étaient affectés par la RFR (à la fois positivement et négativement) et que pour la plupart des groupes de pollinisateurs, les effets étaient cohérents sur les deux îles. L'abondance des coléoptères, des guêpes et des syrphes a diminué de manière significative avec la RFR, mais l'abondance globale des abeilles sauvages et des mouches à abeilles a augmenté de manière significative avec l'exposition. Une analyse plus poussée a montré que seule l'abondance des abeilles sauvages nichant sous terre était positivement liée au RFR alors que les abeilles sauvages nichant au-dessus du sol n'étaient pas affectées. Les effets du RFR entre les îles ne différaient que sur l'abondance des mouches restantes. En ce qui concerne la richesse des espèces, le RFR n'avait tendance à avoir un effet négatif que sur les syrphes à Limnos. En ce qui concerne l'absence d'effets observés sur les papillons, ils ont émis l'hypothèse que la méthode de collecte par piège à mouches n'est pas efficace pour collecter les papillons (les papillons ne représentaient que 1,3 % du total des spécimens), et qu'une méthode d'échantillonnage différente pourrait produire un résultat différent. Ils ont conclu que les effets négatifs du RFR sur l'abondance des insectes dans plusieurs groupes conduisant à une composition altérée des pollinisateurs sauvages dans les habitats naturels, il était possible que cela affecte la diversité des plantes sauvages et les cultures.



production. Ils ont ajouté que la relation négative entre le RFR et l'abondance des guêpes, des coléoptères et des syrphes pourrait indiquer une plus grande sensibilité de ces insectes aux CEM. Des pollinisateurs potentiellement plus tolérants aux CEM, tels que les abeilles sauvages et les mouches à abeilles nichant sous terre, pourraient occuper les niches vacantes laissées par les espèces moins tolérantes, entraînant ainsi une augmentation de leur population. Une autre explication possible est que les CEM peuvent avoir des effets particulièrement néfastes sur les stades larvaires plus sensibles, et si c'est le cas, les larves qui se développent en surface (de nombreux coléoptères, guêpes, syrphes) peuvent être plus vulnérables que celles qui se développent sous terre, car les premières peuvent être exposées à des niveaux de rayonnement plus élevés.

Dans une autre étude de terrain, Taye et al. [407] ont placé cinq ruches de décembre à mai à des distances variables de 1 000, 500, 300, 200 et 100 m (respectivement 3 280, 1 640, 984, 656 et 328 pieds) d'une tour cellulaire en Inde pour mesurer l'activité de vol, la capacité de retour et l'efficacité du butinage du pollen chez les abeilles domestiques (*Apis cerana* F). Ils ont constaté que les effets les plus importants se produisaient à proximité des tours et que le retour des abeilles était le plus faible à une distance de 100 m de la tour. La capacité maximale de butinage et de retour aux colonies a été observée à 500 m, suivie de 1 000 m et par ordre décroissant à 300 et 200 m, avec le moins d'abeilles revenant à 100 m du pylône. L'étude a également montré que si les abeilles revenaient, la charge pollinique par minute n'était pas significativement affectée.

Vijver et al. [408] ont toutefois remis en question l'exactitude de la distance par rapport aux tours, souvent utilisée comme indicateur des gradients de CEM, comme dans l'étude ci-dessus. Dans une étude sur le terrain aux Pays-Bas, les chercheurs ont testé l'exposition aux RFR d'une station de base cellulaire (GSM 900 MHz) sur la capacité de reproduction de petits invertébrés vierges pendant les périodes de développement les plus sensibles, de la préadolescence à l'accouplement, lorsque les effets sur la reproduction sont les plus probables. Des mesures minutieuses des RFR sur le terrain ont été effectuées pour déterminer les points nuls afin de voir si la distance par rapport aux émetteurs est un modèle d'exposition aux RFR fiable dans les études de terrain. Ils ont exposé quatre espèces différentes d'hexapodes invertébrés. Des collembolles (*Folsomia candida*), des "punaises" prédatrices (*Orius laevigatus*), des guêpes parasites (*Asobara japonica*) et des drosophiles (*D. melanogaster*) ont été placés dans des conteneurs à piédestal couverts dans un rayon d'environ 150 m d'une station de base de téléphonie mobile de 900 MHz pendant 48 heures. Six groupes de contrôle ont été placés à moins de 2 m des groupes de traitement et couverts dans des cages Farady. Après l'exposition, tous les groupes ont été amenés au laboratoire pour faciliter la reproduction. La fécondité et le nombre de descendants qui en résultent ont ensuite été analysés. Les résultats ont montré que la distance n'était pas un indicateur adéquat pour expliquer les régressions dose-réponse. Après une synthèse complexe des données, aucun impact significatif des conditions d'exposition, des mesures de tendance centrale ou de la variabilité temporelle des CEM sur la reproduction n'a été constaté.

ont été trouvés, bien qu'il y ait eu une certaine variabilité entre les groupes d'insectes. Comme on l'a vu dans d'autres études, la distance est souvent utilisée pour créer un gradient d'exposition à l'énergie dans les études, mais cette étude a trouvé que l'intensité de l'émetteur et la direction de la transmission étaient plus pertinentes, comme l'ont fait Bolte et Eikelboom [409, 410]. La direction et l'inclinaison de l'émetteur déterminent si l'emplacement d'intérêt dans les études de terrain se trouve dans le faisceau principal. Dans certains cas, la proximité la plus proche de l'émetteur fournissait des lectures plus basses que celles plus éloignées, ce qu'ils ont constaté entre deux - emplacements. Ils ont également noté que les organismes sélectionnés dans l'étude étaient de petite taille ; les collembolles ont une longueur de corps de 2 mm en moyenne, les guêpes d'environ 3 mm, les insectes de 1,4 à 2,4 mm, les plus grands organismes testés étant les mouches des fruits femelles d'environ 2,5 mm de longueur et les mâles légèrement plus petits. En raison de leur taille, de leur absorption limitée et de leur faible capacité d'absorption d'énergie, aucun de ces insectes n'est un récepteur efficace du corps entier pour les ondes de 900 MHz dont la longueur d'onde est d'environ 13 pouces (33 cm). Mais ils ont également noté qu'il s'agissait d'une étude de régression linéaire et que les effets biologiques sont souvent non linéaires. Cependant, le fait de ne pas trouver d'effets distincts n'exclut pas des changements physiologiques. Ils ont conclu qu'en raison de l'omniprésence croissante de l'exposition aux RFR, il est urgent de prêter attention aux effets potentiels sur la biodiversité.

La question de la taille de l'insecte, de la non-linéarité et de l'inclinaison/direction de l'antenne sont des facteurs d'une importance cruciale avec le rayonnement 5G qui créera des expositions ambiantes extrêmement complexes en champ proche et en champ lointain pour les espèces dans les environnements urbains et ruraux, non seulement en raison d'une densification des antennes de petites cellules proches du sol mais aussi en raison de l'augmentation des - réseaux de satellites tournant en orbite basse (voir partie 1). La gamme des fréquences utilisées pour les systèmes de télécommunication sans fil passera de moins de 6 GHz (2G, 3G, 4G et WiFi) à des fréquences allant jusqu'à 120 GHz pour la 5G qui, en raison de longueurs d'onde plus petites, constitue donc une meilleure correspondance résonante pour les petits insectes. Une étude alarmante de Thielens et al. [411], s'appuyant sur de nombreuses études solides sur l'utilisation de la RFR comme insecticide thermique depuis des décennies, a modélisé la RFR absorbée par quatre types d'insectes différents en fonction de la seule fréquence de 2 à 120 GHz. Un ensemble de modèles d'insectes a été obtenu à l'aide de la nouvelle imagerie Micro-CT (tomographie par ordinateur) et utilisé pour la première fois dans des simulations électromagnétiques dans le domaine temporel à différences finies. Tous les insectes ont montré une puissance absorbée dépendant de la fréquence et une augmentation générale de la RFR absorbée à 6 GHz et au-dessus, par rapport à la puissance de la RFR absorbée en dessous de 6 GHz. Leurs simulations ont montré qu'un déplacement de 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 % - un différentiel important pouvant avoir de graves conséquences pour de nombreuses espèces d'insectes.

En utilisant une approche similaire, Thielens et al. [412] se sont concentrés sur l'abeille domestique occidentale (*Apis mellifera*) avec les CEM-FR, en utilisant une combinaison de mesures d'exposition *in situ* près des ruches d'abeilles en Belgique et de simulations numériques. Environ cinq modèles d'abeilles ont été exposés à des ondes planes à des fréquences allant de 0,6 à 120 GHz - des fréquences prévues pour la 5G. Les simulations ont quantifié la moyenne des RFR absorbés par le corps entier en fonction de la fréquence et ont révélé que la moyenne augmentait par des facteurs de 16 à 121 (selon le modèle) lorsque la fréquence passait de 0,6 à 6 GHz pour une intensité de champ électrique incident fixe. Une diminution relativement faible de l'absorption a été observée pour toutes les abeilles étudiées entre 12 et 120 GHz en raison de l'atténuation intérieure. Des mesures de RFR ont été effectuées sur 10 sites de ruches d'abeilles à proximité de cinq endroits différents. Les résultats ont révélé un champ RFR incident total moyen de 0,06 V/m ; ces valeurs ont ensuite été utilisées pour évaluer l'absorption et un taux réaliste a été estimé entre 0,1 et 0,7 nW. Les chercheurs ont conclu qu'en supposant un déplacement 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 entre 390 et 570 % - un déplacement de fréquence attendu avec le développement de la 5G.

Les deux études précédentes devraient à elles seules donner à réfléchir aux effets environnementaux sur les invertébrés dans ces gammes de fréquences 5G plus élevées.

Kumar [413] a noté que les RFR devraient être inclus comme agents causaux du CCD des abeilles et que les protocoles de test doivent être normalisés et établis. La normalisation est essentielle car de nombreuses études menées avec des téléphones cellulaires dans des ruches sont de qualité très inégale et ne donnent qu'une indication des effets potentiels. Placer des téléphones cellulaires dans des ruches et supposer que les RFR sont la seule exposition est inexact et trompeur. Les CEM-ELF sont toujours présents dans toutes les technologies de télécommunications, utilisant des signaux pulsés et modulés [414]. Toutes ces caractéristiques se sont avérées très actives sur le plan biologique, en dehors de la seule fréquence. De telles études capturent probablement les effets des ELF sans les identifier. Tous les aspects de la transmission, y compris l'ingénierie de la transmission elle-même à partir des tours, doivent être pris en compte pour déterminer les expositions exactes et délimiter les agents causaux. Les vibrations et la chaleur doivent également être prises en compte - les téléphones cellulaires en mode de transmission pourraient augmenter rapidement la température de la ruche et les abeilles sont très sensibles à la température. En raison des spécificités de la "danse de l'agitation" dans la création des "feuilles de route" de butinage, les abeilles ne doivent pas être déplacées artificiellement des ruches pour déterminer leur capacité de retour après une exposition aux CEM. Elles pourraient être désorientées par la seule relocalisation, ce qui nuirait à leur capacité de retour. De plus, ces tests n'impliquent qu'un seul facteur de stress, alors que les espèces d'insectes subissent aujourd'hui de multiples facteurs de stress. Il est essentiel de comprendre ces cofacteurs pour obtenir des données précises et des résultats fiables.

résultats [415, 416]. La transposition des études de laboratoire à la pertinence sur le terrain a toujours été problématique, mais la compréhension des effets des CEM sur les insectes est devenue urgente avec l'augmentation constante de l'exposition ambiante de faible niveau provenant des appareils et des infrastructures, en particulier à la lumière des nouveaux réseaux 5G en cours de construction. Il existe de nombreuses variables que les études n'ont pas encore prises en compte. Tout ce qui précède indique un besoin critique de normaliser les protocoles expérimentaux et de prendre l'électro-écologie beaucoup plus au sérieux, en particulier en ce qui concerne les espèces aériennes à la lumière de la 5G.

## Les milieux aquatiques

Il existe des différences électriques fondamentales entre l'air et l'eau en termes de conductivité (dans quelle mesure un matériau permet au courant électrique de circuler) et de résistivité (dans quelle mesure un matériau s'oppose à la circulation du courant électrique). Dans l'eau, la propagation des champs électromagnétiques est très différente de celle dans l'air car la permittivité (capacité à former des dipôles) et la conductivité électrique de l'eau sont plus élevées. L'atténuation (dissipation) des ondes planes est plus élevée dans l'eau que dans l'air et augmente rapidement avec la fréquence. C'est l'une des raisons pour lesquelles les RFR n'ont pas été traditionnellement utilisées dans les communications sous-marines, alors que les ELF l'ont été. La conductivité de l'eau de mer est généralement d'environ 4 S/m, tandis que celle de l'eau douce varie mais se situe généralement dans la gamme des mS/m, ce qui rend l'atténuation nettement plus faible dans l'eau douce que dans l'eau de mer. L'eau douce, cependant, a une permittivité similaire à celle de l'eau de mer. Il y a peu d'effet direct sur la composante du champ magnétique dans les milieux aquatiques ; la perte de propagation est principalement causée par la conduction sur la composante du champ électrique. La propagation de l'énergie passe continuellement d'un champ électrique à un champ magnétique et une conduction plus importante entraîne une forte atténuation/dissipation des CEM [98].

En raison de ces différences essentielles de milieu, les mécanismes d'électrorécepteurs des espèces aquatiques peuvent être très différents de ceux décrits précédemment chez les espèces aériennes, car l'air est un milieu moins conducteur et moins résistif, avec une atténuation moindre. C'est pourquoi les RFR voyagent plus facilement et plus directement dans l'air. Chez les espèces aquatiques, l'électroréception peut être le résultat d'une transmission via l'eau directement vers le système nerveux par des canaux récepteurs uniques appelés Ampoules de Lorenzini [371]. Chez les grenouilles, les amphibiens, les poissons, certaines espèces de vers et autres, les canaux récepteurs peuvent passer par la peau ainsi que par des mécanismes plus courants chez les espèces aériennes, comme en présence de magnétite (voir "Mécanismes" ci-dessus). Il peut y avoir de grandes variations dans les sensibilités électroréceptives des espèces habitant ces deux environnements fondamentalement différents. Certaines espèces d'amphibiens, cependant, ont des caractéristiques physiques qui couvrent les deux milieux et donc des mécanismes de magnétoréception variés.

## Amphibiens : grenouilles, salamandres, reptiles : capacités de régénération

Les amphibiens sont la classe d'animaux qui comprend les grenouilles, les crapauds, les salamandres, les tritons, certains reptiles et les caeciliens. Le terme commun de "grenouille" est utilisé pour décrire des milliers d'espèces d'amphibiens sans queue de l'ordre des *anoures*. Plus de 6 300 espèces d'anoures ont été recensées à ce jour, et de nombreuses autres disparaissent probablement aujourd'hui en raison du changement climatique et d'autres facteurs avant même que nous connaissions leur existence. Des distinctions informelles sont faites entre les grenouilles (espèces à la peau fine) et les crapauds (à la peau épaisse et verruqueuse), mais ces distinctions ne sont pas utilisées pour des raisons taxonomiques. Bien que la plus grande concentration d'espèces diverses de grenouilles se trouve dans les forêts tropicales humides, on les trouve partout dans le monde, des tropiques aux régions subarctiques. La plupart des grenouilles adultes vivent dans l'eau douce et/ou sur la terre ferme, tandis que certaines espèces se sont adaptées à la vie dans les arbres ou sous terre. Leur peau présente toutes sortes de couleurs et de motifs, du gris/vert et du brun/noir au rouge/jaune vif.

La peau des grenouilles est lisse et glandulaire - ce qui est préoccupant compte tenu de la technologie 5G naissante (voir partie 1) - et peut sécréter des toxines pour éloigner les prédateurs. La peau des grenouilles est également semi-perméable, ce qui les rend très sensibles à la déshydratation et aux polluants. Avec les changements radicaux de temps dus au changement climatique et les oscillations imprévisibles entre des sécheresses anormales suivies d'inondations dans des régions auparavant stables sur le plan météorologique, les amphibiens sensibles à l'environnement comme les grenouilles sont considérés comme des espèces de la cloche du temps. Souvent, certaines espèces locales ou régionales n'ont pas le temps de se régénérer entre deux cycles climatiques radicaux, ce qui entraîne un effondrement de la population.

Depuis les années 1950, on observe un déclin significatif des populations de grenouilles, plus d'un tiers des espèces étant aujourd'hui considérées comme menacées d'extinction, tandis que plus de 120 espèces auraient déjà disparu depuis les années 1980 [10, 417, 418]. Ce déclin des amphibiens est considéré comme faisant partie d'une extinction de masse mondiale en cours, avec des effondrements de populations et des extinctions locales qui ont de graves conséquences sur la biodiversité planétaire [419]. L'extinction des amphibiens résulte du changement climatique [420-422], de la perte/destruction de l'habitat [423, 424], des espèces introduites [425], de la pollution [426], des parasites [423, 427], des pesticides, - herbicides et fongicides [428-430], des maladies [431-435] et de l'augmentation du rayonnement ultraviolet B [436-439], entre autres. La pollution sonore anthropique peut également affecter la fréquence des cris des amphibiens et donc avoir un impact sur la reproduction [440] et les lumières nocturnes artificielles affectent la reproduction des grenouilles vertes mâles (*Rana clamitans melanota*) [441]. Les champs électromagnétiques non ionisants peuvent également jouer un rôle [442].

McCallum [443] a calculé que le taux d'extinction actuel des amphibiens pourrait être 211 fois plus élevé que leur taux d'extinction naturel pré-anthropogénique, cette estimation augmentant de 25 000 à 45 000 fois si les espèces en danger sont également incluses dans le calcul. Aujourd'hui, le déclin des populations d'amphibiens est observé chez des milliers d'espèces dans de nombreux écosystèmes, y compris dans les zones forestières vierges [418] et les déclins sont désormais reconnus comme l'un des impacts les plus graves de l'ère anthropocène [417, 442].

En outre, le nombre de grenouilles présentant de graves malformations souvent incompatibles avec la survie a fortement augmenté. Les malformations sont une question complexe liée à la physiologie, à l'anatomie, à la reproduction, au développement, à la qualité de l'eau, aux conditions environnementales changeantes et à l'écologie en général. Chaque fois que des malformations sont observées dans de larges segments de populations d'animaux sauvages, il y a des indications de graves problèmes environnementaux [442]. Les malformations des amphibiens sont présumées être dues à une maladie fongique infectieuse agressive appelée Chytridiomycose, causée par les champignons chytrides *Batrachochytrium dendrobatidis* et *Batra-chochytrium salamandrivorans* [432-435], et par des parasites comme *Ribeiroia ondatrae* [427]. La chytridiomycose a été liée à des déclins et à des extinctions dramatiques d'amphibiens en Amérique du Nord, centrale et du Sud, dans certaines régions d'Australie et d'Afrique et dans des îles des Caraïbes comme la Dominique et Montserrat. Identifiée pour la première fois dans les années 1970 dans le Colorado, aux États-Unis, elle continue de se propager dans le monde entier à un rythme alarmant. Certaines populations connaissent des décès sporadiques tandis que d'autres connaissent une mortalité de 100%. Il n'existe aucune mesure efficace pour contrôler la maladie dans les populations sauvages. On a également constaté que des herbicides comme le glyphosate utilisé dans le Roundup™ et l'atrazine, un perturbateur endocrinien, provoquent de graves malformations chez les espèces d'amphibiens aquatiques et terrestres à cause du ruissellement de pesticides, d'herbicides et de fongicides sur les terres agricoles [428-430].

Les grenouilles sont connues pour être très sensibles aux CEM naturels et artificiels. De nombreuses recherches sur l'électrophysiologie des grenouilles ont été menées parce qu'elles constituent de bons modèles de laboratoire pour la recherche sur le système nerveux humain, qu'elles sont faciles à trouver et à manipuler. En 1780, le physicien italien Luigi Galvani a découvert ce que nous comprenons aujourd'hui comme étant la base électrique de l'influx nerveux en étudiant l'électricité statique (la seule connue à l'époque) lorsqu'il a accidentellement fait se contracter les muscles des pattes de grenouilles reliées à la moelle épinière par deux fils métalliques différents [444]. Galvani pensait avoir découvert le "magnétisme animal", mais il avait en fait découvert le courant continu et ce que l'on a appelé plus tard le "courant de blessure" naturel - le processus par lequel un membre blessé, par exemple, - produit une charge négative à l'endroit de la blessure, qui se transformera plus tard en une charge négative.



à une charge positive au même endroit chez certaines espèces, comme l'a découvert Robert O. Becker dans les années 1960 [444-451]. La première curiosité à l'égard du courant naturel s'est poursuivie tout au long des années 1800 sur divers aspects des CEM et plus tard, dans les années 1920 à 1940, chez les chercheurs pionniers Elmer J. Lund [452-454] et Harold Saxon Burr [455-457] qui ont travaillé à l'établissement de la première théorie unifiée du champ électrodynamique de la vie, en utilisant les modèles de l'hydre, de la grenouille et de la salamandre parmi plusieurs autres en raison de leurs propriétés morphogéniques [458]. Bien que les grenouilles ne régénèrent pas leurs membres comme le font les salamandres, les deux espèces sont si semblables du point de vue taxonomique que les pionniers cités ci-dessus ont été très curieux, tout au long des années 1960 à 1990, de savoir ce qui permettait fondamentalement la régénération des membres chez une espèce et non chez l'autre. Ce faisant, ils ont beaucoup appris sur l'électrophysiologie des amphibiens et sur le microcourant cellulaire dans la cicatrisation des plaies, ainsi que sur les propriétés électrophysiologiques de la différenciation cellulaire et, finalement, de la dédifférenciation, qui sont pertinentes pour toutes les recherches contemporaines sur les cellules souches. Aujourd'hui, les implications de ces premiers travaux ont suscité un nouvel intérêt et des recherches ciblées concernant le microcourant endogène et le potentiel de régénération des membres chez l'homme, ainsi que la dédifférenciation/la morphogenèse des cellules souches en général pour le traitement du cancer et d'autres modalités de guérison. Pour un examen approfondi des études sur la morphogenèse, voir Levin [459].

Les CEM ambiants omniprésents de faible niveau correspondent aujourd'hui à certains des microcourants naturels de faible niveau qui sont essentiels aux processus fondamentaux de la croissance, de la reproduction, de la morphogenèse et de la régénération des amphibiens, ce qui donne un nouveau sens aux premières recherches qui ont défini l'électrophysiologie des amphibiens. Nous devons simplement en faire un bien meilleur usage pour comprendre quel rôle, le cas échéant, les expositions ambiantes d'aujourd'hui peuvent contribuer à la disparition des amphibiens. (Pour comparer les tableaux entre l'augmentation des niveaux de CEM ambiants et les effets de faible niveau sur la faune, voir la partie 1, supplément 1 ; et la partie 2, supplément 3).

## Magnétoréception des amphibiens et des reptiles

La façon dont les amphibiens perçoivent les CEM naturels et artificiels est similaire à celle d'autres espèces examinées ci-dessus et pour les examens des mécanismes des amphibiens, voir Phillips et al [460, 461]. Comme de nombreuses espèces d'oiseaux et d'insectes, les preuves indiquent que les amphibiens perçoivent les champs géomagnétiques de la Terre par au moins deux mécanismes biophysiques différents de magnétoréception : des cristaux ferromagnétiques naturels (magnétite), et des réactions induites par la lumière via des cellules photoréceptrices spécialisées (cryptochromes) qui forment des paires de radicaux corrélés au spin. Comme les oiseaux, ces deux mécanismes sont présents chez certains amphibiens. Les cryptochromes fournissent un signal directionnel

et la magnétite, qui ne dépend pas de la lumière, fournit la "carte" géographique. '

Dans une discussion approfondie de nombreuses études de magnétoréception chez les espèces anura et urodela, Diego-Rasilla et al. [462] ont trouvé des preuves que les têtards de grenouille verte ibérique (*Pelophylax perezi*) avaient une boussole magnétique dépendant de la lumière, et Diego-Rasilla et al. [463] ont également trouvé que les têtards de la grenouille commune européenne (*Rana temporaria*) sont capables d'utiliser le champ magnétique terrestre pour s'orienter le long d'un axe y appris. Dans ces études, ils ont cherché à savoir si cette orientation s'effectue à l'aide d'une boussole magnétique dépendant de la lumière, similaire à celle trouvée dans les expériences précédentes avec d'autres espèces de grenouilles et de tritons [460, 462-470], ou à partir d'un autre facteur. Ils ont conclu que la boussole magnétique constituait une source fiable d'informations directionnelles dans une large gamme de conditions d'éclairage naturel. Ils ont également comparé leurs résultats à ceux d'études [470] qui ont montré que l'organe pinéal des tritons était le site de la boussole magnétique dépendant de la lumière, ainsi qu'à des preuves neurophysiologiques récentes montrant une sensibilité au champ magnétique située dans l'organe frontal des grenouilles, qui est une excroissance de la glande pinéale. Ils ont émis l'hypothèse que ces travaux pourraient indiquer un ancêtre commun datant de 294 millions d'années.

Pour déterminer si l'orientation à l'aide des champs magnétiques de la Terre changeait en fonction des modèles de migration saisonnière, Shakhparonov et Ogurtsov [471] ont testé des grenouilles des marais (*Pelophylax ridibundus*) en laboratoire pour voir si les grenouilles pouvaient déterminer la direction de la migration entre l'étang de reproduction et leur site d'hivernage en fonction des indices magnétiques. Des grenouilles adultes (n=32) ont été testées individuellement dans un labyrinthe en T de 127 cm de long à l'intérieur d'un système de bobines de Helmholtz à trois axes (diamètre 3 m). Les bras du labyrinthe ont été positionnés parallèlement à la route migratoire naturelle et mesurés en fonction du champ magnétique. Les grenouilles ont été testées à l'état de reproduction et de migration et à l'état d'hivernage, sous l'effet d'un régime de température et de lumière. Le choix des grenouilles dans un labyrinthe en T était évident lorsqu'il était analysé en fonction de la direction du champ magnétique. Elles se sont déplacées le long de la route migratoire vers le bassin de reproduction et ont suivi la réversion de la composante horizontale du champ magnétique. La préférence a été observée chez les deux sexes, mais uniquement pendant l'état migratoire de reproduction. Ils ont conclu que les grenouilles adultes obtenaient des informations directionnelles à partir du champ magnétique terrestre.

Diego-Rasilla et al. [472] ont trouvé des preuves similaires chez deux espèces de lézards lacertidés (*Podarcismuralis* et *Podarcis lilfordi*) qui présentaient un alignement longitudinal spontané de l'axe du corps par rapport au champ magnétique terrestre pendant les périodes de bronzage. Les deux espèces présentaient une orientation bimodale très significative le long de l'axe magnétique nord-nord-est et sud-sud-ouest. Les orientations des lézards étaient

ont été significativement corrélés sur une période de cinq ans avec les valeurs du champ géomagnétique au moment de chaque observation. Cela suggère que ce comportement fournit aux lézards une référence directionnelle constante, créant peut-être une carte mentale spatiale pour faciliter la fuite. C'était la première étude à fournir un comportement d'alignement magnétique spontané chez les reptiles vivant en liberté, bien que des études sur les terrapins aient également trouvé un tel alignement magnétique spontané [92, 323, 473]. Nishimura et ses collaborateurs [474, 475] ont également constaté une sensibilité aux CEM-FE (sinusoïdaux 6 et 8 Hz, champ magnétique de pointe 2,6  $\mu\text{T}$ , champ électrique de pointe (10 V/m) chez une espèce de lézard (*Pogona vitticeps*), comme en témoigne l'augmentation significative du soulèvement de la queue - un comportement reproducteur. De manière intéressante, cette réponse de soulèvement de la queue aux CEM-ELF disparaissait lorsque l'œil pariétal était couvert, ce qui suggère que l'œil pariétal contribue à la magnétoréception dépendante de la lumière et que l'exposition aux CEM-ELF peut augmenter la sensibilité aux champs magnétiques chez les lézards. Une autre expérience [476] a montré que la lumière à une longueur d'onde inférieure à 580 nm était nécessaire pour activer la magnétoréception dépendante de la lumière de l'œil pariétal.

## Amphibiens : RF-EMF

La plupart des grenouilles passent beaucoup de temps sur la terre ferme mais pondent leurs œufs dans l'eau où ils éclosent en têtards avec une queue et des branchies internes. Cependant, certaines espèces contournent le stade du têtard et/ou déposent leurs œufs sur la terre ferme. Les grenouilles sont donc sujettes à des expositions provenant à la fois des environnements terrestres et aquatiques. Le cycle de vie d'une grenouille est terminé lorsque la métamorphose en une forme adulte se produit. De nombreux effets indésirables n'apparaissent qu'une fois la métamorphose terminée, mais des problèmes ont été constatés tout au long du cycle de vie après des expositions aux CEM-ELF et aux RFR.

La plupart des premières recherches sur les grenouilles (autres que les enquêtes de régénération de Becker et al. mentionnées ci-dessus) ont été menées à des niveaux thermiques élevés rarement rencontrés dans l'environnement, mais certaines sont incluses ici parce qu'elles ont aidé à délimiter l'électrophysiologie des amphibiens avec des effets soutenus plus tard dans la recherche à faible niveau. Certains des premiers travaux ont utilisé des modèles de grenouilles pour étudier les effets cardiaques des expositions de faible intensité. Levitina [477] a constaté que l'exposition du corps entier d'une grenouille intacte entraînait une diminution de la fréquence cardiaque, tandis que l'irradiation de la tête seulement provoquait une augmentation. En utilisant des RFR de fréquence VHF à une densité de puissance de  $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $A=12,5 \text{ cm}$ , Levitina a attribué les changements cardiaques aux effets du système nerveux périphérique, mais selon Frey et Seifert [478], en raison des longueurs d'onde utilisées dans cette étude, on s'attend à une faible pénétration de l'énergie dans le corps. Ils ont déclaré que l'hypothèse d'un récepteur cutané était donc raisonnable.

À la suite des travaux de Levitina, Frey et Seifert [478] - en utilisant des cœurs de grenouille isolés, des fréquences UHF qui pénétrèrent plus efficacement dans les tissus et une modulation d'impulsion de faible intensité - ont découvert que les micro-ondes pulsées à 1,425 GHz pouvaient modifier le rythme cardiaque des grenouilles en fonction du moment de l'exposition entre la phase de l'action cardiaque et le moment de l'action de l'impulsion. Vingt-deux cœurs de grenouille isolés ont été irradiés par des impulsions synchronisées avec l'onde P des ECG ; les impulsions étaient d'une durée de 10 s et se déclenchaient au pic de l'onde P. Deux groupes témoins ont été utilisés sans RFR. Deux groupes de contrôle ont été utilisés sans exposition aux RFR et aucun effet n'a été noté. Ils ont constaté que l'accélération de la fréquence cardiaque se produisait avec les impulsions à environ 200 ms après l'onde P. Mais si l'impulsion se produisait en même temps que l'onde P, aucune augmentation n'était induite. Des arythmies se sont produites dans la moitié des échantillons, certaines entraînant un arrêt cardiaque. Il ressort clairement de cette étude que la RFR affecte le rythme cardiaque des grenouilles et peut provoquer la mort.

Un travail plus récent de Miura et Okada [479] a révélé une vasodilatation sévère dans les pattes de grenouilles causée par le RFR. Dans une série de trois expériences utilisant 44 grenouilles anesthésiées (*X. laevis*) à des intensités thermiques et non thermiques, les chercheurs ont exposé les palmures à des RFR pulsés selon trois paramètres, la bobine de contrôle étant réglée à 1 V crête à crête : 100 kHz 582-3 mG et  $174,76 \text{ V cm}^{-1}$  ; 10 MHz 7,3 mG et  $2,19 \text{ V cm}^{-1}$  ; 1 MHz 539 mG et  $16,11 \text{ V cm}^{-1}$ . Ils ont trouvé non seulement des artérioles dilatées de la toile qui avaient déjà été re-constrictées avec la noradrénaline, mais aussi des artérioles dilatées dans des conditions non stimulées. La vasodilatation a augmenté lentement et a atteint un plateau 60 min après le début de l'irradiation. Après l'arrêt de l'irradiation, la vasodilatation est restée pendant 10 à 20 minutes avant de s'estomper lentement. La vasodilatation était optimale lorsque la pulsation était appliquée 50 % du temps total à une fréquence de rafale de 10 kHz à 10 MHz. Les effets étaient non thermiques. Le schéma de la vasodilatation induite par la solution chaude de Ringer était différent de l'effet vasodilatateur de la faible RFR, impliquant le niveau de  $\text{Ca}^{2+}$  intracellulaire<sup>2+</sup>. Ils ont émis l'hypothèse que, puisque la  $\text{Ca}^{2+}$  ATPase est activée par le GMP cyclique qui est produit par l'action enzymatique de la guanylate cyclase, les RF-EMF peuvent activer la guanylate cyclase pour faciliter la production de GMP cyclique. Ils ont conclu que l'étude indiquait pour la première fois que le RFR dilatait les vaisseaux de résistance périphériques, ni par des agents vasodilatateurs pharmacologiques ni par un rayonnement thermique physique, mais que les mécanismes précis d'activation de la guanylate cyclase par le RFR au niveau moléculaire nécessitaient une étude plus approfondie. La vasodilatation et la constriction touchent toutes les parties du corps et peuvent affecter tous les systèmes organiques.

Avant cela, Schwartz et al. [480] ont constaté des modifications des ions calcium dans le cœur des grenouilles en réponse à un faible champ VHF modulé à 16 Hz. Il s'agirait d'une exposition courante dans l'environnement. Les ions calcium sont essentiels à la fonction cardiaque.



Balmori [24-30, 442] et Balmori et Hallberg [271] se sont largement intéressés aux effets des CEM sur la faune, avec deux articles sur les amphibiens. Balmori [442], dans une revue, a noté que les RFR dans la gamme des micro-ondes sont une cause possible de déformations et de déclin de certaines populations d'amphibiens, et Balmori [481] en 2010 a trouvé une mortalité accrue chez les têtards exposés aux RFR dans un environnement urbain. Dans l'étude de 2010, les têtards de la grenouille commune (*Rana temporaria*) ont été exposés aux RFR de plusieurs tours de téléphonie mobile à une distance de 459 pieds (140 m). Les expositions ont duré deux mois, de la phase de l'œuf à la croissance avancée du têtard avant la métamorphose. L'intensité des champs RF et MW entre 1,8 et 3,5 V/m ( $0,86\text{--}3,2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) a été mesurée avec trois appareils différents. Les résultats ont déterminé que le groupe exposé ( $n=70$ ) présentait une faible coordination des mouvements et une croissance asynchrone qui se traduisait par des têtards à la fois grands et petits, ainsi qu'un taux de mortalité élevé inquiétant de 90 %. Dans le groupe témoin ( $n=70$ ), une cage de Faraday a été utilisée dans les mêmes conditions. Les témoins ont trouvé que la coordination des mouvements était normale et que le développement était synchrone avec un taux de mortalité faible de 4,2 %. Ces résultats indiquent que le rayonnement radioélectrique des tours de téléphonie cellulaire dans une situation de terrain peut affecter à la fois le développement et la mortalité des têtards. Avant cette étude, Grefner et al. [482] ont également constaté une augmentation de la mortalité chez les têtards (*Rana temporaria* L.) exposés aux CEM, ainsi que des taux de mortalité plus élevés et un développement plus lent et moins synchrone.

Mortazavi et al. [483] ont constaté des changements dans les - contractions musculaires chez des grenouilles exposées aux radiations d'un téléphone cellulaire de 900 MHz pendant 30 minutes ; les muscles gastrocnemius ont ensuite été isolés et exposés aux radiations d'un téléphone mobile allumé/éteint pendant trois intervalles de 10 minutes. Les auteurs ont signalé des effets induits par les RFR sur la hauteur d'impulsion et la période de latence des contractions musculaires. Les DAS de la préparation nerf-muscle ont été calculés à 0,66 (muscle) et 0,407 (nerf) W/kg.

Rafati et al. [484] ont étudié les effets des RFR sur les grenouilles à partir d'un équipement de brouillage de téléphones mobiles émettant des RFR dans les mêmes fréquences que les téléphones mobiles. (Bien qu'illégaux dans de nombreux pays, les brouilleurs sont néanmoins utilisés pour interférer avec les signaux et interrompre les communications). L'étude visait à donner suite aux rapports faisant état d'effets non thermiques des RFR sur les amphibiens en ce qui concerne l'altération des schémas de contraction musculaire. Ils se sont concentrés sur trois paramètres : la hauteur d'impulsion des contractions des muscles de la jambe, l'intervalle de temps entre deux contractions ultérieures et la période de latence du muscle gastrocnémien isolé de grenouille après stimulation par des impulsions carrées uniques de 1 V (1 Hz). Les animaux du groupe brouilleur ont été exposés aux RFR à une distance de 1 m de l'antenne du brouilleur pendant 2 h, tandis que les grenouilles témoins ont subi une exposition fictive. Tous ont ensuite été sacrifiés et les muscles gastrocnémiens isolés ont été exposés à des impulsions on/off

de brouilleurs pendant trois intervalles successifs de 10 minutes (le DAS pour le nerf et le muscle des différentes formes de brouilleurs était compris entre 0,01 et 0,052 W/kg). Les résultats ont montré que ni la hauteur d'impulsion des contractions musculaires ni l'intervalle de temps entre deux contractions successives n'étaient affectés, mais que la période de latence (intervalle de temps entre le stimulus et la réponse) était modifiée de manière statistiquement significative dans les échantillons exposés aux RFR. Ils ont conclu que les résultats soutenaient les rapports précédents sur les effets non thermiques des CEM sur les amphibiens, y compris les effets sur le schéma des contractions musculaires. Les échantillons témoins exposés à l'ombre n'ont montré aucun effet.

## Amphibiens, reptiles : ELF-EMF

Les amphibiens sont très sensibles aux CEM-ELF. Une étude réalisée au début de 1969 par Levingood [485] à l'aide d'une sonde à champ magnétique a révélé des taux élevés de tératogenèse chez les grenouilles (*Rana sylvatica*) et les salamandres (*Ambystoma maculatum*). Deux sondes identiques utilisant des intensités de champ différentes ont été utilisées - toutes deux fonctionnant dans la région des kilogauss avec des gradients de champ élevés. Les œufs et les embryons d'amphibiens ont été exposés à différents stades de développement et des anomalies flagrantes ont été constatées dans les larves en développement par rapport au témoin. Au stade de l'éclosion, de graves anomalies ont été constatées chez les larves d'anoures et d'urodèles provenant d'œufs traités par la sonde. Les anomalies d'éclosion comprenaient une microcéphalie, un développement altéré et de multiples excroissances œdémateuses. Chez les grenouilles traitées par la sonde, l'apparition d'un pourcentage élevé de malformations a été retardée jusqu'au stade culminant de la métamorphose. Jusqu'à ce stade, les larves avaient la même apparence que les spécimens témoins, camouflant ainsi les dommages après un bref traitement des premiers embryons. Les anomalies des grenouilles à la métamorphose différaient de celles des têtards à l'éclosion et consistaient principalement en de graves cloques sous-épidermiques et en des malformations des pattes, notamment la formation de multiples membres déformés - incompatibles avec la vie. Plus de 90 % des altérations morphologiques au point culminant de la métamorphose étaient également associées à des reins déformés. Les stades de - développement de la gastrula semblaient être les plus sensibles dans la catégorie des effets différés. Bien qu'il s'agisse d'une expérience d'exposition à un champ élevé, il s'agit d'une intensité que l'on retrouve aujourd'hui dans certains environnements, notamment près des lignes à haute tension et dans des situations de courant de sol anormal.

Neurath [486] a également constaté une forte inhibition de la - croissance embryonnaire précoce de la grenouille léopard (*Rana pipiens*) par un champ magnétique statique élevé à fort gradient (1T) - une exposition que l'on trouve parfois dans l'environnement - tandis que Ueno et Iwasaka [487] ont constaté une croissance anormale et une augmentation de l'incidence de la maladie.

une incidence accrue de malformations chez les embryons exposés à des champs magnétiques allant jusqu'à 8T, mais des expositions aussi élevées sont généralement observées près des sites industriels et rarement dans la nature.

Severini et al [488] ont spécifiquement cherché à savoir si de faibles champs magnétiques ELF pouvaient affecter le développement des têtards et ont constaté un retard de maturation chez ces derniers. Deux cohortes de têtards de *X. laevis laevis* (Daudin) ont été exposées pendant 60 jours au cours de leur immaturité à un champ magnétique de 50 Hz d'une densité de flux magnétique de 63,9-76,4  $\mu\text{T}$  rms (valeur moyenne quadratique, valeurs moyennes) dans un solénoïde. Les témoins étaient deux cohortes comparables situées à distance du solénoïde. L'expérience a été répétée trois fois. Les résultats ont montré une réduction du taux de développement moyen des cohortes exposées par rapport aux témoins (0,43 contre 0,48 stade/jour,  $p < 0,001$ ) à partir des premiers stades larvaires ; l'exposition a augmenté la période moyenne de métamorphose des têtards de 2,4 jours par rapport aux témoins ( $p < 0,001$ ) ; et pendant la période de maturation, les taux de maturation des têtards exposés par rapport aux témoins étaient modifiés. Aucune augmentation de la mortalité, des malformations ou des effets téra-togènes n'a été observée dans les groupes exposés. Les chercheurs ont conclu que des champs magnétiques de 50 Hz relativement faibles peuvent avoir des effets sublétaux sur les têtards en ralentissant le développement larvaire et en retardant la métamorphose. De telles expositions se retrouvent aujourd'hui dans l'environnement à certains endroits et, même si les changements étaient faibles, associés au changement climatique, de tels effets sublétaux pourraient avoir un impact sur certaines populations d'animaux sauvages dans certains environnements.

Dans un travail de suivi similaire, Severini et Bosco [489] ont trouvé une sensibilité à de petites variations de l'intensité du flux magnétique (50 Hz, 22 jours d'exposition continue, intensité du flux magnétique entre 63,9 et 76,4  $\mu\text{T}$ ) chez les têtards exposés à un champ plus fort par rapport aux témoins exposés à un champ plus faible. Un retard significatif du développement de 2,5 jours a été constaté chez les exposés par rapport aux témoins. Ils ont conclu que le retard était causé par les densités de flux magnétique légèrement différentes, les résultats suggérant un seuil de champ autour de 70  $\mu\text{T}$  dans le contrôle du taux de développement des têtards.

En 1997, Schlegel a constaté que les salamandres aveugles des cavernes (*Proteus anguinus*) et les tritons des Pyrénées (*Euproctus asper*) étaient sensibles aux champs électriques de faible intensité dans l'eau [490]. Et Schlegel et Bulog [491], dans un travail de suivi, ont trouvé des seuils de comportement d'évitement manifeste aux champs électriques en fonction de la fréquence des ondes sinusoïdales continues dans l'eau. Neuf salamandres provenant de différentes populations slovènes d'urodèles (*P. anguinus*), dont trois spécimens de la variété "noire" (*P. anguinus parkelj*), ont montré des seuils compris entre 0,3 mV/cm (environ 100 nA/cm<sup>2</sup>) et jusqu'à 2 mV/cm (670 nA/cm<sup>2</sup>), avec les fréquences les plus réactives autour de 30 Hz. La sensibilité comprenait une gamme de fréquences totale inférieure à 1 Hz (à l'exclusion du courant continu) jusqu'à 1-2 kHz, avec des seuils supérieurs de 40 dB. Il s'agit de plages qui peuvent

On les trouve dans la nature près des lignes à haute tension et des pratiques de mise à la terre des services publics près de l'eau, de certains câblages sous-marins et de certains émetteurs RFR.

Landesman et Douglas, en 1990 [492], ont constaté que certaines espèces de tritons présentaient une croissance anormale et accélérée des membres lorsque des champs électromagnétiques pulsés étaient ajoutés au processus normal de régénération des membres. Alors que la régénération normale des membres a trouvé des modèles de repousse normaux chez 72 % des spécimens, 28 % étaient anormaux. Les anomalies comprenaient la perte d'un doigt, des carpiens fusionnés et des défauts des os longs, qui se produisaient seuls ou en combinaison les uns avec les autres. Lorsque l'exposition à une CEMP a été ajoutée pendant les 30 premiers jours suivant l'amputation, suivie d'une période de 3 à 4 mois après l'amputation, le groupe de membres antérieurs présentant des défauts bruts uniques a augmenté de 12 % supplémentaires. Les défauts (isolés ou combinés) comprenaient la perte de deux ou plusieurs doigts avec perte associée des carpiens, l'absence de la totalité du dessin de la main et des anomalies associées au radius et au cubitus. Les chercheurs n'ont fourni aucune explication. Les intensités d'exposition étaient similaires à celles utilisées pour faciliter la guérison des fractures sans jonction chez l'homme.

Komazaki et Takano en 2007 [493] ont trouvé des taux de croissance accélérés au début du développement avec des expositions au courant alternatif de 50 Hz, 5-30 mT dans les œufs fécondés de tritons japonais (*Cynops pyrrhogaster*). La période de gastrulation a été raccourcie par des mouvements cellulaires morphogénétiques favorisés par les CEM et une augmentation de  $[\text{Ca}^{2+}]_i$ . Ils ont déclaré que leurs résultats indiquaient que les CEM augmentaient spécifiquement le  $[\text{Ca}^{2+}]_i$  des cellules de la gastrula, accélérant ainsi la croissance. Cette étude n'a observé que les stades larvaires et ils n'ont pas constaté de malformations lors de l'exposition aux CEM, ce qu'ils ont attribué à des différences possibles dans l'intensité et le mode des CEM.

Les amphibiens et certains reptiles étant très sensibles aux CEM naturels pour des besoins importants de reproduction et d'orientation, les amphibiens vivant dans des environnements aquatiques, terrestres et aériens (c'est-à-dire les espèces de grenouilles arboricoles) peuvent être affectés par les CEM anthropogéniques multifréquences d'une manière que nous ne comprenons pas entièrement. Il existe des effets potentiels - en particulier des MMW 5G qui se couplent de manière maximale avec la peau - sur tous les aspects de leur développement et de leur cycle de vie, y compris des effets secondaires.

## Poissons, mammifères marins, homards et crabes

Les animaux aquatiques sont extrêmement sensibles aux CEM naturels et donc potentiellement aux perturbations anthropiques. Le champ géomagnétique dipôle de la Terre produit un signal constant de

Le système nerveux central est une source d'information directionnelle très variée chez les espèces terrestres et aquatiques, qui est utilisée pour le comportement de repérage, l'orientation pendant la navigation et la migration. Ces informations sont utilisées à la fois comme une "carte" pour la position et comme une "boussole" pour la direction [494-497]. Les espèces aquatiques sont connues pour être sensibles aux champs géomagnétiques statiques, aux changements atmosphériques et aux activités des taches solaires [498]. Pour des études récentes et complètes sur la sensibilité des poissons aux champs magnétiques et leurs effets sur le comportement, voir Tricas et Gill (36) et Krylov et al. (33). Certaines "cartes magnétiques" biologiques peuvent être héritées [499]. Pour une discussion approfondie sur les champs naturels de la Terre et la magnétoréception chez les animaux marins, en particulier sur les effets des études électromagnétiques qui utilisent de puissants CEM localisés pour cartographier les gisements de pétrole sous les fonds marins, voir Nyqvist et al [498] et ci-dessous.

Comme indiqué ci-dessus, en raison de la différence de conductivité de l'eau et d'autres facteurs, la façon dont certaines espèces aquatiques perçoivent les CEM peut reposer sur des modes de perception physiologique uniques, ainsi que sur ceux employés par les animaux terrestres. Il peut également exister des - combinaisons sensorielles non encore comprises chez certaines espèces aquatiques et semi-aquatiques. Par exemple, quel rôle la conductivité neuronale des moustaches (vibrisses) des phoques, des otaries et des morses joue-t-elle en dehors de la recherche de nourriture ? Le réseau dense de moustaches des espèces aquatiques est plus étendu et le flux sanguin plus important que chez les espèces terrestres. Il peut contenir 1 500 nerfs par follicule, contre 200 chez les chats. Les moustaches des phoques présentent également des différences géométriques par rapport aux espèces terrestres et la plus grande partie du cerveau des phoques est liée à la fonction des moustaches. Les phoques utilisent leurs moustaches pour déterminer la taille, la forme et la structure externe des objets et peuvent trouver leurs proies même lorsqu'ils ont les yeux bandés. Leurs moustaches sont également sensibles aux faibles variations du mouvement de l'eau [100]. Mais s'en servent-ils également comme d'une boussole de localisation ou de direction par rapport au champ - géomagnétique ? Cette question n'a pas encore été étudiée.

Des différences sensorielles uniques chez les espèces aquatiques ont été documentées depuis longtemps. Joshberger et al. [500] ont noté qu'en 1678, Stefano Lorenzini [501] a été le premier à décrire un réseau d'organes chez la raie torpille, connu sous le nom d'Ampoules de Lorenzini (AoL). Sa fonction est restée inconnue pendant 300 ans jusqu'à ce que Murray [502] mesure les propriétés électriques des AoL chez les poissons éleuthérobranchés - requins, raies et raies. Des travaux ultérieurs [101, 503-508] ont confirmé et considérablement enrichi ces connaissances. Les chercheurs savent maintenant que l'AoL est probablement le principal mécanisme qui permet aux éleuthérobranchés de détecter et de cartographier la physiologie d'une proie potentielle grâce aux très faibles changements des champs électriques émis par les contractions musculaires de la proie.

Les ampoules individuelles sont des pores de la peau qui s'ouvrent sur l'environnement aquatique avec un canal rempli de gelée menant à une alvéole contenant une série de cellules électrosensibles. À l'intérieur de l'alvéole, les cellules électrosensibles des ampoules

communiquent avec les neurones et cette intégration des signaux provenant de plusieurs ampoules est ce qui permet aux poissons éleuthérobranchés de détecter des variations de champ électrique aussi faibles que 5 nV/cm [503, 506, 509, 510]. La gelée d'AoL a été décrite comme un semi-conducteur avec une conductivité dépendant de la température et un comportement thermoélectrique [500, 509, 510], ainsi que comme un simple conducteur ionique avec les mêmes propriétés électriques que l'eau de mer environnante [503, 506]. Josberger et al. [500] ont tenté de clarifier le rôle de l'AoL dans l'électrosensibilité en mesurant la conductivité protonique de l'AoL. Ils ont découvert que la conductivité protonique à température ambiante de la gelée d'AoL est très élevée ( $2 \pm 1$  mS/cm), soit 40 fois moins que celle de certains polymères conducteurs de protons fabriqués par l'homme. Cela fait de l'AoL le matériau biologique le plus conducteur rapporté à ce jour. Les chercheurs ont suggéré que les polyglycannes contenus dans la gelée d'AoL pourraient contribuer à sa haute conductivité protonique.

D'autres mécanismes magnéto-sensoriels aquatiques plus en harmonie avec les animaux terrestres comprennent la présence de particules ferromagnétiques dans la magnétite - de minuscules aimants produits naturellement qui s'alignent sur le champ magnétique terrestre, permettant la direction et l'orientation des espèces. La magnétite semble transmettre les informations nécessaires par le biais d'une connexion avec le système nerveux central [340, 497, 511]. Un système basé sur la magnétite est plausible pour les cétacés [512, 513] car de la magnétite a été trouvée dans les méninges de la dure-mère entourant le cerveau des baleines et des dauphins [514, 515]. Il existe également des preuves que des variations/anomalies locales du champ géomagnétique dans certaines topographies sous-marines peuvent jouer un rôle dans les échouages de cétacés vivants [516, 517], ce qui indique une boussole magnétique à base de magnétite. De plus, les cétacés vivant en liberté ont montré des signes de navigation basée sur la magnétoréception, par exemple, les routes migratoires du rorqual commun ont été corrélées à une faible intensité géomagnétique [513].

Récemment, Granger et al. [518] ont trouvé des corrélations dans les données entre 31 ans d'échouages de baleines grises (*Eschrichtius robustus*) et l'activité des taches solaires, en particulier avec le "bruit" RF dans la gamme des 2 800 MHz. Le cycle de 11 ans des taches solaires est fortement corrélé avec les émissions intenses de particules à haute énergie connues sous le nom de tempêtes solaires, qui peuvent modifier temporairement le champ géomagnétique et, à leur tour, modifier l'orientation chez les espèces magnétoréceptives. Les tempêtes solaires provoquent également une augmentation du "bruit" - naturel à large bande des radiofréquences. Les chercheurs ont examiné les modifications des champs géomagnétiques et du "bruit" RF et ont constaté que le RF était un facteur déterminant. En outre, ils ont émis l'hypothèse que l'augmentation des échouages pendant une forte activité solaire est plus probablement due à des mécanismes de paires de radicaux qui sont plus réactifs avec les RF que la magnétite, qui semble plus réactive aux CEM-ELF. Deux études précédentes ont également trouvé des corrélations entre les échouages de cétacés et les activités solaires [519, 520]. Les deux mécanismes peuvent entrer en jeu dans des circonstances différentes ou agir en synergie.

Kremers et al. [512] ont étudié la réponse spontanée de magnétoréception chez six grands dauphins nageant librement en captivité (*Tursiops truncatus*) à des dispositifs magnétisés et démagnétisés utilisés comme témoins. Ils ont constaté une latence plus courte chez les dauphins qui s'approchaient du dispositif contenant un bloc de néodyme fortement magnétisé par rapport à un bloc démagnétisé témoin identique en forme et en densité et donc indiscernable par écholocation. Ils en ont conclu que les dauphins peuvent faire de la discrimination sur la base des propriétés magnétiques - une condition préalable à la navigation basée sur la magnétoréception. Stafne et Manger [521] ont également observé que les grands dauphins captifs de l'hémisphère nord nagent principalement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre alors que les dauphins de l'hémisphère sud nagent principalement dans le sens des aiguilles d'une montre. Aucune hypothèse n'a été avancée pour expliquer ce comportement.

La façon dont les saumons se déplacent sur de vastes distances - de leur lieu d'éclosion dans le fond des rivières d'eau douce aux lacs pendant la croissance juvénile, puis à la haute mer pendant la maturité, et avec un retour final à leur lieu de naissance néonatal pour frayer et mourir (pour la plupart des salmo-nidés anadromes) - fascine les chercheurs depuis des décennies. Les recherches indiquent qu'ils peuvent utiliser plusieurs magnéto-sens pour y parvenir, y compris des mécanismes hérités [522], des empreintes [499, 522], une boussole magnétique [499, 522, 523] et des matériaux biomagnétiques. On a découvert que les saumons possédaient des chaînes cristallines de magnétite [524]. Une étude récente a montré que de fortes impulsions magnétiques étaient capables de perturber l'orientation de modèles de saumons [525], ce qui indique un mécanisme basé sur la magnétite. Chez le saumon, le processus de migration est compliqué par le fait que la capacité à détecter les champs géomagnétiques peut être altérée par les changements de salinité entre l'eau douce et l'eau salée, ce qui indique des mécanismes multi-sensoriels [499].

La spéculation selon laquelle le saumon utilise le champ géomagnétique dans une certaine mesure pour sa migration emblématique remonte à plusieurs décennies [526]. Quinn [527] a trouvé des preuves que le saumon rouge (*Oncorhynchus nerka*) frey utilise à la fois une boussole céleste et magnétique lorsqu'il migre des éclosions en rivière vers les lacs. Putman et al. [499], qui ont beaucoup écrit sur ce sujet, se sont concentrés sur la façon dont les saumons se dirigent vers des zones d'alimentation océaniques spécifiques - un défi puisque les saumons juvéniles atteignent les habitats d'alimentation à des milliers de kilomètres de leur lieu de naissance. Les chercheurs ont constaté expérimentalement que les jeunes saumons Chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*) réagissaient à des champs magnétiques similaires aux latitudes de leur aire de répartition océanique extrême en s'orientant dans des directions qui les mèneraient vers leurs aires d'alimentation marines. Ils ont également constaté que les poissons utilisent la combinaison de l'intensité magnétique et de l'angle d'inclinaison pour évaluer leur emplacement géographique et ont conclu que la carte magnétique des saumons semble être héritée puisque les poissons n'ont pas eu d'expérience migratoire antérieure. Ces résultats, associés à

Les résultats obtenus chez les tortues de mer (voir ci-dessous) indiquent que les cartes magnétiques sont très répandues chez les espèces aquatiques et expliquent probablement les extraordinaires capacités de navigation observées chez les migrants sous-marins sur de longues distances [499].

Il est moins probable que les crypto-chromes de la paire de radicaux sensibles à la lumière jouent un rôle important chez les espèces aquatiques, bien que certains en fassent l'hypothèse [528]. Krylov et al. [33], cependant, ont noté qu'il n'y a pas de structures anatomiques ou de mécanismes neurophysiologiques actuellement connus pour les récepteurs de paires de radicaux dans le cerveau des poissons et que puisque la lumière diminue avec la profondeur de l'eau et que les poissons sont capables de s'orienter dans l'obscurité totale en utilisant le champ magnétique, leur opinion est qu'il est trop tôt pour dire que les poissons ont des mécanismes de magnétoréception basés sur les radicaux libres, dépendants de la lumière ou non.

## Poissons, homards, crabes : ELF-EMF

Pour plusieurs raisons liées aux différences de conductivité entre l'eau et l'air (voir ci-dessus), les RFR sont actuellement beaucoup moins préoccupants dans les environnements aquatiques que les ELF. Avec le nombre sans cesse croissant de câbles sous-marins utilisés pour tout, depuis les communications de données transcontinentales jusqu'à l'alimentation électrique des îles, des plates-formes marines, des observatoires sous-marins, des forages en mer, des installations éoliennes, des turbines marémotrices et houlomotrices, entre autres, de nombreuses nouvelles sources de courant électrique alternatif et continu sont créées dans les milieux marins et d'eau douce. Selon Ardelean et Minnebo, qui ont écrit en 2015 [529], près de 8 000 km de câbles de courant continu à haute tension (CCHT) étaient présents dans les fonds marins du monde entier, dont 70 % dans les eaux européennes, et ce chiffre ne peut que croître de façon spectaculaire à mesure que de nouvelles sources d'énergie renouvelable sont construites pour remplacer les combustibles fossiles dans le monde.

La curiosité concernant les effets négatifs potentiels des CEM-ELF générés par les câbles sur toutes les phases de la vie des poissons s'est également accrue, en particulier chez les espèces benthiques et démersales qui passent beaucoup de temps à proximité des câbles dans des environnements de fond plus profonds pour la ponte, la croissance des larves et le développement pendant la majeure partie, voire la totalité, de leur vie adulte.

Fey et al. [494, 495] et Öhman et al. [530] ont noté qu'il existe deux types d'expositions anthropiques créées par les câbles : le courant continu haute tension (CCHT) qui émet des champs magnétiques statiques, et le courant alternatif triphasé (transmission d'énergie CA) qui émet des champs électromagnétiques variant dans le temps. La densité du courant électrique à proximité des câbles sous-marins sur le fond de la mer peut varier considérablement selon le type de câble et selon qu'ils sont positionnés sur le fond de la mer ou enterrés [36, 530]. Des changements notables du champ magnétique peuvent se produire à quelques mètres près, mais généralement pas plus.



que plusieurs mètres du câble. Cependant, Hutchinson et al. [531], dans une étude de terrain robuste et un examen approfondi, ont trouvé des expositions étonnamment plus fortes et plus complexes que prévu (voir ci-dessous).

Les poissons étant très sensibles aux champs magnétiques statiques (MF), il est important de délimiter les champs statiques des CEM anthro-pogènes à courant alternatif dans les études aquatiques. Chez les espèces d'eau douce, dans des conditions de laboratoire, Fey et al [494] ont trouvé des résultats similaires à ceux des études sur le saumon (mentionnées ci-dessus) chez le grand brochet (*Esox lucius*) exposé à un champ magnétique statique provenant de câbles à courant continu (10 mT) pendant la phase embryonnaire et les six premiers jours suivant l'éclosion. Aucun effet statistiquement significatif du champ magnétique n'a été observé sur le succès d'éclosion, la mortalité des larves, la taille des larves à l'éclosion et le taux de croissance pendant les six premiers jours de vie. Cependant, des effets MF significatifs ont été observés sur le temps d'éclosion (un jour plus tôt dans un champ magnétique que dans le contrôle), la taille du sac vitellin était plus petite et le taux d'absorption du sac vitellin était plus rapide. Ils ont interprété l'absorption plus rapide de la vésicule vitelline dans un champ magnétique comme une indication de l'augmentation du taux métabolique, mais ils ont ajouté que, même si certaines conséquences négatives étaient attendues, le risque réel d'augmentation de la mortalité des larves de grand brochet semblait négligeable. Bien que des valeurs de champ magnétique supérieures à 10 mT soient dangereuses pour les larves de poisson, ils ont ajouté que de telles valeurs ne se produisent pas dans l'environnement naturel, même le long des câbles sous-marins.

Mais dans des travaux de suivi de plus longue durée, le même groupe de recherche général est arrivé à une conclusion différente. Fey et al [495] ont étudié les effets sur les oeufs et les larves de truites arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) exposés à un champ magnétique (MF) statique de 10 mT et à un CEM de 50 Hz de 1 mT pendant 36 jours (c'est-à-dire du stade de l'oeuf à l'oeil jusqu'à environ 26 jours après l'éclosion). Ils ont constaté que ni le MF statique ni le CEM de 50 Hz n'avaient d'effets significatifs sur la mortalité embryonnaire/arvaire, le temps d'éclosion, la croissance des larves ou le temps de remontée des larves depuis le fond, mais que les deux champs augmentaient les taux d'absorption du sac vitellin. Bien qu'ils aient déclaré que cela n'était pas directement lié à un effet MF, il a été démontré que les larves dont le sac vitellin était absorbé au moment de la remontée étaient moins efficaces pour profiter de la nourriture disponible lors de la première alimentation et prenaient moins de poids. Ils ont conclu que ces expositions pouvaient avoir un effet négatif sur le taux d'absorption du sac vitellin, empêchant ainsi les poissons de réaliser les activités alimentaires importantes nécessaires à une prise de poids rapide et à une survie accrue. Dans une autre étude, Fey et al. [532] ont observé que des truites arc-en-ciel élevées en laboratoire pendant 37 jours et exposées à un MF statique (10 mT) ou à un CEM 50-Hz (1 mT) présentaient des défauts dans l'otolithe de l'oreille interne qui est responsable de l'audition et de l'équilibre chez les poissons. Les auteurs ont conclu que les constructions et/ou câbles sous-marins qui émettent une fréquence électromagnétique de 10 mT ou plus peuvent affecter les organismes vivants dans un rayon de quelques mètres.

distance, en particulier les espèces comme la truite dont les stades de vie s'installent sur le fond du sédiment pendant les premiers stades de leur développement.

Le poisson zèbre (*Danio rerio*) est souvent utilisé dans la recherche sur les CEM en toxicologie et en biologie du développement pour étudier les effets sur les humains, car les génomes sont très similaires. Li et al. [533] ont étudié les CEM-CE sur le développement d'embryons fécondés de poisson zèbre divisés en sept groupes. Les embryons des groupes expérimentaux ont été exposés en continu à des MF sinusoïdales de 50 Hz avec des intensités de 30, 100, 200, 400 ou 800  $\mu$ T pendant 96 h. Le groupe fictif était identique mais sans exposition aux FEB-MF. Les résultats ont montré que les ELF-MF ont provoqué un retard d'éclosion et une diminution du rythme cardiaque aux premiers stades du développement, mais aucune différence significative n'a été observée en ce qui concerne la mortalité ou les anomalies des embryons. Les tests de coloration à l'orange d'acridine ont montré des signes notables d'apoptose dans la nageoire ventrale et la colonne vertébrale et la transcription des gènes liés à l'apoptose (caspase-3, caspase-9) était significativement régulée à la hausse dans les embryons exposés à l'ELF-MF. Ils ont conclu que les ELF-MF avaient des effets néfastes sur le développement embryonnaire du poisson-zèbre, notamment en ce qui concerne l'éclosion, la diminution du rythme cardiaque et l'apoptose induite, bien que ces effets ne constituent pas une menace mortelle. Les expositions de gamme inférieure de cette étude se retrouvent dans certains environnements aquatiques.

Sedigh et al. [534] ont étudié les effets sur le poisson zèbre exposé à des champs magnétiques statiques. Des expositions aiguës d'une semaine et subaiguës de trois semaines à différents champs magnétiques statiques de 2,5, 5 et 7,5 mT ont été mesurées sur les indices de stress (cortisol et glucose), les hormones stéroïdes sexuelles (17 $\alpha$ -estradiol et 17 $\alpha$ -hydroxy progestérone) et la fécondité. Ils ont constaté un changement significatif des niveaux de cortisol, de glucose, de 17 $\alpha$ -estradiol (E2) et de 17 $\alpha$ -hydroxy progestérone (17-OHP) avec l'augmentation de l'intensité et de la durée de l'exposition et ont conclu que les champs magnétiques statiques à des intensités plus élevées avaient des effets nocifs sur la biologie de la reproduction du poisson zèbre pendant les expositions aiguës et subaiguës.

Les récentes recherches en laboratoire de Hunt et al. [535] ont utilisé le poisson-chat transparent (*Kryptopterus vitreolus*) que l'on trouve dans les eaux lentes de l'Asie du Sud-Est comme modèle pour étudier la magnétoréception. L'étude a utilisé des chambres de labyrinthe en Y, un logiciel de suivi des animaux et des techniques d'intelligence artificielle pour quantifier les effets des champs magnétiques sur la direction de la nage du poisson-chat. Ils ont placé un aimant permanent en néodyme et terres rares (11,5  $\times$  3,18  $\times$  2,2 cm) avec un flux magnétique horizontal de 577 mT à la surface de l'aimant, à 10 cm de l'extrémité d'un des bras du labyrinthe en Y. Ils ont constaté que les poissons-chats s'éloignaient systématiquement des champs magnétiques de plus de 20  $\mu$ T. Les poissons-chats ont également montré une capacité d'adaptation aux changements de direction et d'emplacement du champ magnétique. L'évitement magnétique n'était pas influencé par le comportement de l'école. Les expositions fictives n'ont pas provoqué d'évitement. De telles expositions pourraient se produire à proximité de certains câbles sous-marins.

Afin d'élucider les résultats des réactions des espèces à proximité des câbles sous-marins et de combler les lacunes dans les connaissances depuis l'examen de Tricas et Gill de 2011 [36], Hutchinson et al. [531] ont mené des études de modélisation sur le terrain et en laboratoire des champs de courant alternatif et continu sur le homard américain (*Homarus americanus*) et la petite raie (*Leucoraja erinacea*). Ils ont noté que dans les études précédentes, bien que des réponses comportementales aient été observées, les résultats n'ont pas permis de déterminer si des effets biologiques significatifs (par exemple, des changements de population) se sont produits. Le homard d'Amérique a été modélisé parce qu'il s'agit d'une espèce magnétosensible [536] et que l'on craignait que les CEM des câbles puissent restreindre les mouvements et/ou la migration. Les homards peuvent migrer jusqu'à 80 km dans un sens depuis les eaux profondes jusqu'aux zones de reproduction peu profondes. La petite raie a été utilisée comme modèle pour les taxons les plus électrosensibles des élaémobranches, qui peuvent être attirés par les CEM des câbles, en particulier pour les espèces benthiques, modifiant ainsi leur comportement de recherche de nourriture ou de déplacement. Les deux modèles ont donc été considérés comme indicatifs des impacts potentiels des CEM. Dans cette solide étude de terrain, les chercheurs ont constaté que le homard américain présentait un changement statistiquement significatif mais subtil de son activité comportementale lorsqu'il était exposé à la CEM du câble CCHT (fonctionnant à une puissance constante de 330 MW à 1 175 ampères). La petite raie a montré une forte réponse comportementale aux CEM d'un câble alimenté pendant 62,4 % de l'étude, le courant électrique le plus fréquemment transmis étant de 16 ampères (à 0 MW, 37,5 % du temps), 345 ampères (100 MW, 28,6 %) et 1 175 ampères (330 MW, 15,2 %). Ils ont conclu que pour les deux espèces, les changements de comportement ont une pertinence biologique en ce qui concerne la façon dont elles se déplacent et sont distribuées dans une zone CEM-câble, mais ils ont noté que le CEM ne constituait pas une barrière aux mouvements à travers le câble pour aucune des espèces.

L'intérêt de cette étude réside dans les relevés de champs réels à proximité des câbles. Des champs magnétiques et électriques AC significatifs inattendus ne correspondaient pas aux modèles informatiques et ont été observés comme étant associés aux deux câbles d'alimentation DC étudiés. Les valeurs AC maximales observées le long de l'axe du câble étaient de 0,15  $\mu$ T et 0,7 mV/m pour les champs magnétiques et électriques respectivement pour un câble, et de 0,04  $\mu$ T et 0,4 mV/m respectivement, pour l'autre câble. En outre, la section transversale des pics de CEM présentés par les câbles d'alimentation sous-marins à courant continu était plus large que prévu aux deux étudiés. Les champs magnétiques CC et CA ont atteint des niveaux de fond de part et d'autre du câble sur une échelle d'environ 5 et 10 m de la valeur maximale observée respectivement, tandis que les champs électriques CA ont atteint le fond sur une échelle de 100 m (328 ft) de la valeur maximale. Les valeurs maximales observées se sont produites presque directement au-dessus de l'axe du câble ; il y avait un décalage de 3,3 pieds (<1 m) là où le câble était tordu. Les chercheurs ont noté que cette observation de champs AC, avec de larges zones de distorsion EMF

étant associés aux câbles à courant continu, ont rendu plus complexe l'interprétation des études sur les effets biologiques des CEM provenant des câbles à courant continu. Les champs électriques alternatifs associés au câble sea2shore à courant alternatif (1 à 2,5 mV/m) étaient plus élevés que les champs électriques alternatifs imprévus produits par les câbles à courant continu (0,4 à 0,7 mV/m). Le champ magnétique produit par le câble AC sea2shore (plage de 0,05-0,3  $\mu$ T) était  $\sim 10$  fois plus faible que les valeurs modélisées commandées par l'opérateur du réseau, ce qui indique que la conception torsadée à trois conducteurs permet d'obtenir une auto-annulation significative. Tout cet aspect de l'étude indique la nécessité d'une évaluation précise sur le terrain, et pas seulement d'une modélisation informatique, et de systèmes bien conçus puisque des anomalies se produisent.

Nyqvist et al [498], dans un examen approfondi, se sont concentrés sur les mammifères marins et l'utilisation de levés électromagnétiques sous-marins qui cartographient les dépôts de pétrole dans les fonds marins par le biais de forts CEM induits dans des applications directionnelles variées. Ils ont constaté que les CEM créés lors de ces levés actifs se situaient dans les limites de détection des animaux marins et que les champs pouvaient potentiellement affecter le comportement des espèces électro-perceptives, mais ils ont noté que les effets devaient être limités à quelques kilomètres car les champs électriques et magnétiques créés s'atténuent rapidement. Ils ajoutent que chez les animaux marins en migration, les expositions sont de courte durée et la plupart sont proches des niveaux naturels, mais ils mettent en garde contre le manque d'études, en particulier pour les élaémobranches les plus sensibles et les plus susceptibles d'être perturbés par les champs électriques. Ils ont également noté qu'avec les champs magnétiques induits, les animaux qui utilisent des signaux magnétiques pour migrer ou s'orienter localement pendant certaines périodes de migration, d'orientation ou de reproduction pourraient être les plus touchés par cette technologie de surveillance.

Taorimina et al [537] ont étudié les champs magnétiques statiques et variables dans le temps sur le comportement de homards européens (*Homarus gammarus*) juvéniles. En utilisant deux essais comportementaux différents, des conditions de lumière du jour pour stimuler le comportement d'abri et des expositions à un gradient de champ magnétique artificiel (intensité maximale de 200  $\mu$ T), ils ont constaté que les homards juvéniles ne présentaient aucun changement de comportement par rapport aux homards non exposés dans le champ magnétique ambiant. Aucune différence n'a été notée sur la capacité des homards à trouver un abri ou à modifier leur comportement exploratoire après une semaine d'exposition aux champs magnétiques anthropiques ( $225 \pm 5 \mu$ T) qui sont restés similaires au comportement des témoins. Ils ont conclu que ni les champs magnétiques anthropiques statiques ni ceux qui varient dans le temps à ces intensités n'ont eu d'impact significatif sur le comportement des homards européens juvéniles à la lumière du jour, mais ils ont noté qu'il existe des preuves montrant des changements de magnétosensibilité au cours des différents stades de vie chez les espèces de homards, et que puisque leur modélisation portait sur les juvéniles, leur étude était donc une image incomplète nécessitant une étude plus approfondie.



Scott et al. [538] se sont intéressés aux effets des CEM sur les espèces de crabes bruns comestibles (*Cancer pagurus*), commercialement importantes, et leurs résultats ont été surprenants. Dans des bassins de laboratoire, ils ont simulé les CEM (avec des bobines de Helmholtz, 2,8 mT distribués de manière uniforme, évaluations pendant des périodes de 24 heures) qui seraient émis par des câbles électriques sous-marins maintenant couramment utilisés dans les installations d'énergie renouvelable en mer. Ils ont mesuré les paramètres liés au stress (L-lactate, D-glucose, hémocyanine et taux de respiration) ainsi que les paramètres comportementaux et de réponse (battements d'antennes, niveau d'activité, attraction/évitement, préférence pour les abris et temps passé à se reposer/se déplacer). Ils ont constaté que, bien qu'il n'y ait pas eu d'effet des CEM sur les concentrations d'hémocyanine, le taux de respiration, le niveau d'activité ou le taux de battement des antennes, il y avait des changements significatifs dans les rythmes circadiens naturels du L-lactate et du D-glucose de l'hémolymph, indiquant des altérations des hormones. Les crabes ont également montré une attirance inhabituellement élevée pour les zones d'abri exposées aux CEM (69 %) par rapport aux zones d'abri témoins (9 %) et ont réduit de manière significative leur temps d'errance de 21 %, ce qui a des implications négatives sur la recherche de nourriture, l'accouplement et la santé générale. Ils ont noté que les CEM modifiaient clairement le comportement. Les crabes passaient moins de temps à errer dans le bassin et plus de temps dans un abri en contact direct avec la source de CEM, ce qui indique que le comportement naturel d'errance, de recherche de nourriture ou d'accouplement a été supplanté par l'attraction des CEM. En fait, les crabes choisissaient systématiquement un abri exposé aux CEM plutôt qu'un abri non exposé et étaient toujours attirés par les CEM. Les résultats semblent prédire que dans les zones benthiques entourant les câbles émetteurs de CEM, il y aura une augmentation de l'abondance de *Cancer pagurus* présents. Ils ont noté qu'une telle agrégation potentielle de crabes autour des câbles benthiques et les changements physiologiques subséquents dans les niveaux de L-lactate et de D-glucose causés par l'exposition aux CEM, est une préoccupation concernant les taux d'alimentation, l'accouplement et surtout l'incubation des œufs directement dans les environnements à CEM élevés. Ils ont conclu que des études à long terme sont nécessaires concernant l'exposition chronique aux CEM, en particulier sur le développement des œufs, le succès d'éclosion et la forme des larves, et ont ajouté que les CEM émis dans les environnements marins par les dispositifs d'énergie renouvelable doivent être pris en compte dans le cadre de l'étude des impacts cumulatifs au cours des étapes de planification.

Il est clair que les CEM-ELF peuvent affecter une myriade d'espèces aquatiques à des niveaux d'intensité que l'on retrouve à proximité des câbles sous-marins à des intensités environnementales.

## Poisson : RF-EMF

Comme nous l'avons mentionné, les RFR ne présentent qu'un risque minime pour les poissons, car les milieux aquatiques, bien qu'ils soient hautement

Les milieux conducteurs atténuent également fortement les CEM à des fréquences plus élevées. Cette situation pourrait changer dans un avenir proche, car il existe désormais de nouvelles technologies susceptibles de surmonter ces obstacles [98], introduisant ainsi pour la première fois de nouvelles expositions aux RFR sous l'eau. Les ondes sans fil ELF de plus grande portée sont utilisées dans les sonars anthropiques (sound navigation ranging), principalement pour des applications militaires. Ces ondes se déplacent facilement dans l'eau et on sait qu'elles ont un effet négatif sur les cétacés et d'autres espèces qui dépendent de leur sonar naturel pour communiquer, migrer, se reproduire et trouver de la nourriture. Mais les ondes sonores ne sont pas considérées comme des "CEM" au sens strict du terme ; puisque l'objet de cet article est les CEM, les ondes sonores sont ici tangentes. Mais les dommages acoustiques, notamment sur les cétacés, causés par les applications militaires et commerciales, sont bien documentés et les câbles ELF utilisés pour les communications sous-marines militaires peuvent entraîner des expositions importantes aux CEM à proximité des câbles. Le fait que ce document n'aborde pas en détail les impacts des ondes sonores ne signifie pas qu'elles sont sans effets sérieux.

Cependant, trois études récentes des RFR sur le poisson zèbre sont incluses ici car il est plausible que de telles expositions puissent exister près des environnements aquatiques peu profonds dans certaines circonstances. Nirwane et al. [539] ont étudié les effets des RFR GSM 900 MHz sur les changements neurocomportementaux et le stress oxydatif du cerveau chez le poisson zèbre (*D. rerio*) comme modèle pour les expositions humaines aux téléphones cellulaires. Les expositions ont été appliquées quotidiennement pendant 1 h, 14 jours, avec un DAS de 1,34 W/Kg. Les chercheurs ont constaté que le rayonnement GSM de 900 MHz diminuait considérablement la socialisation et augmentait l'anxiété, comme le démontrent l'augmentation significative du temps passé dans les zones de fond, les comportements de congélation, la durée et la diminution de la distance parcourue, ainsi que la diminution de la vitesse moyenne et du nombre d'entrées dans la moitié supérieure du réservoir. Le poisson zèbre exposé a passé moins de temps dans le bras nouveau d'un labyrinthe en Y, ce qui indique une altération significative de l'apprentissage par rapport au groupe témoin. L'exposition a également réduit les activités de la superoxyde dismutase (SOD) et de la catalase (CAT), tandis que des niveaux accrus de glutathion réduit (GSH) et de peroxydation lipidique (LPO) ont été observés, indiquant une défense antioxydante compromise. Le traitement post-exposition avec de la mélatonine dans l'eau a cependant inversé de manière significative les changements neurocomportementaux et oxydatifs induits.

Piccinetti et al. [540] ont étudié les effets *in vivo* sur le développement embryonnaire du poisson zèbre à des intensités thermiques et non thermiques de 100 MHz au moyen d'un protocole multidisciplinaire. Les résultats ont montré que la radiofréquence de 100 MHz affectait le développement embryonnaire de 24 à 72 heures après la fécondation dans toutes les voies analysées. Plus particulièrement à 48 heures après la fécondation, on a observé une réduction de la croissance, une augmentation de la transcription des gènes du stress oxydatif, le début des processus apoptotiques/autophagiques et une modification du métabolisme du cholestérol. CEM

a affecté le stress en déclenchant des mécanismes de détoxification. 72 heures après la fécondation, les poissons se sont partiellement rétablis et ont atteint un temps d'éclosion comparable à celui des témoins. Les chercheurs ont conclu que les CEM-RFR présentaient sans équivoque des effets *in vivo* à des niveaux non thermiques.

Dasgupta et al. [541] ont utilisé des modèles de poisson zèbre embryonnaire à un DAS de 3,5 GHz  $\approx$  8,27 W/kg et ont exposé le poisson zèbre en développement de 6 à 48 h après la fécondation, puis ont mesuré les paramètres morphologiques et comportementaux à 120 h après la fécondation. Les résultats n'ont révélé aucun impact significatif sur la mortalité, la morphologie ou la réponse photomotrice mais ont noté une inhibition modeste de la réponse de sursaut suggérant certains niveaux de perturbations sensorimotrices. Ils ont conclu que les expositions à de faibles niveaux de GHz sont probablement bénignes mais entraînent néanmoins des effets sensorimoteurs subtils. De tels effets peuvent affecter la survie des poissons de diverses manières, notamment par l'inhibition du temps de réponse aux prédateurs, entre autres. Cette étude a été réalisée en tenant compte des bioeffets potentiels sur l'homme aux fréquences utilisées dans les technologies 4 et 5G. Elle a également été menée à des intensités supérieures à celles visées par le présent document.

Si les nouvelles technologies permettent de surmonter les limites de conductivité/atténuation des environnements aquatiques et d'introduire davantage de RFR dans les espèces aquatiques, des études comme celles citées ci-dessus pourraient bientôt avoir une plus grande pertinence environnementale, même à des intensités plus élevées que celles explorées ici.

## Tortues

La migration des tortues de mer océaniques rejoint celle d'autres espèces migratrices de longue distance renommées, comme le saumon et le papillon monarque, qui parcourent des milliers de kilomètres et traversent de multiples environnements complexes tout au long de leur cycle de vie. On sait depuis longtemps que les tortues de mer utilisent les champs géomagnétiques pour s'orienter [542, 543]. Il a également été démontré que les espèces d'eau douce (par exemple, *Chelydra serpentina*) ont un sens magnétique capable de perturbation artificielle [92], tout comme les tortues-boîtes terrestres (*Terrapene carolina* ; [544]).

Les tortues de mer ont un comportement de retour au berceau, c'est-à-dire qu'elles sont capables de revenir sur de grandes distances à l'endroit exact où elles sont nées pour se reproduire [89] et, en raison des perturbations anthropiques des sites de nidification le long des plages, ce comportement de retour au berceau les met aujourd'hui en danger. Le mécanisme sous-jacent est encore imparfaitement compris, mais il implique une "empreinte" de l'intensité et de l'angle d'inclinaison du champ géomagnétique au lieu de naissance [545]. Cette information est ensuite utilisée à l'âge adulte pour retourner sur leur lieu d'origine.

Les tortues de mer sont de loin les modèles les plus étudiés pour la magnétoréception des tortues, notamment par le laboratoire Lohmann de l'Université de Caroline du Nord, aux États-Unis [323, 546-558].

Irwin et Lohmann [559] ont discuté des avantages et des inconvénients de diverses approches de recherche utilisées pour étudier le comportement d'orientation magnétique des tortues. Celles-ci comprennent l'utilisation de grands systèmes de bobines magnétiques en laboratoire pour générer des champs relativement uniformes sur de grandes surfaces [560], ce qui permet de modifier artificiellement le champ magnétique et de le contrôler soigneusement pour déterminer les changements d'orientation comportementale. Cette approche n'est cependant pas adaptée à la manipulation des expositions autour des animaux dans des environnements naturels ou à l'étude des magnétorécepteurs corporels localisés, qui chez les tortues restent un mystère. Une - autre approche consiste à attacher un petit aimant ou une bobine électromagnétique à un animal pour perturber le comportement d'orientation magnétique - une approche beaucoup plus facile chez les éclosions que chez les espèces juvéniles ou matures nageant librement. Ils notent que si le champ imposé par un aimant ou une bobine est suffisamment fort pour interférer avec le champ terrestre, des changements d'orientation comportementale [116, 544, 561] et l'exécution d'une réponse conditionnée [367, 562] peuvent être observés. Cette dernière approche a été utilisée dans des études sur le terrain afin de bloquer l'accès aux informations magnétiques normales [544, 561, 563-565] et de localiser les magnétorécepteurs en perturbant le champ autour d'une partie spécifique du corps d'une tortue [562]. L'inconvénient de cette technique est que les champs changent rapidement avec la distance de la source, ce qui rend difficile la quantification des champs que l'animal subit réellement.

La plupart des études sur les tortues de mer ont fait appel à de grands systèmes de bobines magnétiques, mais Irwin et Lohmann [559] ont fixé de petits aimants d'une force supérieure à celle des champs terrestres à deux groupes de jeunes tortues caouannes (*Caretta caretta* L.) dans des conditions de laboratoire où l'on sait que les tortues s'orientent magnétiquement [473, 546, 548-550]. Ils ont découvert que le comportement d'orientation magnétique des tortues en éclosion peut être perturbé par de petits aimants fixés à la carapace qui créent ensuite des expositions sur tout le corps. Ils ont conclu qu'une telle approche peut être utilisée pour déterminer finalement les magnétorécepteurs locaux en variant l'emplacement de l'aimant et en utilisant des aimants plus petits et plus faibles qui modifient le champ uniquement autour de sites cibles anatomiques spécifiques.

Chez les tortues caouannes, il existe des preuves de l'existence d'une boussole d'inclinaison [473, 550] qui est fonctionnellement similaire à la boussole magnétique des oiseaux signalée chez les merles européens [566, 567]. Lohmann et Lohmann [550] ont étudié une boussole d'inclinaison chez les tortues de mer et ont découvert qu'il s'agissait d'un mécanisme possible pour déterminer la latitude. Ils ont également étudié la détection de l'intensité magnétique [551], les champs magnétiques régionaux naturels utilisés comme marqueurs de navigation pour les tortues de mer [557] et les - capacités de cartographie des tortues de mer à l'éclosion [545]. Les tortues de mer sont également connues pour avoir de la magnétite dans leur tête [104, 568]. Des études menées sur de jeunes tortues de mer ont

Il a été démontré qu'une part importante de leurs capacités de navigation fait appel à la magnétoréception après l'éclosion [569] - l'empreinte du champ magnétique terrestre étant l'un des nombreux indices utilisés par les jeunes lors de leur première migration vers le large [546, 554]. Les champs magnétiques qui sont uniques à différentes zones de la mer servent finalement de marqueurs de navigation pour guider la direction de la nage vers les routes migratoires importantes. Au fur et à mesure de leur maturation, les juvéniles forment des cartes magnétiques topographiques de leur lieu de vie qui les orientent vers des régions spécifiques. Mais on ignore encore si les tortues matures, et plus particulièrement les femelles en période de nidification, utilisent de tels mécanismes pour se repérer en haute mer, car ce magnéto-sens peut changer avec le temps.

Les études sur le terrain sont notoirement difficiles avec de grandes espèces en mer, mais Papi et al. [564] ont étudié des tortues vertes matures (*Chelonia mydas*) pendant leur migration post-nuptiale sur plus de 2 000 km, depuis leur lieu de nidification sur l'île de l'Ascension, au milieu de l'océan Atlantique, jusqu'à leur lieu d'alimentation au Brésil. Ils cherchaient à savoir si les tortues femelles matures utilisent une boussole d'inclinaison et les champs géomagnétiques pour s'orienter, ou par déduction (une fois que ce sens est perturbé) par d'autres moyens non encore déterminés. Papi et al. [564] ont fixé des aimants à courant continu très puissants - bien plus puissants que les champs terrestres - pour perturber et surmonter la magnétoréception naturelle, et ainsi déterminer s'ils pouvaient encore se diriger vers l'île de l'Ascension. Les témoins avaient des barres de laiton non magnétiques et certains avaient des émetteurs collés sur la tête. Tous étaient équipés de dispositifs de suivi qui communiquaient avec des satellites, créant ainsi de fortes expositions aux RFR statiques et pulsées multifréquences. Sept tortues étaient équipées chacune de six puissants aimants statiques qui produisaient des champs artificiels variables entourant toute la tortue, rendant impossible le recours à une carte géomagnétique. Les parcours de l'étude étaient très similaires à ceux de huit tortues sans aimants qui avaient été suivies par satellite pendant la même période l'année précédente. Aucune différence entre les tortues testées exposées au magnétisme et les tortues non traitées n'a été constatée en ce qui concerne les performances de navigation et la direction générale du parcours. Les chercheurs ont conclu que les repères magnétiques n'étaient pas essentiels aux tortues lors du voyage de retour et ont émis l'hypothèse que d'autres facteurs, tels que l'odeur ou la direction du courant des vagues, pourraient entrer en jeu.

Luschi et al. [563], comme Papi et al. [564], ont également étudié le rôle de la magnétoréception et du retour au bercail chez les tortues de mer matures, mais ils ont utilisé une conception différente et obtenu des résultats très différents. Dans le cadre d'une vaste étude sur le terrain dans le canal du Mozambique, 20 tortues vertes matures pré-nidification ont également été équipées d'aimants puissants et de dispositifs de suivi par satellite. Les tortues ont été rassemblées sur leur plage de nidification sur l'île de Mayotte avant la ponte des œufs et transportées vers quatre sites d'étude.

des sites de haute mer situés à 62-75 mi (100-120 km, respectivement). Il y a eu cinq lâchers de quatre tortues chacun avec trois traitements différents : les tortues "perturbées" magnétiquement uniquement pendant le transport et dont les aimants ont été retirés avant le lâcher ; les tortues traitées uniquement pendant le voyage de retour avec des aimants fixés juste avant le lâcher ; et les témoins avec des disques en laiton non magnétiques fixés à leur tête. Des aimants mobiles très puissants ont été fixés sur la tête des tortues traitées afin d'induire des champs magnétiques variables autour d'elles, soit sur la plage de nidification au début du voyage de relocalisation, soit sur le bateau juste avant la libération pour le voyage de retour. Tous les groupes avaient des émetteurs satellites fixés à leur carapace, créant ainsi, selon les auteurs de cet article, une exposition supplémentaire qui n'a pas été considérée comme une variable. Les chercheurs ont également inclus les courants océaniques dans leurs évaluations, estimés à l'aide de mesures de télédétection océanographiques. Toutes les tortues, à l'exception d'une seule, sont finalement retournées à Mayotte pour achever leur ponte différée. Mais les tortues traitées, que ce soit pendant le transport ou le retour au bercail, ont mis beaucoup plus de temps à atteindre leur destination que les témoins - un résultat surprenant. La plupart des itinéraires de retour à la maison présentaient de très longs circuits courbes et en boucle avant d'atteindre leur cible. Les chemins des témoins étaient directs. Les deux groupes de tortues traitées étaient clairement affaiblis par l'exposition à la MF, ce qui indique qu'un temps de récupération important est nécessaire entre l'exposition et la correction du comportement positionnel. Les chercheurs ont émis l'hypothèse de l'existence d'un rôle de navigation pour les informations géomagnétiques recueillies par les tortues du groupe de transport passif, ainsi que la possibilité que la perturbation magnétique pendant le transport ait pu persister pendant un certain temps après le retrait des aimants dans ce groupe, rendant ainsi les deux groupes traités fonctionnellement équivalents pendant leurs voyages de retour. Ils ont également noté que les expositions peuvent avoir physiquement altéré les particules de magnétite, créant ainsi un effet plus durable, mais ils ont déclaré que puisque les effets secondaires durables de l'application d'aimants n'ont pas été décrits, cette théorie ne peut être ni déduite ni rejetée.

Lohmann [323] a examiné les deux études susmentionnées et a ajouté qu'en plus des deux hypothèses causales de Luschi et al. [563] concernant leurs découvertes inattendues de routes migratoires détournées pour les tortues, une autre explication serait le positionnement des émetteurs de satellite dans l'étude de Papi et al. [564] sur la tête des tortues par rapport à la carapace des modèles de Luschi. Il a ajouté que, puisque les émetteurs de satellite produisent également des champs magnétiques capables de perturber la magnétoréception, et puisque le groupe Papi a également fixé des émetteurs de satellite sur la tête de plusieurs tortues de contrôle, la réanalyse de l'étude de Papi en utilisant uniquement des tortues avec des émetteurs de satellite placés sur la carapace.

comme l'étude de Luschi a pu montrer des preuves compatibles avec l'hypothèse selon laquelle les tortues adultes exploitent des repères magnétiques pour la navigation. Il a conclu que les tortues de mer, comme tous les autres animaux étudiés à ce jour, exploitent probablement de multiples repères pour la navigation, car même si une perturbation magnétique artificielle entraîne une baisse des performances, les aimants utilisés dans les deux études n'ont pas empêché les tortues d'atteindre finalement leurs plages cibles. Cela implique que les tortues peuvent également s'appuyer sur d'autres sources d'information [570, 571] telles que les boussoles célestes, la direction des vagues [572] ou les signaux olfactifs, comme d'autres espèces - une découverte importante.

L'ensemble des études mentionnées ci-dessus montre que les espèces de tortues marines sont très sensibles aux champs terrestres et sont capables de s'adapter à de subtiles perturbations anthropiques.

## Tortues : RF-EMF

Les tortues peuvent également être sensibles aux radiofréquences, en particulier pendant l'incubation sur la terre ferme et/ou les premiers stades de l'éclosion, si elles sont exposées à des RF-EMF anthropogènes qui pourraient fausser la mémoire d'empreinte qu'elles utilisent plus tard pour retrouver les plages de leur site de naissance. Par exemple, si un radar ou une station de base de communications est installé sur ou près de la plage d'un site de nidification, cela pourrait-il affecter le processus initial d'"empreinte" ? Peut-être augmenterait-elle l'imprégnation et faciliterait-elle le retour ? Ou, à l'inverse, submerger le processus subtil d'imprégnation au départ et rendre le retour impossible ? Dans ce dernier cas, cette technologie pourrait conduire à l'extinction des espèces sensibles puisqu'elle interrompt le processus de reproduction. À tout le moins, chez les espèces sensibles, une désorientation pourrait en résulter, comme indiqué plus haut.

Pour caractériser les mécanismes sous-jacents de la boussole chez les tortues, Landler et al. [92] ont étudié la capacité des jeunes tortues serpentes d'eau douce (*Chelydra serpentina*) à s'aligner spontanément sur les champs géomagnétiques de la Terre. En utilisant l'exposition à des RFR de faible niveau proches de la fréquence de Larmor (1,2 MHz) qui est liée à la formation de paires de radicaux libres, les tortues ont d'abord été introduites dans l'environnement de test sans la présence de RFR ("RF off, RF off") et elles se sont avérées s'aligner systématiquement vers le nord magnétique. Mais lorsque les conditions de test magnétique suivantes étaient initialement exemptes de RFR, puis incluaient un signal introduit ("RF off, RF on"), elles étaient désorientées. Ainsi, l'introduction d'un champ RFR pourrait affecter la réponse d'alignement des tortues au champ magnétique naturel. Le champ RFR utilisé n'était que de 30-52 nT (1,43 MHz). Dans le scénario inverse suivant, lorsque les tortues ont été initialement introduites dans l'environnement de test avec un champ RFR présent, puis retiré ("RF on, RF off"), elles ont été désorientées lors du test.

sans RFR. Et avec le RFR activé dans les deux cas ("RF on, RF on"), elles se sont alignées dans la direction opposée, vers le sud magnétique. Il est clair que les tortues d'essai ont été affectées par les expositions. Les chercheurs ont conclu que la sensibilité de la réponse spontanée d'alignement magnétique des tortues au RFR était cohérente avec un mécanisme de paire radicale (voir "Mécanismes" ci-dessus). En outre, ils ont conclu que l'effet de la RFR semblait résulter d'un changement dans le schéma de l'entrée magnétique, plutôt que de l'élimination totale de l'entrée magnétique. Leurs résultats indiquent que les tortues, lorsqu'elles sont exposées pour la première fois à un nouvel environnement, forment une association durable entre le modèle d'entrée magnétique et leur environnement, et qu'elles peuvent former une plus grande capacité interne de cartographie de type GPS lorsqu'elles rencontrent un nouveau cadre de référence magnétique basé sur des signaux magnétiques naturels, provenant de plusieurs sites et localités.

Ils ont également montré que le RFR à ou près de la fréquence de Larmor (1,2-1,43 MHz) avait la capacité de perturber l'orientation naturelle de la tortue serpentine, d'établir sa propre orientation nouvelle, et d'inverser complètement une orientation naturelle, ce qui nous ramène aux questions complexes posées ci-dessus concernant l'empreinte et la perturbation possible de la reproduction. Bien que l'étude de Landler et al. [92] ait été menée sur une espèce d'eau douce qui ne se reproduit pas, les tortues serpentes ont une longue durée de vie et un faible taux de reproduction. Même de petites perturbations de cette espèce provenant de sources anthropogéniques pourraient avoir un effet sur la population très important au fil du temps. Si cette espèce d'eau douce est une indication des effets potentiels de la RFR, les chercheurs doivent approfondir l'étude de la RFR chez les espèces de tortues qui migrent sur de longues distances et qui prennent leurs empreintes sur terre. Nous ne connaissons tout simplement pas toute la gamme des effets possibles des fréquences - avec lesquelles les espèces de tortues entrent en contact à des moments vulnérables de leur développement et de leur vie.

## Nématodes et petits biotes

Des rapports font état d'une sensibilité aux CEM chez des taxons de moindre importance. On sait que les CEM affectent de nombreuses autres espèces, notamment : les nématodes (vers terrestres et aquatiques), les mollusques (escargots), les amibes (organismes unicellulaires), les moisissures, les algues, les protozoaires, les levures, les champignons, les bactéries et les virus (dans une mesure limitée) - avec des ramifications pour la création de souches de bactéries résistantes aux antibiotiques. Vous trouverez ci-dessous quelques exemples représentatifs des effets observés.

### Nématodes

Les espèces communes de nématodes vivant dans le sol, comme *C. elegans*, constituent un modèle utile d'organisme entier pour les études génétiques et les recherches sur l'environnement.



les recherches sur les organismes multicellulaires. Ils sont couramment utilisés comme modèle de recherche pour étudier des processus biologiques clés, notamment le vieillissement, le fonctionnement du système neuronal et la dégénérescence musculaire, pour n'en citer que quelques-uns. Les caractéristiques génétiques et phénotypiques de cette espèce sont extrêmement bien documentées et elles peuvent donc être utilisées comme des approximations importantes pour les analyses quantitatives [573]. Les nématodes ont une courte durée de vie, sont hermaphrodites et démontrent rapidement leurs effets. En tant que modèles de laboratoire, ils sont principalement utilisés pour obtenir des informations pouvant être appliquées à l'homme, mais nous pouvons également glaner des informations importantes et extrapoler aux expositions environnementales dans certaines circonstances. Des populations saines de vers du sol sont essentielles à la santé des sols, dont nous dépendons tous.

Hung et al. [574] ont étudié les effets des champs magnétiques statiques (SMF) sur la durée de vie et le vieillissement prématuré de *C. elegans*. Les nématodes ont été cultivés dans des SMF variant de 0 à 200 mT. Ils ont constaté que les SMF accélèrent le développement et réduisent la durée de vie des nématodes de type sauvage. Ils ont également constaté des augmentations des protéines de choc thermique qui étaient sélectives et dépendantes de la dose.

Vidal-Gadea et al. [66] ont étudié l'orientation magnétique chez *C. elegans* afin d'identifier les neurones magnétosensoriels et ont découvert qu'ils s'orientent vers le champ géomagnétique de la Terre pendant les migrations verticales de fouissement. Les vers bien nourris migrent vers le haut, tandis que les vers affamés migrent vers le bas. On a constaté que les populations isolées dans le monde entier migraient selon un angle par rapport au vecteur magnétique qui se traduirait verticalement vers leur sol natal, les vers de l'hémisphère nord et de l'hémisphère sud affichant des préférences migratoires opposées en conjonction avec les champs géomagnétiques naturels. Ils ont également découvert que l'orientation magnétique et les migrations verticales nécessitaient le canal ionique TAX-4, dépendant des nucléotides cycliques, dans la paire de neurones sensoriels AFD, tandis que l'imagerie calcique a montré que ces neurones répondent aux champs magnétiques même sans entrée synaptique. Ils ont émis l'hypothèse que les *C. elegans* ont pu adapter l'orientation magnétique pour simplifier leur migration verticale en réduisant la tâche d'orientation de trois à une dimension.

Les *C. elegans* ont également démontré leur sensibilité aux champs électriques par le biais de l'électrotaxie (également connue sous le nom de galvanotaxie), qui est le mouvement dirigé de cellules ou d'organismes vivants guidés par un champ ou un courant électrique, souvent observé dans la cicatrisation des plaies. Sukul et Croll [575] ont découvert que des nématodes exposés à un courant électrique (0,02-0,04 mA, différences de potentiel de 2-6 V) montraient une orientation directionnelle à médiation sensorielle vers le courant au début, mais à 2 mm de l'électrode, les vers individuels ont commencé à inverser leur comportement qui est ensuite resté uniforme en se déplaçant dans une direction constante parallèle à l'exposition. Quelques-uns qui n'ont pas inversé leur comportement sont morts (probablement à cause de l'exposition au courant).

électrocution) à 6 V ou 0,4 mA. Ils ont conclu que les *C. elegans* adultes se déplacent de manière directionnelle à des combinaisons sélectionnées de différences de tension et de potentiel et que l'électrophorèse pouvait être éliminée.

Gabel et al. [576] ont également étudié les effets du champ électrique sur la directionnalité chez *C. elegans* dans le but de mieux comprendre comment le système nerveux transforme les entrées sensorielles en sorties motrices. Ils ont utilisé des champs électriques variables dans le temps modulés à 100 Hz sur une surface de gélose avec une direction définie et une amplitude allant jusqu'à 25 V/cm. Ils ont constaté que les nématodes rampent délibérément vers le pôle négatif d'un champ électrique à des angles spécifiques par rapport à la direction du champ électrique dans des mouvements avant persistants, l'angle préféré étant proportionnel à l'intensité du champ. Ils ont également découvert que les nématodes s'orientent en réponse à des champs électriques variant dans le temps en effectuant des virages et des inversions soudaines (manœuvres de réorientation normales). Ils ont également découvert que certaines mutations ou l'ablation au laser qui perturbent la structure et la fonction des neurones sensoriels amphidiens perturbent également leur comportement électrosensoriel et que des neurones spécifiques sont sensibles à la direction et à la force des champs électriques via la dynamique calcique intracellulaire parmi les neurones sensoriels amphidiens. Cette étude a montré que le comportement électrosensoriel est crucial pour la navigation du système nerveux de *C. elegans* et qu'il peut être perturbé à certaines intensités présentes dans l'environnement.

Maniere et al. [573] ont également constaté que *C. elegans* était sensible aux champs électriques et que lorsqu'ils étaient soumis à un champ électrique modéré, les vers se déplaçaient régulièrement le long de trajectoires droites. Ils ont émis l'hypothèse que l'imposition de champs électriques dans le cadre de la recherche était une méthode peu coûteuse pour mesurer la vitesse de reptation des vers et une méthode pour les amener à s'auto-classer rapidement en tirant parti de leurs compétences électrotactiques.

Une étude précoce de la RFR sur *C. elegans* réalisée par Daniells et al [577] a montré que cette espèce était un modèle utile pour étudier les réponses au stress. Dans la majorité des études, ils ont utilisé 750 MHz avec une puissance nominale de 27 dBm ; les contrôles étaient blindés et toutes les températures étaient strictement contrôlées. Les réponses au stress ont été mesurées en termes d'induction de la bêta-galactosidase (rapporteur) au-dessus des niveaux de contrôle. La réponse au rayonnement continu des micro-ondes a montré des différences significatives par rapport à 25 degrés C chez les contrôles à 2 et 16 h, mais pas à 4 ou 8 h. En utilisant un réseau de plaques multipuits 5 × 5 exposées pendant 2 h, les 25 échantillons micro-ondés ont montré des réponses hautement significatives par rapport à un réseau de contrôle similaire. Les expériences dans lesquelles les paramètres de fréquence et/ou de puissance ont été modifiés ont suggéré une réponse plus importante à 21 qu'à 27 dBm, à la fois à 750 et 300 MHz, indiquant un effet non linéaire, bien que des réponses extrêmement variables aient été observées à 24 dBm et 750 MHz. Plus bas



Les niveaux de puissance ont eu tendance à induire des réponses plus importantes, à l'inverse des effets de simple chauffage. Ils ont conclu que les micro-ondes causent un stress mesurable aux nématodes transgéniques en augmentant les niveaux de dommages aux protéines dans les cellules à des niveaux non thermiques.

Tkalec et al. [578] ont constaté des effets oxydatifs et génotoxiques chez des vers de terre (*Eisenia fetida*) exposés *in vivo* à des RFR à 900 MHz, à 10, 23, 41 et 120 V m(-1) pendant 2 heures, à l'aide d'une cellule Gigahertz Transversal Electromagnetic (GTEM). Toutes les expositions ont induit des effets significatifs, la modulation augmentant ces effets. Leurs résultats ont également indiqué l'induction d'une réponse au stress antioxydant avec une augmentation de l'activité de la catalase et de la glutathion réductase, indiquant des dommages oxydatifs des lipides et des protéines. Les réponses antioxydantes et les dommages aux lipides, aux protéines et à l'ADN différaient selon le niveau de CEM, la modulation et la durée d'exposition.

Les espèces de vers aquatiques et semi-aquatiques sont également sensibles aux CEM. Jakubowska et al. [579] ont étudié les effets comportementaux et bioénergétiques des CEM à des champs de 50 Hz, 1 mT (comparables aux expositions à proximité de câbles sous-marins) chez des vers polychètes (*Hediste diversicolor*) qui vivent et creusent dans le sable et la boue des plages et des estuaires dans les zones intertidales de l'Atlantique Nord. Bien qu'ils n'aient trouvé aucun comportement d'attraction ou d'évitement des CEM, l'activité de fouissement était accrue par l'exposition aux CEM, ce qui indique un effet stimulant. La consommation de nourriture et les taux de respiration n'ont pas été affectés, mais le taux d'excrétion d'ammoniac était significativement réduit chez les animaux exposés aux CEM par rapport aux conditions de contrôle aux seuls champs géomagnétiques. Les mécanismes sont restés obscurs. Les auteurs ont déclaré qu'il s'agissait de la première étude à démontrer les effets de valeurs de CEM réalistes sur le plan environnemental sur le comportement et la physiologie des invertébrés marins.

Van Huizen et al [67] ont étudié les effets des champs magnétiques faibles (WMF) sur les cellules souches et la régénération dans un modèle *in vivo* utilisant des vers plats nageant librement (*Planaria* spp) qui sont capables de régénérer tous les tissus, y compris le système nerveux central et le cerveau. Cette capacité de régénération est due au fait qu'environ 25 % de toutes leurs cellules sont des cellules souches adultes (CSA). La blessure est suivie d'une réponse proliférative systémique des ASC qui atteint initialement un pic à ~ 4 h, puis d'une migration des ASC vers le site de la blessure au cours des 72 premières heures, lorsqu'un second pic mitotique se produit. Comme la régénération de la salamandre (voir "Amphibiens" ci-dessus), cette activité produit un blastema - un groupe de cellules ASC en croissance qui forme le noyau des nouveaux tissus. La régénération complète des tissus ou des organes endommagés de la planaire se produit par la croissance de nouveaux tissus et le remodelage apoptotique/la desquamation des anciens tissus en 2 à 3 semaines. Après une amputation au-dessus et en dessous du pharynx (sonde d'alimentation), ils ont exposé les sites d'amputation à 200  $\mu$ T de WMF. Trois jours après l'amputation, ils ont constaté que l'exposition à 200  $\mu$ T entraînait une réduction significative de l'activité de l'organisme.

la taille des blastèmes par rapport aux témoins non traités et à ceux exposés à un champ de 45  $\mu$ T, ce qui indique un effet d'interférence du champ magnétique sur la régénération. Ils ont également constaté que l'exposition à 200  $\mu$ T était nécessaire dès le début et devait être maintenue pendant toute la formation du blastème pour affecter la croissance, et que des expositions plus courtes, sur une seule journée, n'avaient pas d'effet sur la taille des blastèmes. En outre, ils ont constaté que les champs magnétiques faibles produisaient des effets dépendants de l'intensité du champ. Ils ont notamment observé des réductions significatives de la taille des blastèmes entre 100 et 400  $\mu$ T, mais à l'inverse, une augmentation significative de l'excroissance s'est produite à 500  $\mu$ T. Ils ont émis l'hypothèse que les effets des champs magnétiques anthropiques étaient dus à une modification des niveaux d'espèces réactives de l'oxygène (ERO), qui atteignent leur maximum au niveau de la plaie environ 1 heure après l'amputation et sont nécessaires à la formation du blastème planaire. Cette étude montre que de faibles champs magnétiques anthropiques peuvent affecter la prolifération des cellules souches et leur différenciation ultérieure dans une espèce régénératrice, et que l'intensité du champ peut augmenter ou diminuer la formation de nouveaux tissus *in vivo*. Il s'agit d'une découverte importante pour les espèces régénératrices de toutes sortes, qui pourrait également affecter les espèces non régénératrices. Les anguilles lamproies de mer (*Petromyzon marinus*), une espèce de poisson, sont également connues pour se régénérer même après de multiples amputations [580].

### **Mollusques, amibes, moisissures, algues, protozoaires.**

Les mollusques (les versions marines sont appelées chitons) sont connus depuis longtemps pour fabriquer de la magnétite dans leurs dents et pour utiliser des champs plus faibles que le champ géomagnétique pour le mouvement cinétique et la direction [52, 117, 340, 524]. Lowenstam [118] a été le premier à découvrir que la magnétite était le principal minéral présent dans les dents des chitons marins, dont on pensait qu'il donnait aux dents leur dureté naturelle. Mais Ratner [62] a découvert que les chitons utilisent la magnétite comme boussole magnétique lorsqu'il a constaté qu'un certain nombre d'espèces de chitons ont des radulae (lignes) qui sont recouvertes de denticules ferro-magnétiques (magnétite). Les radulae d'*Acomapleura gran-ulata* et de *Chiton squamosis* se sont également révélées ferromagnétiques, mais pas les coquilles. Les spécimens vivants d'un chiton (*Chaetopleura apiculata*) qui ont également des radulae ferro-magnétiques se sont avérés tourner davantage et se déplacer plus loin dans un champ magnétique plus faible que dans le champ géomagnétique plus fort de la Terre, indiquant une directionnalité non linéaire. Ratner a conclu que les chitons sont sensibles aux champs magnétiques et démontrent des mouvements cinétiques à l'intérieur de ceux-ci.

Certains escargots sont sensibles aux CEM. Nittby et al. [581] ont observé des effets analgésiques chez les escargots terrestres (*Helix pomatia*) causés par les RFR GSM-1900 lorsque les escargots ont perdu leur sensibilité à la douleur lors d'un test de plaque chauffante après une exposition nonthermale aux RFR.

Les organismes plus petits ont également montré depuis longtemps les effets des CEM. Goodman et al. [582] ont constaté des retards dans la mitose des cellules.

division dans une moisissure gluante (*Physarum polycephalum*) avec des expositions aux CEM-ELF. Friend et al. [583] ont trouvé une - élongation perpendiculaire et parallèle de l'amibe géante *Chaos chaos* (*Chaos carolinensis*) dans des champs électriques alternatifs sur une large gamme de fréquences (1 Hz-10 MHz) avec des changements caractéristiques en fonction de la fréquence. Marron et al. [584] ont constaté des effets sur les niveaux d'ATP et d'oxygène dans une autre espèce de moisissure visqueuse (*P. polycephalum*) après des expositions à des champs électriques et magnétiques sinusoïdaux de 60 Hz. Luchien et al. [585] ont trouvé un effet stimulant sur la productivité de la biomasse d'algues (*Chlorella sorokiniana*) pour un champ magnétique de 50 Hz mais un effet inhibiteur à 15 Hz chez ces microalgues.

Les protozoaires, dont on pense qu'ils sont plus proches des animaux que des microbes, sont également sensibles aux CEM. Les protozoaires, en tant qu'eucaryotes unicellulaires, sont généralement plus grands que les bactéries, qui sont classées parmi les procaryotes. Les deux organismes sont structurellement différents : les cellules bactériennes n'ont pas de noyau, tandis que les protozoaires contiennent des organelles comme les mitochondries. Les bactéries absorbent généralement les nutriments à travers leur paroi cellulaire, tandis que les protozoaires se nourrissent de bactéries, de tissus et de matières organiques et peuvent être à la fois infectieux et parasitaires. Ces protozoaires comprennent des parasites humains qui provoquent des maladies telles que la dysenterie amibienne, la malaria, la giardiase, la leishmaniose, la trichomoniasis, la toxoplasmose et d'autres. Les espèces animales sont également touchées par les protozoaires qui peuvent les affaiblir gravement et raccourcir leur durée de vie.

Rodriguez-de la Fuente et al. [586] ont testé les CEM-ELF (60 Hz, 2,0 mT pendant 72 h) sur deux protozoaires infectieux, *Trichomonas vaginalis* et *Giardia lamblia*, et ont constaté des altérations de la croissance chez les deux espèces qu'ils ont attribuées à des modifications de la progression du cycle cellulaire et du stress cellulaire. Cam-maerts et al. [587] ont utilisé des RFR (GSM 900-MHz à 2 W par rapport au contrôle) sur des protozoaires (*Paramecium caudatum*) et ont constaté que les individus se déplaçaient plus lentement et sinueusement que d'habitude et que leur physiologie était affectée. Les paramecies sont devenues plus larges, les vésicules pulsées ont eu du mal à expulser le contenu vers l'extérieur de leurs cellules, les cils se sont déplacés moins efficacement et les trichocystes sont devenus plus visibles - autant d'effets qui indiquent un mauvais fonctionnement ou des dommages à la membrane cellulaire. Ils ont émis l'hypothèse que le premier impact de la RFR pourrait être sur les membranes cellulaires.

Il est clair que des effets multiples à tous les niveaux ont été documentés chez les taxons inférieurs à partir d'expositions multifréquences que l'on trouve maintenant dans l'environnement.

## Levures et champignons

La levure est souvent utilisée dans les modèles de laboratoire, surtout depuis 1996, date à laquelle une séquence génomique complète de *Saccharomyces cerevisiae* a été créée. En fait, elle est maintenant considérée comme un

"Il a également contribué à la création de nouveaux champs d'investigation tels que la "génomique fonctionnelle" et la "biologie des systèmes", qui se concentrent sur les interactions entre les gènes et les protéines pour révéler les propriétés spécifiques des cellules vivantes et des organismes entiers.

La recherche sur les CEM est riche en études utilisant des modèles de levure, trop nombreuses pour être analysées en détail ici. Cependant, nous incluons un petit échantillon de recherches récentes sur les champs électromagnétiques ayant une signification potentielle pour les expositions environnementales.

Lin et al. [589] ont étudié l'absorption du glucose et la réponse transcriptionnelle des gènes aux CEM-ELF (50 Hz) et aux RFR (2,0 GHz) sur plusieurs souches de levure bourgeonnante (*S. cerevisiae*). Les résultats ont déterminé que l'exposition aux CEM-ELF et aux RFR peut réguler à la hausse l'expression des gènes impliqués dans le transport du glucose et le cycle de l'acide tricarboxylique (TCA), mais pas dans les voies de la glycolyse, montrant ainsi que de telles expositions peuvent affecter le métabolisme énergétique qui est étroitement lié à la réponse cellulaire au stress environnemental. Le métabolisme du glucose est fondamental pour les besoins en énergie de toutes les cellules vivantes, et il est lié à de nombreux états pathologiques, dont la plupart des cancers.

Dans une étude sur les champs magnétiques réalisée par Mercado-Saenz et al. [590], un vieillissement prématuré et une instabilité cellulaire ont été constatés chez des levures (*S. cerevisiae*) exposées à des champs magnétiques sinusoïdaux de faible fréquence et de faible intensité (exposition continue SMF à 2,45 mT, 50 Hz) et à des champs magnétiques pulsés (PMF 1,5 mT, 25 Hz, 8 h/jour). Le vieillissement chronologique a été évalué pendant 40 jours et la stabilité cellulaire a été évaluée par un comptage des mutations spontanées et l'indice de compétence respiratoire (IRC). Ils ont constaté que l'exposition à la PMF entraînait un vieillissement accéléré, contrairement à la SMF, et qu'une diminution de la mutation mitochondriale au cours du vieillissement était également observée avec la PMF. Aucune altération de la compétence respiratoire n'a été observée pour les expositions au SMF ou au PMF. Ils ont conclu que l'exposition au PMF accélérerait le vieillissement chronologique et modifiait la fréquence spontanée de mutation mitochondriale au cours du processus de vieillissement, alors que le SMF utilisé n'avait aucun effet, montrant ainsi des effets anormaux sur l'activité cellulaire à partir d'expositions pulsées.

Les cellules de levure étant connues pour être sensibles aux - champs magnétiques, certaines applications industrielles et thérapeutiques pour la santé humaine ont été étudiées. Ces - recherches servent à éclairer ce que nous savons des réactions des levures et des champignons aux CEM en général, ainsi que des utilisations spécifiques. En ce qui concerne les applications industrielles, Wang et al. [591] ont étudié les champs magnétiques statiques de faible niveau (CEM) sur la croissance des moisissures (*Aspergillus versicolor*) qui peuvent avoir un impact important sur la corrosion des métaux dans des conditions environnementales propices à la croissance des moisissures. Ceci est particulièrement problématique dans les cartes de circuits électroniques fines produites aujourd'hui. L'utilisation d'un

En appliquant un champ magnétique statique (SMF) de 10 mT perpendiculairement à la surface de cartes de circuits imprimés, ils ont constaté que le champ magnétique inhibait la croissance des moisissures et la corrosion de surface, qui étaient ralenties, contrairement aux cartes de contrôle sans champs magnétiques appliqués, où les moisissures formaient une fosse de corrosion centrée sur les spores, qui entraînait ensuite une corrosion macroscopique uniforme régionale. Ces résultats démontrent des changements dans la croissance des cellules/spores à une exposition de faible intensité que l'on peut trouver dans l'environnement.

Toujours dans l'optique de possibilités commerciales, Sun et al. [592] ont découvert qu'un polysaccharide d'*Irpex lacteus* (un champignon à pourriture blanche très répandu dans l'environnement qui décompose les matières organiques mais qui est également utilisé commercialement pour traiter la néphrite chez l'homme) était sensible aux CEM-ELF de faible intensité, comme le montre l'augmentation de la biomasse et de la teneur en polysaccharides, ainsi que l'induction de torsions malformées sur les surfaces cellulaires de l'échantillon. Les polysaccharides sont des hydrates de carbone comportant un grand nombre de molécules de sucre utilisées comme sources d'énergie dans les cellules vivantes. Ils ont identifié des changements variables dans de multiples gènes exprimés de manière différentielle après une exposition à des CEM à courant alternatif (50 Hz, 3,5 mT, 3 h par jour, pendant 4 jours). Ils ont constaté une forte augmentation initiale des taux de croissance dans les échantillons exposés, qui a ensuite été marquée par un déclin significatif de l'influence des CEM au fil du temps, bien qu'il y ait également eu d'importants effets durables. Les altérations de l'expression génétique globale dues aux CEM ont indiqué que les effets pléiotropiques (capables d'affecter plusieurs protéines ou de catalyser plusieurs réactions) étaient liés à la transcription, à la -prolifération cellulaire, aux composants de la paroi cellulaire et de la membrane, à la biosynthèse et au métabolisme des acides aminés. La biosynthèse et le métabolisme des polysaccharides étaient également significativement enrichis dans les échantillons exposés aux CEM. Ils ont conclu que les CEM augmentaient de manière significative les teneurs en acides aminés et qu'ils étaient donc considérés comme une méthode appropriée pour augmenter la fermentation des micro-organismes, vraisemblablement à des fins commerciales. Cependant, l'importance de cette étude pour les expositions environnementales est liée aux multiples façons dont le courant alternatif CEM commun à la production d'électricité a modifié l'expression génétique des levures. Il existe au moins un cas clinique d'une souche différente d'*I. lacteus* prenant une qualité infectieuse rare et dangereuse chez un humain immunodéprimé [593]. La question est la suivante : les CEM-FEU, désormais omniprésents, peuvent-ils contribuer à l'émergence de nouvelles formes de contagion des levures ?

La même question se pose avec *Candida albicans* et d'autres levures pathogènes qui ont rapidement développé une résistance aux médicaments antifongiques. *C. albicans* peut vivre de manière inoffensive dans la microflore humaine, mais certaines circonstances liées au mode de vie ou à l'immunosuppression peuvent en faire un pathogène opportuniste. Il peut également infecter certains animaux non humains. Alors que la candidose cutanéomuqueuse chronique peut

*C. albicans* infecte la peau, les ongles et les muqueuses orales et génitales, mais en cas d'immunodéficience élevée de l'hôte, il peut pénétrer dans la circulation sanguine et induire des infections systémiques avec une mortalité comprise entre 30 et 80 % [594]. On observe une résistance croissante de *C. albicans* aux agents antifongiques traditionnels, tels que le fluconazole et l'amphotéricine B [595, 596]. Les mécanismes de résistance comprennent la surproduction de transporteurs membranaires d'efflux de médicaments et/ou des modifications de l'expression génétique [597].

Deux études visant à trouver de nouvelles stratégies thérapeutiques ont été menées en utilisant les CEM. Sztafrowski et al. [594] ont étudié l'utilisation de champs magnétiques statiques (SMF, 0,5 T) sur des cultures de *C. albicans* en présence de deux médicaments antifongiques couramment utilisés. Leur objectif était d'évaluer si les CEM avaient un impact sur la viabilité générale de la transition hyphale de *C. albicans* et sur sa sensibilité au fluconazole et à l'amphotéricine B. Ils ont constaté une réduction de la longueur hyphale de *C. albicans* dans les échantillons exposés aux CEM. Ils ont également constaté un effet statistiquement significatif sur la viabilité de *C. albicans* lorsque le SMF était combiné à l'amphotéricine B. Ils ont émis l'hypothèse que cet effet synergique pouvait être dû aux effets de liaison de l'amphotéricine B à la membrane plasmique et que le SMF pouvait influencer l'orientation des domaines dans la membrane plasmique. Ils ont conclu, avec prudence, que l'utilisation d'un SMF dans la thérapie antifongique pourrait être une nouvelle option de soutien pour traiter les infections à candida.

Novickij et al. [598] se sont également intéressés aux possibilités thérapeutiques compte tenu de la multirésistance et des effets secondaires des thérapies antifongiques. Leur objectif était d'optimiser l'induction de l'apoptose par électroporation en utilisant des impulsions de durée variable (séparément et en combinaison avec un traitement à l'acide formique) et d'identifier les phénotypes apoptotiques des levures. Ils se sont concentrés sur les champs -électriques pulsés nanosecondes non thermiques (PEF 3 kV, 100 ns - 1 ms onde carrée ; et PEF 30 kV/cm 250, 500, 750 ns durée, 50 impulsions, 1 kHz) comme alternative thérapeutique et/ou pour renforcer les effets en combinaison avec les traitements conventionnels. Dans trois modèles de levure, *S. cerevisiae* (comme témoin) et *Candida lusitanae* et *Candida guilliermondii* résistants aux médicaments, ils ont constaté que la PEF nanoseconde induisait l'apoptose dans les trois souches. La combinaison du PEF avec une solution d'acide formique faible a amélioré l'apoptose induite et l'efficacité de l'inactivation dans la majorité de la population de levures. Les cellules de levure présentaient des ruptures d'ADN et d'autres modifications. Les chercheurs ont conclu que le PEF pourrait être un nouveau protocole non toxique utile pour traiter certaines maladies fongiques et minimiser les dommages tissulaires.

Choe et al. [599] ont étudié le transport ionique et la réponse au stress d'une souche de levure (K667) aux CEM-FE (60 Hz, 0,1 mT, ondes sinusoidales ou carrées), en étudiant spécifiquement -l'homéostasie ionique interne via la membrane cellulaire impliquant les ions métalliques et les transports de cations (les cations sont



espèce ionique composée d'atomes et de molécules ayant une charge positive). Ils ont constaté une augmentation significative des concentrations de cations intracellulaires à mesure que le temps d'exposition aux CEM-ELF augmentait, ainsi que d'autres changements. Cette étude a des implications pour la santé des sols, car les levures peuvent faire partie intégrante de la formation d'une matière organique saine dans le sol. Ils ont conclu que les CEM et les levures pourraient également jouer un rôle dans les processus de biorémission dans les environnements pollués par les métaux.

Lian et al. [600] ont étudié les effets des CEM-ELF (50 Hz, 0-7,0 mT) et des RFR (2,0 GHz, 20 V/m, température de 30 °C, DAS moyen par cellule/0,12 W/kg) sur deux souches de levure bourgeonnante (NT64C et SB34) et sur la génération/propagation de prions. Ils ont constaté que, dans les deux cas d'exposition aux CEM, la génération *de novo* et la propagation des prions de levure (URE3) étaient élevées dans les deux souches de levure. L'élévation des prions a augmenté avec le temps et les effets étaient dose-dépendants. Les niveaux de transcription et d'expression des protéines de choc thermique et des chaperons n'ont pas été élevés de manière statistiquement significative après l'exposition, mais les niveaux d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), ainsi que les activités superoxyde dismutase (SOD) et catalase (CAT) ont été élevés de manière significative après une exposition à court terme, mais pas à long terme. Ces travaux ont démontré pour la première fois que l'exposition aux CEM pouvait augmenter la génération *de novo* et la propagation des prions de levure, ce qui étaye l'hypothèse du chercheur selon laquelle les ROS pourraient jouer un rôle dans les effets des CEM sur le mauvais repliement des protéines. Les niveaux de ROS sont également à l'origine d'autres effets importants des CEM sur la fonction cellulaire. Ils ont conclu que les effets de l'exposition aux CEM sur les niveaux de ROS et le repliement des protéines peuvent initier une cascade d'effets ayant un impact négatif sur de nombreux processus biologiques.

Les effets des CEM sur le repliement des protéines ne peuvent être surestimés. Les protéines doivent se replier dans des conformations tridimensionnelles appropriées pour remplir leurs fonctions spécifiques - des protéines intactes sont essentielles à l'existence de toute vie. Les protéines intactes sont essentielles à l'existence de toute vie. Un mauvais repliement n'altère pas seulement la fonction mais conduit à la maladie. Le repliement à l'intérieur des cellules ne se produit pas spontanément, mais dépend plutôt d'aides moléculaires appelées chaperons. Le mauvais repliement des protéines a été impliqué dans les maladies d'Alzheimer, de Parkin-son et de Huntington, entre autres. La maladie dévastatrice de Creutzfeldt-Jakob est causée par un mauvais repliement des prions dans le cerveau, ce qui provoque une signalisation anormale dans les neurones et finit par entraîner la paralysie et la mort. Les animaux sauvages peuvent également souffrir de maladies à prions, telles que le dépérissement chronique des cerfs, des élans et d'autres cervidés, et le bétail peut souffrir de la maladie dite de la "vache folle". Les deux études mentionnées ci-dessus [599, 600] ont des implications sur la façon dont ces maladies se propagent dans le sol, avec des liens possibles avec les - CEM environnementaux.

Il ressort clairement de ce qui précède que les CEM-ELF et les CEM-FR, en utilisant de multiples caractéristiques de signalisation, sont biologiquement actifs de manière temporaire et permanente dans les levures/leucocytes.

des espèces de champignons ayant des implications environnementales importantes pour de nombreux taxons.

## Bactéries

On sait que des souches de bactéries sont magnétotactiques et utilisent les champs géomagnétiques pour se diriger. Blakemore [63] a été le premier à suggérer en 1973 que les bactéries présentes dans les boues des marais salés d'Amérique du Nord utilisaient la magnétite comme capteur lorsqu'il a découvert que non seulement les bactéries étaient fortement attirées par un aimant externe, mais qu'elles possédaient également des cristaux de magnétite qui leur permettaient de s'aligner sur les lignes des champs magnétiques de la Terre. Il a également découvert que ces cristaux étaient spécifiques à la géolocalisation du pôle Nord dans les échantillons du Nord et qu'ils recherchaient le pôle Sud dans les espèces du Sud [52, 63, 511]. Les bactéries ont montré un comportement de "remontée" et de "descente" le long des gradients de champ magnétique lorsque la boue était perturbée, indiquant une boussole magnétique. Depuis ces premiers travaux, un tout nouveau domaine appelé électromicrobiologie s'est développé avec des découvertes qui incluent certaines bactéries électro-actives responsables de la formation de magnétite, d'autres créant leurs propres "fils" électriques dans les vasières avec des implications pour les nouvelles technologies [601].

Parmi les effets les plus troublants des CEM, on trouve des - altérations bactériennes ayant des implications pressantes pour la résistance aux antibiotiques. Depuis les années 1940 [602], les effets non thermiques ont été documentés dans les cultures bactériennes, virales et tissulaires avec des impulsions de 20 MHz à faible répétition. La plupart des études menées entre les années 1940 et les années 1980 se sont concentrées sur la capacité des CEM à tuer les microbes et les champignons dans les sources alimentaires humaines à haute intensité, et la plupart des recherches ont donc porté sur les intensités thermiques. Ces travaux se poursuivent aujourd'hui, car il a été démontré que les micro-ondes sont un moyen efficace de tuer les microbes [50]. Mais les microbes réagissent également à des intensités non létales beaucoup plus faibles et des travaux récents ont mis en évidence les effets des ELF et des RFR.

La bactérie commune *Escherichia coli*, qui peut vivre de manière inoffensive dans l'intestin de l'homme et de nombreuses autres espèces animales, peut également devenir virulente et tuer par le biais de maladies d'origine alimentaire. *E. coli* se décline en de nombreuses souches, est bien étudiée et est maintenant considérée comme la bactérie la plus caractérisée génétiquement et physiologiquement. *E. coli* est confrontée à des facteurs de stress environnementaux variés et nombreux au cours de sa croissance, de sa survie et de l'infection, notamment la chaleur, le froid, les changements de niveaux de Ph, la disponibilité des réserves de nourriture/d'eau et les CEM. Comme d'autres bactéries, elles réagissent en activant des groupes de gènes et des protéines de choc thermique (voir "Mécanismes" ci-dessus), ce qui peut éventuellement conduire à une tolérance au stress à des fins de survie. Mais la tolérance au stress induite peut également conduire à une virulence accrue, ainsi qu'à une tolérance renforcée à d'autres facteurs de stress qui confèrent une protection croisée [603].

Salmen et ses collègues [604, 605] ont publié des articles sur les effets des CEM sur les souches bactériennes, documentant l'étude croissante des microbes liés à la résistance aux antibiotiques, dont de nombreux résultats soulignent les réponses aux CEM [606-610]. Cellini et al. [611] ont étudié la capacité d'adaptation d'*E. coli* au stress environnemental induit par des expositions aux CEM à des champs magnétiques de 50 Hz de faible intensité (0,1, 0,5, 1,0 mT) par rapport à des contrôles fictifs. Ils ont constaté que les échantillons exposés et les témoins présentaient un nombre total et un nombre de cellules cultivables similaires, mais une viabilité cellulaire accrue a été observée dans les échantillons exposés réincubés pendant 24 heures à l'extérieur du solénoïde d'essai par rapport aux témoins. L'exposition à un CEM de 50 Hz (20-120 min) a également produit un changement significatif du morphotype d'*E. coli* avec une présence de cellules coccoïdes agrégées en grappes après une réincubation de 24 h à l'extérieur du solénoïde de champ magnétique. Des formes bactériennes atypiquement allongées ont également été notées, indiquant une probable altération lors de la division cellulaire. Certaines différences dans l'analyse RNA-AFLP ont également été observées pour toutes les intensités évaluées. Ils ont conclu que l'exposition aux CEM-ELF 50 Hz est un facteur de stress bactérien, comme en témoigne sa réponse immédiate en modifiant la morphologie (de bacillaire à coccoïde) et en induisant des changements phénotypiques et transcriptionnels. Malgré cet effet de stress, on a également constaté que la viabilité des échantillons exposés augmentait de manière significative, ce qui suggère la présence de cellules VBNC. Ils ont conclu que d'autres études étaient nécessaires pour mieux comprendre l'influence des CEM-ELF sur l'organisation des cellules bactériennes. Ils n'ont pas extrapolé à l'évidence, à savoir que *E. coli* a été modifié de manière anormale mais que sa viabilité a néanmoins été renforcée - une recette pour la résistance aux antibiotiques.

Crabtree et al. [612], dans une petite étude sur l'homme, ont examiné la relation biomique des bactéries humaines exposées à la fois aux champs magnétiques statiques (SMF) et aux RFR. À l'aide de souches de culture de laboratoire et d'isolats de bactéries cutanées prélevés sur les mains, les joues et le menton de quatre volontaires ayant des antécédents différents (autodéclarés) d'utilisation de téléphones portables, ils ont constaté des schémas de croissance variés d'*E. coli*, *Pseudomonas aeruginosa* et *Staphylococcus epidermidis* sous des champs magnétiques statiques sur différentes espèces bactériennes. Les isolats du microbiote cutané ont montré une croissance irrégulière parmi les sujets testés, probablement en raison de leurs différents historiques d'utilisation du téléphone portable (classés comme lourds, moyens et légers) et d'autres variables. La croissance des *staphylocoques* a augmenté sous RFR chez certains individus, alors qu'elle a été supprimée chez d'autres. Cette situation a été compliquée par les différentes zones corporelles testées, certaines présentant des expositions chroniques plus élevées, comme les mains, ainsi que par d'autres variables, notamment l'utilisation d'un nettoyant antibactérien pour le visage par un sujet. Les volontaires de la catégorie d'utilisation intensive ont montré une moindre croissance bactérienne sur les mains, peut-être en raison de l'accoutumance aux microbes. Dans l'ensemble, et malgré la petite taille de l'échantillon, les chercheurs ont conclu que la radiofréquence peut perturber l'équilibre du microbiote cutané,

le rendant plus vulnérable aux infections par des agents pathogènes opportunistes spécifiques et/ou d'autres agents pathogènes étrangers. Ils ont noté que les CEM SMF et RF ont des effets significatifs mais variables sur la croissance des bactéries humaines communes ; que la croissance bactérienne n'est pas affectée, est augmentée ou supprimée selon l'espèce de bactérie ; et que les réponses bactériennes semblent être déterminées par l'exposition historique aux CEM RF et le mode de vie. Cette étude, même avec ses limites inhérentes, indique des changements dans les microbes avec les CEM et peut s'avérer une nouvelle façon d'étudier les bactéries avec une signification pour les expositions dans la vie réelle des humains et des animaux.

Salmen et al. [605] ont également trouvé des résultats très variables concernant les effets des RFR (900 et 1 800 MHz) sur l'ADN, le taux de croissance et la sensibilité aux antibiotiques de *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis* et *P. aeruginosa*. À l'aide d'un combiné de téléphone cellulaire actif, ils ont exposé des bactéries à 900 et 1 800 MHz pendant 2 h, puis ont injecté des échantillons dans un nouveau milieu où la vitesse de croissance et la sensibilité aux antibiotiques ont été évaluées. En ce qui concerne l'ADN, ils n'ont trouvé aucune différence chez *S. aureus* et *S. epidermidis* lorsqu'ils ont été exposés à 900 et 1 800 MHz par rapport aux témoins, mais *P. aeruginosa* a montré des changements dans les motifs des bandes d'ADN après de telles expositions. En ce qui concerne les taux de croissance, à l'exception d'une diminution significative après 12 heures d'exposition à 900 MHz, aucun effet significatif sur la croissance de *S. aureus* et *S. epidermidis* n'a été observé. Mais la croissance de *P. aeruginosa* a été significativement réduite après une exposition de 10 et 12 heures à 900 MHz, alors qu'aucune réduction significative de la croissance n'a suivi l'exposition à 1 800 MHz. En ce qui concerne la sensibilité aux antibiotiques, pour les médicaments étudiés (c'est-à-dire amoxicilline 30 mg, azithromycine 15 mg, chloramphénicol 10 mg et ciprofloxacine 5 mg), à l'exception de *S. aureus* traité à l'amoxicilline (30 mg), l'exposition aux CEM n'a eu aucun effet significatif sur la sensibilité bactérienne aux antibiotiques. Cette étude montre la variabilité des espèces bactériennes non seulement aux différentes fréquences courantes dans l'environnement actuel mais aussi aux changements de sensibilité à certains antibiotiques mais pas à d'autres. Toutefois, cette étude peut avoir connu des problèmes de conception.

Plusieurs études ont examiné les signaux WiFi sur les souches bactériennes. Taheri et al. [610] ont évalué l'exposition aux rayonnements des téléphones mobiles GSM 900 MHz et aux RFR 2,4 GHz des routeurs WiFi courants pour voir si les cultures de *Listeria mono-cytogenes* et d'*E. coli* entraînaient une modification de la sensibilité à 10 antibiotiques différents. Ils ont trouvé des fenêtres étroites dans lesquelles les microbes devenaient plus résistants : Pour *L. monocytogenes*, aucune modification significative de l'activité antibactérienne entre les échantillons exposés et non exposés - sauf pour la tétracycline (Doxycycline) - n'a été constatée. Pour *E. coli*, cependant, il y avait un changement significatif dans les activités antimicrobiennes, ce qui suggère que les expositions aux RFR peuvent influencer la sensibilité aux antibiotiques d'*E. coli* plus que celle de *Listeria*. Pour les fenêtres et les



effets prononcés, ils ont constaté que le *L. monocytogenes* présentait des réponses différentes à chaque antibiotique. Pour la Doxycycline, la fenêtre est apparue après 6 h d'exposition au WiFi et au téléphone mobile-RFR. Après 9 h d'exposition au WiFi pour la Ciprofloxacine et le Sulfonamide (Tréméthoprine/sulfaméthoxazole), les bactéries avaient tendance à devenir plus résistantes. En revanche, le schéma pour la Levofloxacine et la Pénicilline (Céfotaxime/Def-triaxone) a montré une sensibilité accrue. Pour *E. coli*, le schéma de la réponse au WiFi et au RFR des téléphones portables était le même : une résistance maximale aux antibiotiques a été observée entre 6 et 9 heures d'exposition, mais après 12 heures, une réponse de stress a conduit à un retour aux conditions pré-exposition, indiquant une réaction adaptative. Taheri et al. [609] ont trouvé des effets de fenêtre non linéaires similaires et des différences dans les taux de croissance de *Klebsiella pneumonia*, tandis que Mortazavi et al. [613] ont trouvé des effets de fenêtre similaires chez *E. coli*. En outre, ils ont constaté une augmentation significative des taux de croissance après une exposition aux rayonnements chez *E. coli* à Gram négatif et *L. monocytogenes* à Gram positif. Ils ont conclu que ces effets de fenêtre peuvent être déterminés par l'intensité et le débit de dose ; que l'exposition aux RFR dans une fenêtre étroite peut rendre les micro-organismes résistants aux antibiotiques ; et que ce phénomène adaptatif constitue une menace pour la santé humaine. On peut en déduire qu'il en va de même pour de nombreuses espèces non humaines.

Said-Salman et al. [614] ont évalué les effets non thermiques du WiFi à 2,4 GHz pendant 24 et 48 heures (en utilisant un routeur WiFi comme source) sur les souches bactériennes pathogènes *E. coli* 0157H7, *S. aureus* et *S. epidermis* pour la résistance aux antibiotiques, la motilité, l'activité métabolique et la formation de biofilms. Les résultats ont montré que l'exposition au WiFi modifiait la motilité et la sensibilité aux antibiotiques d'*E. coli* mais qu'il n'y avait aucun effet sur *S. aureus* et *S. epidermis*. Cependant, les cellules exposées (par rapport aux contrôles non exposés) ont montré une augmentation de l'activité métabolique et de la capacité de formation de bio-film chez *E. coli*, *S. aureus* et *S. epidermis*. Ils ont conclu que l'exposition au WiFi agissait comme un facteur de stress bactérien en augmentant la résistance aux antibiotiques et la motilité d'*E. coli*, ainsi qu'en favorisant la formation de biofilms dans toutes les souches étudiées. Ils ont indiqué que ces résultats pourraient avoir des implications pour la gestion des infections bactériennes graves.

Movahedi et al. [615] ont également étudié la résistance aux antibiotiques, en utilisant une exposition à court terme aux RFR d'un simulateur de téléphone mobile (900 MHz, 24 h) sur *P. aeruginosa* et *S. aureus* contre 11 antibiotiques. Ils ont constaté des changements significatifs dans les propriétés structurelles et la résistance aux nombreux antibiotiques étudiés. *P. aeruginosa* était résistante à tous les antibiotiques après 24 heures d'exposition par rapport aux témoins non exposés, tandis que les bactéries *S. aureus* étaient résistantes à environ 50 %. Ils ont également constaté des modifications structurelles dans tous les échantillons exposés et une augmentation de la perméabilité de la paroi cellulaire.

Dans une étude de terrain menée à proximité de tours de téléphonie mobile, Sharma et al. [616] ont examiné les changements dans la diversité microbienne et dans l'utilisation des antibiotiques.

dans des échantillons de sol prélevés à proximité de quatre stations de base différentes et dans des échantillons témoins prélevés à plus de 300 mètres. *Stenotrophomonas maltophilia*, *Chryseobacterium gleum* et *Kocuria rosea* ont été isolés et identifiés dans des échantillons de sol prélevés près des zones exposées. Ils ont constaté une plus grande résistance aux antibiotiques dans les microbes du sol à proximité des stations de base par rapport aux témoins, avec une différence statistiquement significative dans le schéma de résistance aux antibiotiques de l'acide nalidixique et du céfixime lorsqu'ils sont utilisés comme agents antimicrobiens. Ils ont conclu que le rayonnement des antennes relais peut altérer de manière significative les systèmes vitaux des microbes et les rendre multirésistants aux médicaments.

Les chercheurs ont également étudié les effets des CEM-ELF sur la croissance bactérienne et la sensibilité aux antibiotiques. Segatore et al. [608] ont étudié des expositions à 2 mT, 50 Hz sur *E. coli* ATCC 25922 et *P. aeruginosa* ATCC 27853 et ont trouvé que les CEM influençaient significativement le taux de croissance des deux souches, notamment à 4, 6 et 8 heures d'incubation. Le nombre de cellules était significativement réduit dans les bactéries exposées par rapport aux contrôles. Et à 24 h d'incubation, le pourcentage de cellules a augmenté (*P. aeruginosa* ~ 42% ; *E. coli* ~ 5%) dans les groupes traités par rapport aux témoins, ce qui a suggéré aux chercheurs une réponse adaptative progressive. Cependant, ils n'ont pas constaté de changement remarquable dans la sensibilité aux antibiotiques. Potenza et al. [617] ont également constaté des effets de champs magnétiques statiques de haute intensité à 300 mT sur la croissance et l'expression génétique d'*E. coli*, mais il s'agirait d'une exposition environnementale élevée.

## Virus

Il y a peu de recherches sur les espèces virales et les CEM, probablement en raison du fait que les virus ne disposent pas de matériaux ferromagnétiques, qu'ils sont difficiles à étudier et qu'ils ne constituent pas de bons modèles généraux de laboratoire, sauf pour étudier leur impact direct sur des points finaux *in vivo* spécifiques. La recherche en virologie prospère dans son propre créneau spécialisé et n'a pas été utilisée pour la modélisation de base comme c'est le cas pour de nombreuses autres formes de vie, comme nous l'avons noté tout au long de cet article. La question de savoir si les virus sont même vivants fait l'objet d'un débat de longue date.

Cependant, une vaste discussion menée par Zaporozhan et Ponomarenko [618] a émis l'hypothèse d'un lien mécaniste complexe possible entre les pandémies de grippe, les cycles naturels des taches solaires et les effets non thermiques des champs magnétiques faibles via les paires cryptochromes/radicaux, les voies d'expression génique et les altérations immunologiques de l'hôte induites par le stress, favorables aux épidémies de grippe. Constatant que la plupart des grandes épidémies de grippe - mais pas toutes - se sont produites dans des intervalles de temps commençant 2 à 3 ans avant et se terminant 2 à 3 ans après le maximum d'activité solaire, ils ont émis l'hypothèse que les cycles solaires sont capables à la fois de réguler et d'atténuer les effets de l'activité solaire.

entraînent les processus de microévolution biologique des espèces virales (entre autres) et influencent les biorhythmes humains de manière synergique, ce qui pourrait entraîner des épidémies de grippe. Bien que d'autres aient également noté des liens entre les pandémies de grippe et l'activité des taches solaires - peut-être sur la base de changements dans les habitudes des oiseaux migrateurs en tant que vecteurs viraux [619-621] - et que certains aient établi un lien entre les taches solaires et d'autres événements néfastes pour la santé humaine, ces effets restent intéressants mais restent hypothétiques. Le rayonnement UV, qui n'est pas abordé dans cet article, est connu pour supprimer l'immunité à médiation cellulaire et est donc capable d'affecter négativement le cours d'une infection virale chez certaines espèces de mammifères. Les CEM ambiants dans les gammes de fréquences inférieures peuvent également réduire la viabilité immunitaire chez toutes les espèces, ce qui peut théoriquement favoriser la virulence opportuniste. Des recherches beaucoup plus approfondies sur les CEM doivent être menées sur les virus ; une approche fructueuse pourrait consister en des recherches synergiques sur des espèces végétales infectées par des virus.

Les études précédentes sur les microbes montrent un modèle de sensibilité des microorganismes aux CEM avec des associations qui englobent un large éventail de changements critiques, y compris des réponses cohérentes au stress, des altérations de la croissance et de la viabilité, des altérations de la membrane cellulaire, et des modèles clairs de la facilité avec laquelle la résistance aux antibiotiques se forme dans la vie microbienne à des niveaux de CEM désormais omniprésents.

## Plantes (voir Partie 2, Supplément 4, pour un tableau des études sur la flore : ELF, RFR)

Les plantes ont évolué de manière très sensible aux CEM naturels et artificiels dans toutes les phases de germination, de croissance et de maturation [31]. La magnétoréception, qui est bien documentée chez les animaux tels que les oiseaux, a également été décrite chez les plantes [622] et les espèces végétales peuvent répondre à des changements subtils des CEM dans l'environnement, y compris dans des communautés végétales entières [623]. Elles peuvent même "communiquer" et recueillir divers types d'"informations" par le biais de signaux électriques dans des cellules de type neuronal situées à l'extrémité des racines et ailleurs [624]. Certains émettent l'hypothèse [625] qu'une forme de sensibilité vibratoire et acoustique autour de 220 Hz pourrait jouer un rôle dans la vie des plantes, bien que tout le monde ne soit pas d'accord [626].

Presque toute la végétation est soumise à des champs multifréquences complexes en raison de son système racinaire basé sur le sol et de sa forte teneur en eau. De plus, l'exposition aux RFR ambiants au-dessus du sol rend les plantes particulièrement sensibles aux effets à proximité des pylônes de transmission [623, 627]. De nombreuses études sur les CEM ont révélé à la fois une stimulation de la croissance et un dépérissement. On pense que la présence de nombreux émetteurs de RFR dans les Alpes allemandes et suisses a joué un rôle dans le dépérissement des plantes.

la déforestation dans cette région [628]. Le "brunissement" de la cime des arbres est souvent observé près des tours de téléphonie mobile, en particulier lorsque l'eau est proche de la base des racines des arbres [25]. Les cimes des arbres, avec leur taux d'humidité élevé et leur couvert végétal souvent épais, sont des guides d'ondes RFR connus. En fait, les applications militaires utilisent cette capacité de la cime des arbres pour la propagation des signaux de communication dans les zones reculées et pour le guidage des systèmes d'armes volant à basse altitude [629].

La façon dont la flore interagit avec les CEM reste un mystère, mais un modèle clair est apparu lors de la recherche de la base de données pour cet article : les CEM ELF statiques se sont avérés - bénéfiques pour la croissance des plantes et des graines [630], tandis que les RFR sont néfastes. Les plantes ont clairement une magnétoréception dans leur état stationnaire. L'état normal au sol des champs magnétiques pour les plantes est le champ géomagnétique naturel relativement constant qui se situe en moyenne entre 25 et 65  $\mu\text{T}$  selon le lieu et les variations saisonnières [631]. Les changements atmosphériques, tels que les orages et les éclairs, peuvent provoquer des modifications intermittentes des champs magnétiques ambiants. Ces activités sont aussi généralement associées à l'eau de pluie critique pour pratiquement toute la vie végétale. Les plantes peuvent détecter ces changements et préparer leur croissance en utilisant les précipitations à venir. On voit des arbres étendre leurs branches vers le ciel bien avant que la pluie ne se produise réellement, et ces changements correspondent aux modifications des polarités des arbres [632].

De nombreuses études montrent une augmentation du taux de croissance des plantes, notamment des études sur la germination des graines exposées à des champs magnétiques alternatifs. Les plantes réagissent également de manière similaire aux champs magnétiques statiques de haute intensité. Cela peut signifier que le mécanisme physiologique des plantes qui provoque la croissance induite par le champ magnétique est finement ajusté à une certaine intensité de flux magnétique. Toute variation d'intensité ou de forme du champ magnétique ambiant pourrait activer ou entraver ce mécanisme de croissance.

La foudre, par exemple, génère des impulsions électromagnétiques (EMP) rapides et intenses. Il a été démontré de façon constante que l'EMP peut avoir des effets biologiques [633] en une seule impulsion. Les plantes peuvent avoir des mécanismes si sensibles qu'elles peuvent détecter l'énergie des PEM à des kilomètres de distance. L'impulsion provoque un changement transitoire du champ magnétique environnemental qui peut être détecté par un ou plusieurs des mécanismes mentionnés dans la section "Mécanismes" ci-dessus, ainsi que dans les paragraphes ci-dessous. L'EMP a été étudié de près pour des applications militaires en raison de sa capacité, à des intensités élevées, à désactiver l'électronique. Alors qu'une grande partie de la recherche soutenue par les militaires ne trouve aucun effet biologique de l'exposition aux PEM, la recherche non soutenue par les militaires montre des effets. Cela correspond aux mêmes résultats dans les modèles de recherche industriels et non industriels [165, 634].

Il existe une longue tradition d'étude des effets de l'exposition aux CEM sur la croissance des plantes, notamment les travaux de l'Institut indien de recherche sur la santé.

Le scientifique Sir Jagadish Bose (1858-1937) a proposé la nature électrique des réponses des plantes aux stimuli environnementaux et a étudié les effets des micro-ondes sur les tissus végétaux et les potentiels de membrane [635]. Il est intéressant de noter que Bose a étudié les effets des ondes millimétriques [636], désormais applicables à la technologie 5G. On peut dire que Bose a été un pionnier de la communication sans fil.

Un autre pionnier des effets des CEM sur les plantes est Harold Saxon Burr (1889-1973), de l'université de Yale, qui a étudié le potentiel électrique de deux espèces d'arbres (un érable et un orme) situés sur une propriété et d'un autre érable à titre de comparaison poussant à 64 km de là. Les mesures de nombreux paramètres ont été effectuées à l'aide d'électrodes intégrées qui ont enregistré toutes les heures de 1953 à 1961 [637]. Des enregistrements simultanés de la température, de l'humidité, de la pression barométrique, de la lumière du soleil, des cycles lunaires, de l'activité des taches solaires, des conditions météorologiques, des gradients de potentiel atmosphérique, des gradients de potentiel terrestre et des rayons cosmiques ont été corrélés avec les potentiels des arbres. Burr a également installé un équipement qui mesurait le potentiel entre des électrodes dans la Terre (distances d'environ 10 miles) et le gradient de potentiel de l'air, et a constaté que les potentiels de l'air et de la Terre fluctuaient exactement avec la phase des potentiels des arbres, bien que ces derniers ne soient pas toujours synchrones. Burr a finalement constaté que l'environnement électrique était en étroite corrélation avec les potentiels des arbres, dans une sorte d'entraînement aux cycles diurnes, lunaires et annuels. Les paramètres météorologiques n'étaient pas en corrélation immédiate, sauf lorsque des orages passants provoquaient un comportement anormal chez les arbres, en parallèle direct avec les mesures effectuées avec les électrodes terrestres. Ceci suit la théorie mentionnée ci-dessus selon laquelle les plantes peuvent détecter le PEM et en tirer des informations immédiates.

Il n'existe aucune autre étude de terrain à long terme aussi détaillée que celle de Burr sur les effets du champ magnétique sur une espèce végétale. Cependant, une autre étude de terrain sur les RFR en Lettonie [638] a mesuré les effets directement sur les arbres près de la station de radiolocalisation de Skrunda, un système radar d'alerte précoce qui a fonctionné de 1971 à 1998. Le système fonctionnait dans la gamme de fréquences de 156 à 162 MHz et émettait à partir de quatre antennes bidirectionnelles pulsées qui avaient fonctionné sans interruption pendant plus de 20 ans au moment de l'étude. Dans des parcelles permanentes situées dans des forêts de pins, à des distances variables de la station radar et dans des zones de contrôle, les changements de croissance des arbres ont été mesurés et analysés à l'aide de données rétrospectives sur les cernes des arbres. Ils ont trouvé une corrélation négative statistiquement significative entre l'augmentation supplémentaire relative de la croissance des arbres et l'intensité du champ électrique, la croissance radiale des pins ayant diminué dans toutes les parcelles exposées au RFR. La diminution de la croissance a commencé après 1970, ce qui a coïncidé avec la mise en service initiale de la station, et a été par la suite

observés tout au long de la période d'étude. Les effets de nombreux autres facteurs environnementaux et anthropiques ont également été évalués mais aucun effet significatif sur la croissance des arbres n'a été corrélé. Il s'agit peut-être de la première étude détaillée sur le terrain des plantes et de la RFR.

De nombreuses études sur les CEM et les plantes sont aujourd'hui menées en laboratoire et se sont souvent concentrées sur la promotion de la croissance afin de créer des rendements plus élevés de plantes destinées à la production alimentaire. Les effets des CEM statiques, des CEM pulsés, des CEM-ELF et des CEM-RF ont été signalés. Il existe, en fait, plus de 200 études sur les plantes et les CEM, trop nombreuses pour être passées en revue ici. Voir la partie 2, supplément 4, pour un tableau des études sur les semis et le développement des plantes en fonction des types de CEM testés.

Comme indiqué dans le supplément 4 et dans Halgamuge [627], les champs magnétiques statiques et ELF fréquents améliorent généralement la croissance des plantes, tandis que le RFR la retarde. C'est le contraire des résultats des expériences sur les animaux et sur les cultures de cellules animales, dans lesquelles les champs magnétiques ELF produisent généralement les mêmes effets que les RFR. Il est intéressant de noter que Hajnorouzi et al. [639] et Radhakrishma et al. [640] ont proposé que les MF diminuent le stress environnemental chez les plantes alors que Vian et al. [641, 642] ont considéré le RFR comme un facteur de stress systémique. Une différence morphologique majeure entre les cellules animales et végétales est que les cellules végétales possèdent une paroi cellulaire qui est un organe physiologique actif qui régule la croissance et la division cellulaire et contrôle les communications cellulaires. La paroi cellulaire contient une quantité considérable d'eau [643]. Est-il possible que l'absorption de RFR par l'eau de la paroi cellulaire provoque un effet microthermique qui affecte négativement les fonctions des cellules végétales et provoque même la mort cellulaire, alors que les effets thermiques ne sont pas susceptibles de se produire avec l'exposition aux CEM-ELF.

Certaines racines de plantes se sont révélées sensibles à la fois aux ELF et aux RFR. Belyavskaya [644] a constaté une forte réaction cyto-chimique dans les cellules des racines de pois après une exposition à des champs magnétiques de faible intensité. Kumar et al. [645] ont constaté une cytotoxicité et une génotoxicité dans les méristèmes des racines d'*Allium cepa* avec des RFR de 900 MHz et de 1 800 MHz. Chandel et al. [646] ont étudié l'activité cytotoxique et génotoxique sur l'intégrité de l'ADN dans des méristèmes de racines de *A. cepa* en utilisant un RFR de 2 100 MHz et ont trouvé que l'exposition causait des dommages à l'ADN avec une diminution significative de l'HDNA accompagnée d'une augmentation du TDNA tandis que le TM et l'OTM n'ont pas changé de manière significative par rapport aux contrôles. Les effets biologiques dépendaient de la durée de l'exposition, les changements maximums étant observés à 4 heures.

Dans une série d'études, Stefi et al [647-649] ont étudié les effets d'une exposition à long terme aux RFR des unités de base des systèmes téléphoniques DECT sans fil courants (mode de transmission pulsé 1 882 MHz, 24 h/jour, 7 j/semaine) sur diverses espèces végétales (*Arabidopsis thaliana*, *Pinus halepensis*, *Gossypium hirsutum* respectivement) et ont constaté des altérations structurelles et biochimiques. Par rapport aux contrôles effectués dans des conditions de Faraday



la biomasse des plantes exposées était fortement réduite et la structure des feuilles était deux fois moins épaisse. Les feuilles étaient plus fines et possédaient beaucoup moins de chloroplastes, ce qui a contribué à réduire la vitalité globale. Les systèmes racinaires étaient également affectés de manière négative. Ils ont conclu que le RFR est un facteur de stress et qu'il est nocif pour la vie végétale. Une étude de conception similaire [650] n'a pas trouvé les mêmes effets sur le maïs (*Zea mays*), ce qu'ils ont attribué aux différences structurelles de cette plante, bien que les chloroplastes aient été sévèrement affectés (voir également Kumar et al. [651]).

Jayasanka et Asaeda [652] ont publié une longue revue qui se concentre sur les effets des micro-ondes sur les plantes. Les études indiquent que les effets dépendent de la famille de plantes et du stade de croissance concerné, ainsi que de la durée d'exposition, de la fréquence et de la densité de puissance, entre autres facteurs. Ils ont conclu que même pour de courtes périodes d'exposition (<15 min à quelques heures), des effets non thermiques ont été observés qui peuvent persister pendant de longues périodes même si les expositions initiales étaient très courtes. En outre, ils ont noté qu'étant donné que les stations de base fonctionnent 24 heures sur 24, ni les expositions courtes ni les périodes de récupération ne sont possibles dans les habitats naturels, les plantes étant exposées en permanence tout au long de leur cycle de vie. Ils ont déclaré que les variations de la densité de puissance et de la fréquence des micro-ondes exercent des influences complexes sur les plantes, et que des espèces végétales manifestent diverses réactions différenciées à ces facteurs. Ils concluent qu'il est nécessaire de repenser les directives d'exposition qui, actuellement, ne tiennent pas compte des effets non thermiques.

Il existe de nombreux rapports sur les effets négatifs des RFR sur la flore mature. Waldman-Salsam et al. [653] ont signalé des dommages aux feuilles des arbres situés à proximité des tours/mâts de téléphonie mobile. Dans le cadre d'une étude détaillée de surveillance sur le terrain à long terme menée de 2006 à 2015 dans deux villes allemandes, ils ont constaté des dommages inhabituels et inexplicables sur les côtés des arbres faisant face aux tours et les ont corrélés avec les mesures de RFR par rapport aux zones de contrôle sans exposition. Ils ont constaté que les différences entre les arbres dans les valeurs mesurées de la densité de flux de puissance correspondaient aux différences entre les arbres dans les dommages. Les témoins, qui consistaient en 30 arbres sélectionnés dans des zones à faible rayonnement sans contact visuel avec un mât téléphonique et avec une densité de flux de puissance inférieure à  $50 \mu\text{W}/\text{m}^2$ , n'ont présenté aucun dommage. Ils ont conclu que les RF non thermiques des tours de téléphonie mobile sont nocifs pour les arbres et que les dommages qui affectent un côté finissent par se propager à l'ensemble de l'arbre.

Vian et al. [642] ont publié une étude sur les interactions des plantes avec les radiofréquences à haute fréquence entre 300 MHz et 3 GHz et ont noté que les rapports à l'échelle cellulaire, moléculaire et de la plante entière comprenaient : de nombreuses activités métaboliques modifiées (métabolisme des espèces réactives de l'oxygène,  $\alpha$ - et  $\beta$ -amylase, cycle de Krebs, voie des phosphates pentoses, teneur en chlorophylle et émission de terpènes, entre autres) ; une expression génique altérée (calmoduline, enzymes calcium-dépendantes, etc.) ; des effets sur la santé et l'environnement.

protéine kinase, et inhibiteur de protéinase) ; et une réduction de la croissance (allongement de la tige et poids sec) après une exposition à des RFR non thermiques. Ils ont déclaré que les changements se produisaient dans les tissus directement exposés ainsi que de manière systémique dans les tissus distants et ont proposé que les RFR à haute fréquence soient considérés comme un véritable facteur environnemental hautement capable d'évoquer des changements dans le métabolisme des plantes.

Halgamuge [627] a également publié une revue qui a constaté que les faibles RFR non thermiques affectent les plantes vivantes. L'auteur a analysé les données de 45 études évaluées par des pairs portant sur 29 espèces végétales différentes entre 1996 et 2016 et décrivant 169 - observations expérimentales de changements physiologiques et morphologiques. L'examen a conclu que les données corroboraient que le RFR présentait des effets physiologiques et/ou morphologiques - (89,9 %,  $p < 0,001$ ). Les résultats ont également démontré que les plantes de maïs, de roselle, de pois, de fenugrec, de lentilles d'eau, de tomate, d'oignon et de haricot mungo sont très sensibles au RFR et que les plantes semblent plus sensibles à certaines fréquences entre 800 et 1 500 MHz ( $p < 0,0001$ ) ; 1 500 et 2 400 MHz ( $p < 0,0001$ ) ; et 3 500 et 8 000 MHz ( $p = 0,0161$ ). Hal-Gamuge [627] a conclu que la littérature montre des tendances significatives de l'influence des RFR sur les plantes.

Les impacts de la 5G sur la flore sont particulièrement préoccupants car des millions de petites antennes montées sur des poteaux électriques, émettant en MMW et autres fréquences à large bande, se trouvent déjà - ou se trouveront bientôt - à proximité immédiate de la végétation, créant des expositions aux champs proches et lointains. Comme indiqué dans Halgamuge [627], voici quelques études portant sur les fréquences GHz déjà utilisées ou prévues pour la 5G qui ont trouvé des effets significatifs sur les plantes : Tanner et Romero-Sierra [654] sur la croissance accélérée de la plante Mimosa (10 GHz,  $190 \text{ mW}/\text{cm}^2$ , 5-10 min) ; Scialabba et Tambur-ello [655] sur la réduction du taux de croissance des hypocotyles chez le radis (*Raphanus sativus*) (10,5 GHz, 8 mW ou 12,658 GHz, 14 mW pendant 96 h) ; Tafforeau et al. [656] ont induit la production de méristèmes (groupe de cellules se divisant activement) chez *Linum usitatissimum* (105 GHz pendant 2 h à  $0,1 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ) ; et Ragha et al. [657] (9,6 GHz, 30 min) ont constaté que la germination dépendait des paramètres d'exposition chez les plantes *Vigna radiata*, *Vigna aconitifolia*, *Cicer arietinum* et *Triticum aestivum*. Il s'agit d'un domaine qui nécessite immédiatement des recherches plus approfondies étant donné les résultats des études précédentes.

Un examen approfondi des effets des RFR sur les arbres et d'autres plantes a été publié par Czerwinski et al. [622] qui ont signalé que des effets écologiques sur des communautés végétales entières pouvaient se produire à un très faible niveau d'exposition de  $0,01\text{-}10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  - certainement comparable aux limites examinées dans cet article. Ils se sont concentrés sur les fréquences entre 0,7 et 1,8 GHz et ont inclus de multiples indicateurs complexes pour les types de plantes, la biométrie et les facteurs environnementaux. Il s'agissait du premier article exhaustif qui allait au-delà de l'utilisation de l'indice de fréquence.

des méthodes de recherche plus étroites. Ils ont noté que, bien que la littérature sur les effets de la RFR sur les plantes soit abondante, pas une seule étude de terrain n'avait évalué la réponse biologique au niveau d'une communauté végétale, d'un biome ou d'un écosystème entier, mais s'était plutôt concentrée sur des études de laboratoire à court terme menées sur des espèces uniques. Selon les auteurs, "... cette dissonance est particulièrement frappante compte tenu du fait que les modifications de la structure et de la composition d'une communauté végétale sont depuis longtemps considérées comme des indicateurs environnementaux bien fondés, sensibles et universels". "L'article sert de modèle prédictif pour de futures études de terrain complexes sur des écosystèmes plus vastes.

Des effets synergiques intéressants des CEM ont été trouvés avec les champs magnétiques statiques et les bactéries dans les plantes. À la recherche de méthodes non chimiques pour améliorer la germination des graines après des périodes prolongées de stockage, lorsque la viabilité des graines peut se détériorer, Jovičić-Petrović et al [658] ont étudié les effets combinés de l'inoculation bactérienne (*Bacillus amyloliquefaciens* D5 ARV) et des champs magnétiques statiques (SMF, 90 mT, 5 et 15 min) sur les graines de moutarde blanche (*Sinapis alba* L.). Leurs résultats ont montré que le bioprimage avec le promoteur de croissance végétale *B. amyloliquefaciens* augmentait la croissance des graines de 40,43 %. La réponse des semences au SMF seul dépendait de la durée du traitement. Alors que le SMF à 5 min a augmenté le pourcentage de germination, l'exposition à 15 min a diminué la germination des graines par rapport au contrôle. Cependant, l'effet négatif de l'exposition plus longue a été neutralisé lorsqu'elle a été combinée avec l'inoculation bactérienne. Les deux pourcentages de germination étaient significativement plus élevés lorsque le SMF était combiné avec les bactéries (SMF, 5 min, + D5 ARV ; et SMF, 15 min + D5 ARV ; 44,68 et 53,20%, respectivement) par rapport au contrôle. Ils ont conclu que le traitement par bioprimage et SMF donnait de meilleurs résultats que l'inoculation bactérienne seule. Le pourcentage de germination le plus élevé - 53,20 % des graines germées - a été observé avec la bactérie et une exposition de 15 minutes à 90 mT, ce qui démontre un effet synergique. Ils ont conclu que ces techniques peuvent être utilisées pour revitaliser les graines anciennes et améliorer leur germination.

Même les plantes aquatiques se sont révélées sensibles aux champs électriques artificiels. Klink et al. [659] ont évalué les expositions aux champs électriques sur les taux de croissance et la teneur en métaux traces d'*Elodea canadensis*. Les plantes ont été exposées en laboratoire à un champ électrique de 54 kV/m pendant sept jours. La longueur des plantes et la teneur en Fe, Mn, Ni, Pb et Zn ont été mesurées. Les résultats ont montré que les champs électriques appliqués ont légèrement amélioré la croissance des racines. Ils ont également constaté des changements dans l'absorption des minéraux ; Mn et Ni étaient significativement plus faibles tandis que Pb et Zn étaient significativement plus élevés dans les plantes exposées. La teneur en Fe ne différait pas entre les plantes témoins et les plantes exposées. Ils ont conclu que les champs électriques pouvaient être utilisés pour

phytoremédiation dans les eaux contaminées par des métaux traces. Cette étude a également des implications pour la santé des plantes aquatiques à long terme en général.

Travaillant également avec des champs électriques, Kral et al. [660] ont trouvé une régénération fascinante dans les extrémités des racines d'*Arabidopsis* à différentes expositions aux champs électriques et durées de temps, les expositions les plus faibles produisant la plus grande croissance. Ils ont découvert que les champs électriques imposés peuvent perturber la régénération des racines apicales et que le fait de varier la position de la coupure et l'intervalle de temps entre l'excision et la stimulation faisait une - différence. Ils ont également constaté qu'une brève impulsion d'un champ électrique parallèle à la racine pouvait multiplier par deux la probabilité de sa régénération, perturber la distribution locale de l'hormone auxine et modifier la régulation de la division cellulaire, l'orientation de la racine vers l'anode ou la cathode jouant un rôle.

Bien que les mécanismes ne soient pas encore clairs quant à la façon dont les CEM affectent les plantes, les effets oxydatifs semblent jouer un rôle important. Des changements oxydatifs ont été signalés dans de nombreuses études sur les plantes après une exposition aux CEM [578, 639, 661-671]. Le stress lié aux CEM a été proposé par Vian et al [641, 642], Roux et al [672, 673], et Radhakrishna et al [640]. D'autres mécanismes affectant les plantes tels que le ferromagnétisme, les paires de radicaux, les ions calcium et les crypto-chromes ont également été proposés [674, 675].

Il est évident que la croissance et la physiologie des plantes - dont le système racinaire est ancré dans le sol et la "tête" dans l'air - sont affectées par l'exposition aux CEM de manière synergique et complexe et qu'elles sont sensibles aux expositions multifréquences tout au long de leur vie.

## Conclusion

Les effets des CEM naturels et artificiels sur une large gamme de fréquences, d'intensités, de formes d'ondes et de caractéristiques de signalisation ont été observés chez toutes les espèces animales et végétales étudiées. La base de données est maintenant volumineuse, avec des études *in vitro*, *in vivo* et sur le terrain à partir desquelles il est possible d'extrapoler. La majorité des études ont révélé des effets biologiques à des expositions artificielles de haute et de basse intensité, dont beaucoup ont des implications pour la santé et la viabilité de la faune. Il est clair que les niveaux environnementaux ambiants sont biologiquement actifs chez toutes les espèces non humaines qui peuvent avoir des mécanismes physiologiques uniques nécessitant des informations géomagnétiques naturelles pour les activités les plus importantes de leur vie. La magnétoréception sensible permet aux organismes vivants, y compris les plantes, de détecter de petites variations dans les CEM environnementaux et de réagir immédiatement ainsi qu'à long terme.



exquisément vulnérables aux champs artificiels. Les CEM anthropiques contribuent peut-être plus que nous ne le pensons actuellement à la diminution et à l'extinction des espèces. Les expositions continuent de s'intensifier sans que l'on comprenne que les CEM sont un agent causal et/ou cofacteur potentiel. Il est temps de reconnaître les CEM ambiants comme un nouveau facteur de stress potentiel pour d'autres espèces, de concevoir des technologies permettant de réduire les expositions au niveau le plus bas possible, de câbler les systèmes autant que possible pour réduire les RFR ambiants, et de créer des lois en conséquence - un sujet exploré plus en détail dans la troisième partie.

**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'intérêt.

**Consentement éclairé :** Non applicable.

**Approbation éthique :** Non applicable.

## Partie 2 : les suppléments

**Supplément 1 : Effets génétiques de l'exposition aux RFR**

**Supplément 2 : Effets génétiques d'une exposition aux CEM statiques/ELF de faible intensité**

**Supplément 3 : Effets biologiques chez les animaux et les plantes exposés à des RF de faible intensité**

**Supplément 4 : Effets des CEM sur la croissance des plantes**

## Références

1. Besser B. Synopsis du développement historique des résonances de Schumann. *Radio Sci* 2007;42:RS2S02.
2. Balser M, Wagner CA. Measurements of the spectrum of radio noise from 50 to 100 cycles per second 1. *J Res Nat Bur Stand D Radio Propag* 1960;64D:34-42.
3. NASA. 2021. [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/news/gallery/schumann-resonance.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/schumann-resonance.html).
4. Friedman JS. Out of the blue, a history of lightning : science, superstition, and amazing stories of survival. NY : Delecor Press ; 2008:101 p.
5. Adey WR. Les champs électromagnétiques et l'essence des systèmes vivants. In : Andersen JB, éditeur. *Modern radio science*. New York, NY, USA : Oxford University Press ; 1990:1-37 pp.
6. Becker RO. Cross currents, the perils of electropollution, the promise of electromedicine. Los Angeles, USA : Jeremy Tarcher ; 1990:67-81 pp.
7. Levitt BB. Champs électromagnétiques : A consumer's guide to the issues and how to protect ourselves. Orlando, FL, USA : First edition Harcourt Brace and Co. 1995. iUniverse Authors Guild [Backinprint.com](https://www.backinprint.com) édition 2007, Lincoln, NE, USA.
8. Levitt BB. Dépasser la paralysie des politiques publiques. In : Clements-Croome D, éditeur. *Environnements électromagnétiques et la santé dans les bâtiments*. New York, NY, USA : Spon Press ; 2004:501-18 pp.
9. Manzella N, Bracci M, Ciarapica V, Staffolani S, Straffella E, Rapisarda V, et al. Expression génique circadienne et champs magnétiques d'extrêmement basse fréquence : une étude in vitro. *Bioelectromagnetics* 2015;36:294-301.
10. UICN 2018. L'Union internationale pour la conservation de la nature version 2018-1. Liste rouge des espèces menacées ; 2018.
11. Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques, Paris, France (IPBES). Dans : Brondizio ES, Settele J, Díaz S, Ngo HT, éditeurs. *Rapport d'évaluation globale sur la biodiversité et les services écosystémiques de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques*. Bonn, Allemagne : Secrétariat de l'IPBES ; 2019.
12. Sanchez-Bayo F, Wyckhuys AG. Le déclin mondial de l'entomofaune : une revue de ses moteurs. *Biol Conserv* 2019;232 : 8-27.
13. Schultz CB, Brown LM, Pelton E, Crone EE. La surveillance par la science citoyenne démontre des déclinés dramatiques des papillons monarques dans l'ouest de l'Amérique du Nord. *Biol Conserv* 2017;214 : 343-6.
14. Société Xerces pour la conservation des invertébrés. 2019. Disponible sur : <https://xerces.org/monarchs/>.
15. Centre pour la diversité biologique. La population de papillons monarques chute de près d'un tiers, le papillon emblématique a diminué de plus de 80 % au cours des dernières décennies. 2017. Disponible sur : [https://www.biologicaldiversity.org/news/press\\_releases/2017\\_monarch-butterfly-02-09-2017.php](https://www.biologicaldiversity.org/news/press_releases/2017_monarch-butterfly-02-09-2017.php).
16. Guerra PA, Gegeer RJ, Reppert SM. Une boussole magnétique facilite la migration des papillons monarques. *Nat Commun* 2014;5:4164.
17. Marha K, Musil J, Tuha H. Les champs électromagnétiques et le cadre de vie. Prague, Hongrie : State Health Publishing House ; 1968. (Trans. SBN 911302-13-7, San Francisco Press, 1971).
18. Ceballos G, García A, Ehrlich PR. La sixième crise d'extinction : perte de populations animales et d'espèces. *J Cosmol* 2010;8:1821-31.
19. Ceballos G, Ehrlich PR, Barnosky AD, García A, Pringle RM, Palmer TM. Accélération des pertes d'espèces modernes induites par l'homme : entrée dans la sixième extinction de masse. *Sci Adv* 2015;1:e1400253.
20. Ceballos G, Ehrlich PR, Dirzo R. Annihilation biologique via la sixième extinction de masse en cours signalée par les pertes et les déclinés des populations de vertébrés. *Proc Natl Acad Sci Unit States Am* 2017;114 : E6089-96.
21. Weimerskirch H, Le Bouard F, Ryan PG, Bost CA. Déclin massif de la plus grande colonie de manchots royaux du monde à l'île aux Cochons, Crozet. *Anart Sci* 2018;30:236-42.
22. Manville AM, II. Impacts sur les oiseaux et les chauves-souris dus aux collisions et aux électrocutions de certaines structures hautes aux États-Unis - fils, tours, turbines et panneaux solaires : état des connaissances pour résoudre les problèmes. Dans : Angelici FM, éditeur. *Problematic wildlife : a cross-disciplinary approach*. New York, NY, USA : Springer International Publishers ; 2016:415-42 pp. Chap. 20.
23. Manville AM, II. Tours, turbines, lignes électriques et panneaux solaires : le bon, le mauvais et le laid pour les oiseaux migrateurs et les chauves-souris - mesures pour résoudre les problèmes. Présentation invitée : Classe de sciences et politiques de la terre, GEOL 420. George Mason University ; 2016:39 p. Diapositives PowerPoint disponibles en ligne.
24. Balmori A. Les effets du rayonnement micro-ondes sur la faune sauvage, résultats préliminaires ; 2003. Disponible sur : [http://www.emrpolity.org/litigation/case\\_law/beebe\\_hill/balmori\\_wildlife\\_study.pdf](http://www.emrpolity.org/litigation/case_law/beebe_hill/balmori_wildlife_study.pdf).

16. Balmori A. La pollution électromagnétique des antennes de téléphonie. Effets sur la faune. Pathophysiology. Electromagn Fields (EMF) Spec Issue 2009;16:191-9.
17. 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.
18. Balmori A. L'électrosmog et la conservation des espèces. Sci Total Environ 2014;496:314-16.
19. 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.
20. Balmori A. Radiotélémetrie et faune sauvage : mise en évidence d'une lacune dans les connaissances sur les effets des rayonnements radiofréquences. Sci Total Environ Part A 2016;543:662-9.
21. Balmori A. Le rayonnement électromagnétique comme facteur émergent du déclin des insectes. Sci Total Environ 2021;767:144913.
22. Cucurachi S, Tamis WLM, Vijver MG, Peijnenburg WJGM, Bolte JFB, de Snoo GR. Une revue des effets écologiques des champs électromagnétiques de radiofréquence (RF-EMF). Environ Int 2013 ; 51:116-40.
23. Sécurité des rayonnements électromagnétiques ; 2016. Disponible à l'adresse : <https://www.saferemr.com/2016/06/index.html>.
24. Krylov VV, Izyumov Yu G, Izekov EI, Nepomnyashchikh VA. Champs magnétiques et comportement des poissons. Biol Bull Rev 2014;4:222-31.
25. Panagopoulos DJ, Margaritis LH. Effets des rayonnements de la téléphonie mobile sur les organismes vivants. In : Buress RV, Harper AC, éditeurs. Mobile telephones. Hauppauge, NY, USA : Nova Science Publishers ; 2008:107-49 pp.
26. 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.
27. Tricas T, Gill A. Effects of EMFs from undersea power cables on Elasmobranchs and other marine species. Normandeau Associates, Exponent ; U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Regulation, and Enforcement, Pacific OCS Region. Camarillo, CA : Étude OCS BOEMRE 2011-09 ; 2011.
28. Chung D, Greshko M. L'agriculture industrielle : une cause de l'effondrement des populations d'oiseaux. Washington, DC, États-Unis : National Geographic ; 2018.
29. Enquête sur la reproduction des oiseaux en Amérique du Nord. 2017. Disponible sur : [https://www.usgs.gov/centers/pwrc/science/north-american-breeding-bird-survey?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/centers/pwrc/science/north-american-breeding-bird-survey?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects).
30. National Audubon Society. 2021. Disponible sur : <https://www.audubon.org/birds/flyways>.
31. Kolbert E. La sixième extinction, une histoire non naturelle. New York, NY, États-Unis : Henry Holdt & Co ; 2014.
32. Dawson A. Extinction : une histoire radicale. New York, NY, États-Unis : OR Books ; 2016. ISBN 978-1944869014:19 p.
33. Dirzo R, Young HS, Galetti M, Ceballos G, Isaac NJB, Collen B. Defaunation in the anthropocene. Science 2014;345:401-6.
34. Edwards LE. Qu'est-ce que l'anthropocène ? Eos 2015;96:6-7.
35. Ehlers E, Moss C, Krafft T. Earth system science in the anthropocene : emerging issues and problems. Allemagne : Springer Verlag Berlin ; 2006.
36. Ellis E. Anthropocène : une très courte introduction. New York, NY, États-Unis : Oxford University Press ; 2018.
37. Waters CN, Zalasiewicz J, Summerhayes C, Barnosky AD, Poirier C, Galuszka A. L'Anthropocène est fonctionnellement et stratigraphiquement distinct de l'Holocène. Science 2018;351 : aad2622.
38. Hallmann CA, Sorg M, Jongejans E, Siepel H, Hofland N, Schwan H, et al. Plus de 75 % de déclin sur 27 ans de la biomasse totale des insectes volants dans les zones protégées. PloS One 2017;12:e0185809.
39. Lister BC, Garcia A. Le déclin de l'abondance des arthropodes dû au climat restructure un réseau alimentaire de forêt tropicale. Proc Natl Acad Sci Unit States Am 2018;115:E10397-406.
40. Ark PA, Parry W. Application of high-frequency electrostatic fields in agriculture. Q Rev Biol 1940;16:172.
41. Michaelson SM, Lin JC. Effets biologiques et implications sanitaires des radiations de radiofréquence. New York, NY, USA : Plenum Press ; 1987.
42. Eder SHK, Cadiou H, Muhamad A, McNaughton PA, Kirschvink JL, Winklhofer M. Caractérisation magnétique de cellules magnétoréceptrices isolées candidates de vertébrés. Proc Natl Acad Sci Unit States Am 2012;109:12022-7.
43. Kobayashi A, Kirschvink J. Magnétoréception et effets des champs électromagnétiques : perception sensorielle du champ géomagnétique chez les animaux et les humains. In : Blank M, éditeur. Champs électromagnétiques, interactions et mécanismes biologiques. Adv Chem Series. Washington, DC : Oxford University Press ; 1995, vol 250:367-94 pp.
44. Kirschvink JL, Kuwajima T, Ueno S, Kirschvink SJ, Diaz-Ricci JC, Morales A, et al. Discrimination of low-frequency magnetic fields by honeybees : biophysics and experimental tests. In : Corey DP, Roper SD, éditeurs. Sensory Transduction, Society of General Physiologists, 45th Annual Symposium. New York, NY, USA : Rockefeller University Press ; 1992:225-40 pp.
45. 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.
46. Heyers D, Manns M, Luksch H, Güntürkün O, Mouritsen H. A visual pathway links brain structures active during magnetic compass orientation in migratory birds. PloS One 2007;2:e937.
47. Moller A, Sagasser S, Wiltschko W, Schierwater B. Retinal cryptochrome in a migratory passerine bird : a possible transducer for the avian magnetic compass. Naturwissenschaften 2004;91:585-8.
48. Collett TS, Barron J. Biological compasses and the coordinate frame of landmark memories in honeybees. Nature 1994;386 : 137-40.
49. Quinn TP, Merrill RT, Brannon EL. Détection des champs magnétiques chez le saumon rouge. J Exp Zool 2005;217:137-42.
50. Balode Z. Assessment of radio-frequency electromagnetic radiation by the micronucleus test in bovine peripheral erythrocytes. Sci Total Environ 1996;180:81-5.
51. Holland RA, Kirschvink JL, Doak TG, Wikelski M. Bats use magnetoreception to detect the earth's magnetic field. PloS One 2008;3:e1676.
52. Gegeer RJ, Casselman A, Waddell S, Reppert SM. Cryptochrome mediates light-dependent magnetosensitivity to *Drosophila*. Nature 2008;454:1014-18.
53. Ratner SC. Mouvements cinétiques dans les champs magnétiques de chitons à structure ferromagnétique. Behav Biol 1976;17:573.
54. Blakemore R. Bactéries magnétotactiques. Science 1975;190:377.

55. Yong E. Les Robins peuvent littéralement voir les champs magnétiques, mais seulement si leur vision est nette. New York, NY, USA : [DiscoverMagazine.com](http://blogs.discovermagazine.com/notrocketscience/2010/07/08/robins-can-literally-see-magnetic-fields-but-only-if-their-vision-is-sharp/#.WlU2d3IG3Z4) ; 2010. Disponible à l'adresse : <http://blogs.discovermagazine.com/notrocketscience/2010/07/08/robins-can-literally-see-magnetic-fields-but-only-if-their-vision-is-sharp/#.WlU2d3IG3Z4>.
56. Morley EL, Robert D. Les champs électriques suscitent le ballooning chez les araignées. *Curr Biol* 2018;28:2324-30.
57. Vidal-Gadea A, Ward K, Beron C, Ghorashian N, Gokce S, Russell J, et al. Les neurones magnétosensibles médient l'orientation géomagnétique chez *Caenorhabditis elegans*. *Elife* 2015;4:e07493.
58. Van Huizen AV, Morton JM, Kinsey LJ, Von Kannon DG, Saad MA, Birkholz TR, et al. Les champs magnétiques faibles modifient la croissance médiée par les cellules souches. *Sci Adv* 2019;5:eau7201.
59. Begall S, Cervený J, Neef J, Vojtech O, Burda H. Alignement magnétique chez les bovins et les cerfs au pâturage et au repos. *Proc Natl Acad Sci Unit States Am* 2008;105:13451-5.
60. Burda H, Begall S, Cervený J, Neef J, Nemec P. Les champs électromagnétiques de fréquences extrêmement basses perturbent l'alignement magnétique des ruminants. *Proc Natl Acad Sci Unit States Am* 2009;106:5708-13.
61. Slaby P, Tomanova K, Vacha M. Les bovins au pâturage s'alignent effectivement sur l'axe nord-sud, mais l'alignement dépend de la densité du troupeau. *J Comp Physiol* 2013;199:695-701.
62. Fedorowicz MC. Un grand modèle pour la recherche sur les CEM, quelque part entre Vet-Journals et "Nature." Société de bioélectromagnétique ; 2014.
63. Cervený J, Begall S, Koubek P, Novakova P, Burda H. La préférence directionnelle max améliore la précision de la chasse chez les renards en quête de nourriture. *Biol Lett* 2011;7:355-7.
64. Hart V, Nováková P, Malkemper EP, Begall S, Hanzal V, Ježek M, et al. Les chiens sont sensibles aux petites variations du champ magnétique terrestre. *Front Zool* 2013;10:80.
65. Nießner C, Denzau S, Malkemper EP, Gross JC, Burda H, Winkhofer M, et al. Le cryptochrome 1 dans les photorécepteurs coniques de la rétine suggère un nouveau rôle fonctionnel chez les mammifères. *Sci Rep* 2016;6:21848.
66. Chulliat A, Macmillan S, Alken P, Beggan C, Nair M, Hamilton B, et al. The US/UK world magnetic model for 2015-2020 Technical Report. Boulder, CO : NOAA National Geophysical Data Center ; 2015.
67. Nelson B. Le nord magnétique se déplace de 30 miles par an, pourrait signaler un renversement des pôles. Ocala, FL, USA : [MNN.com](https://www.mnn.com/earth-matters/climate-weather/stories/magnetic-north-shifting-by-40-miles-a-year-might-signal-pole-r) Earth Matters ; 2019. Disponible sur : <https://www.mnn.com/earth-matters/climate-weather/stories/magnetic-north-shifting-by-40-miles-a-year-might-signal-pole-r>.
68. Lai H. Exposition aux champs électromagnétiques statiques et de fréquences extrêmement basses et radicaux libres cellulaires. *Electromagn Biol Med* 2019;38:231-48.
69. Manger PR, Pettigrew JD. Ultrastructure, nombre, distribution et innervation des électrorécepteurs et des mécanorécepteurs dans la peau du bec de l'ornithorynque, *Ornithorhynchus anatinus*. *Brain Behav Evol* 1996;48:27-54.
70. Montgomery JC, Bodznick D. Signals and noise in the elasmobranch electrosensory system. *J Exp Biol* 1999;202:1349-55.
71. von der Emde G. Active electrolocation of objects in weakly electric fish. *Exp Biol* 1999;202:1205-15.
72. Gaston KJ, Duffy JP, Gaston S, Bennie J, Davies TW. Altération humaine des cycles lumineux naturels : causes et conséquences écologiques. *Oecologia* 2014;176:917-31.
73. Gaston KJ, Visser ME, Holker F. Les impacts biologiques de la lumière artificielle la nuit : le défi de la recherche. *Phil Trans R Soc* 2015;B370 : 20140133.
74. Harder B. Privé de l'obscurité, l'écologie contre nature de la lumière artificielle la nuit. *Sci News* 2002;161:248-9.
75. Holker F, Wolter C, Perkin EK, Tockner K. Light pollution as a biodiversity threat. *Trends Ecol Evol* 2010;25:681-2.
76. Myers K. Les effets négatifs de la lumière artificielle sur la faune et la flore. Pays de Galles, Royaume-Uni : Inside Ecology ; 2018. Disponible à l'adresse suivante : <https://insideecology.com/2018/11/19/the-negative-effects-of-artificial-light-on-wildlife/>.
77. Davies TW, Bennie J, Inger R, Hempel de Ibarra N, Gaston KJ. Pollution lumineuse artificielle : les signatures spectrales changeantes modifient-elles l'équilibre des interactions entre espèces ? *Global Change Biol* 2013;19 : 1417-23.
78. Luginbuhl CB, Boley PA, Davis DR. L'impact de la distribution de puissance spectrale des sources lumineuses sur le skyglow. *J Quant Spectrosc Radiat Transf* 2014;139:21-6.
79. Evans WR, Akashi Y, Altman NS, Manville AM II. Response of night-migrating songbirds in cloud to colored and flashing light. *North Am Birds* 2007;60:476-88.
80. Brothers JR, Lohmann KJ. Preuve de l'empreinte géomagnétique et de la navigation magnétique dans le homing natal des tortues de mer. *Curr Biol* 2015;25:392-6.
81. 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.
82. 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.
83. Landler L, Painter MS, Youmans PW, Hopkins WA, Phillips JB. Alignement magnétique spontané par les tortues serpentes d'un an : association rapide du modèle d'entrée magnétique dépendant de la radiofréquence avec un nouvel environnement. *PloS One* 2015;10 : e0124728.
84. Hillman D, Stetzer D, Graham M, Goeke CL, Mathson KE, Van Horn HH, et al. Relation entre la qualité de l'énergie électrique et la production de lait des troupeaux laitiers. Document de présentation no.033116. Las Vegas, NV, USA : Réunion internationale de l'American Society of Agricultural Engineers ; 2003.
85. Hillman D, Goeke C, Moser R. Electric and magnetic fields (EMFs) affect milk production and behavior of cows : results using shielded-neutral isolation transformer. Dans : 12th International Conference on Production Diseases in Farm Animals. East Lansing, MI 48824 : Michigan State Univ., College of Veterinary Medicine ; 2004.
86. Hässig M, Jud F, Naegeli H, Kupper J, Spiess BM. Prévalence de la cataracte nucléaire chez les veaux de boucherie suisses et son lien possible avec les antennes de téléphonie mobile. *Schweiz Arch Tierheilkd* 2009;151:471-8.
87. Hässig M, Jud F, Spiess B. Augmentation de la fréquence de la cataracte nucléaire dans le mollet après l'érection d'une station de base de téléphonie mobile. *Schweiz Arch Tierheilkd* 2012;154:82-6. (Article en allemand).
88. Hässig M, Wullschlegel M, Naegeli H, Kupper J, Spiess B, Kuster N, et al. Influence du rayonnement non ionisant des stations de base sur l'activité des protéines redox chez les bovins. *BMC Vet Res* 2014;10:136.
89. Hydro. Réévaluation des capacités sans fil. Technologie en vedette : propagation électromagnétique sous-marine ; 2008. Disponible sur : <https://www.hydro-international.com/content/article/underwater-electromagnetic-propagation>.
90. Zipse DW. Death by grounding. Conférence technique PCIC ; 2008. 22 septembre 2008, IAS/PCIC 08-03 <https://doi.org/10.1109/PCICON.2008.4663964>.

0. Chu J. Un moustachu artificiel révèle la source de l'étrange capacité de **DE GRUYTER** détection des proies du phoque commun. Une étude révèle que le mouvement de " slalom " d'un moustachu aide les phoques à suivre et à poursuivre leurs proies. MIT News Office ; 2015.
1. Kalmijn AJ. Détection des champs électriques et magnétiques chez les poissons éleuthérobranchés. *Science* 1982;218:916.
2. Lin JC. Electromagnetic interaction with biological systems. New York, NY, USA : Plenum Press ; 1989.
3. Tenforde TS. Electro-réception et magnéto-réception dans les organismes simples et complexes. *Bioelectromagnetics* 1989;10:215-21.
4. Johnsen S, Lohmann KJ. The physics and neurobiology of magnetoreception. *Nat Rev Neurosci* 2005;6:703-12.
5. Johnsen S, Lohmann KJ. La magnéto-réception chez les animaux. *Phys Today* 2008;61:29-35.
6. Mouritsen H, Ritz T. Magnéto-réception et son utilisation dans la navigation des oiseaux. *Curr Opin Neurobiol* 2005;15:406-14.
7. Ritz T, Adem S, Schulten K. A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophys J* 2000;78:707-18.
8. Ritz T, Dommer DH, Phillips JB. Shedding light on vertebrate magnetoreception. *Neuron* 2002;34:503-6.
9. 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.
10. 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.
11. Ritz T, Ahmad M, Mouritsen H, Wiltschko R, Wiltschko W. Photoreceptor-based magnetoreception : optimal design of receptor molecules, cells, and neuronal processing. *J R Soc Interface* 2010;7:S135-46.
12. Frankel RB, Blakemore RP, Wolf RS. La magnétite dans les bactéries magnétotactiques d'eau douce. *Science* 1979;203:1355.
13. Blakemore RP, Frankel RB, Kalmijn A. South-seeking magnetotactic bacteria in the southern hemisphere. *Science* 1980;212:1269.
14. Frankel RB, Blakemore RP, Torres de Araujo FF, Esquivel DMS. Bactéries magnétotactiques à l'équateur géomagnétique. *Science* 1981;212:1269.
15. Presti D, Pettigrew JD. Ferromagnetic coupling to muscle receptors as a basis for geomagnetic field sensitivity in animals. *Nature* 1980;285:99-101.
16. Walcott C, Green RP. Orientation of homing pigeons altered by a change in direction of an applied magnetic field. *Science* 1974 ; 184:180-2.
17. Kirshvink JL, Lowenstam HA. Minéralisation et magnétisation des dents de chiton : implications paléomagnétiques, sédimentologiques et biologiques de la magnétite organique. *Earth Planet Sci Lett* 1979 ; 44:193-204.
18. Lowenstam HA. Magnetite in denticle capping in recent chitons (Polyplacophora). *Geol Soc Am Bull* 1962;73:435.
19. Gould JL, Kirshvink JL, Deffeyes KS. Bees have magnetic remanence. *Science* 1978;202:1026-8.
20. Hore PJ, Mouritsen H. The radical-pair mechanism of magnetoreception. *Annu Rev Biophys* 2016;45:299-344.
21. Hiscock HG, Mouritsen H, Manolopoulos DE, Hore PJ. Perturbation de l'orientation de la boussole magnétique chez les oiseaux migrants par les champs électromagnétiques de radiofréquence. *Biophys J* 2017;113 : 1475-84.
22. Pakhomov A, Bojarinova J, Cherbunin R, Chetverikova R, Grigoryev PS, Kavokin K, et al. Very weak oscillating magnetic field perturbs the magnetic compass of migratory birds. *J R Soc Interface* 2017;14:20170364.
23. Ahmad M, Galland P, Ritz T, Wiltschko R, Wiltschko W. Magnetic intensity affects cryptochrome-dependent responses in *Arabidopsis thaliana*. *Planta* 2007;225:615-24.
24. Blank M. Overpowered, what science tells us about the dangers of cell phones and other wifi-age devices. New York, NY, États-Unis : Seven Stories Press ; 2014:28-9 pp.
25. Wiltschko R, Wiltschko W. Magnéto-réception. *Bioessays* 2006 ; 28:157-68.
26. Wiltschko R, Thalau P, Gehring D, Nießner C, Ritz T, Wiltschko W. Magnéto-réception chez les oiseaux : l'effet des champs de radiofréquence. *J R Soc Interface* 2015;12:20141103.
27. Phillips JB, Sayeed O. Wavelength-dependent effects of light on magnetic compass orientation in *Drosophila melanogaster*. *J Comp Physiol* 1993;172:303-8.
28. 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.
29. Wiltschko W, Wiltschko R. Magnéto-réception chez les oiseaux : deux récepteurs pour deux tâches différentes. *J Ornithol* 2007;148 : S61-76.
30. Wiltschko R, Wiltschko W. Capter les directions magnétiques chez les oiseaux : processus de paire radicale impliquant le cryptochrome. *Biocapteurs* 2014;4:221-43.
31. Wiltschko R, Wiltschko W. Magnéto-réception chez les oiseaux. *J R Soc Interface* 2019;16:20190295.
32. 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.
33. Wiltschko R, Stapput K, Thalau P, Wiltschko W. Orientation directionnelle des oiseaux par le champ magnétique dans différentes conditions de lumière. *J R Soc Interface* 2010;7:S163-77.
34. Malkemper EP, Eder SH, Begall S, Phillips JB, Winkhofer M, Hart V, et al. Magnéto-réception chez la souris des bois (*Apodemus sylvaticus*) : influence de faibles champs radioélectriques modulés en fréquence. *Sci Rep* 2015;4:9917.
35. Malewski S, Begall S, Schleich CE, Antenucci CD, Burda H. Les mammifères souterrains utilisent-ils le champ magnétique terrestre comme indicateur de cap pour creuser des tunnels droits ? *Peer J* 2018;6 : e5819.
36. Wang CX, Hilburn IA, Wu DA, Mizuhara Y, Coust'e CP, Abrahams JNH, et al. Transduction du champ géomagnétique mise en évidence par l'activité de la bande alpha dans le cerveau humain. *eNeuro* 2019;6 : 0483-18.
37. McCarty DE, Carrubba S, Chesson AL, Frilot C, Gonzalez-Toledo E, Marino AA. Hypersensibilité électromagnétique : preuve d'un nouveau syndrome neurologique. *Int J Neurosci* 2011;21:670-6.
38. Johnsen S, Lohmann KJ, Warrant EJ. Navigation animale : un sens magnétique bruyant ? *J Exp Biol* 2020;223:jeb164921.
39. Phillips JL, Singh NP, Lai HC. Champs électromagnétiques et dommages à l'ADN. *Pathophysiology* 2009;16:79-88.
40. Lai H, Singh NP. Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 1995;16:207-10.
41. Lai H, Singh NP. Single and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int J Radiat Biol* 1996;69:513-21.



42. Lai H, Singh NP. La mélatonine et la N-tert-butyl- $\alpha$ -phénylnitronne bloquent les cassures simples et doubles de l'ADN induites par un champ magnétique de 60 Hz dans les cellules cérébrales de rat. *J Pineal Res* 1997;22 : 152-62.
43. Lai H, Singh NP. Acute exposure to a 60-Hz magnetic field increases DNA single strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 1997;18:156-65.
44. Lai H, Singh NP. Magnetic-field-induced DNA strand breaks in brain cells of the rat. *Environ Health Perspect* 2004;112:687-49.
45. Ahuja YR, Vijayashree B, Saran R, Jayashri EL, Manoranjani JK, Bhargava SC. Effets in vitro des champs électromagnétiques de faible niveau et de basse fréquence sur les dommages à l'ADN dans les leucocytes humains par le test des comètes. *Indian J Biochem Biophys* 1999;36:318-22.
46. Delimaris J, Tsilimigaki S, Messini-Nicolaki N, Ziros E, Piperakis SM. Effets des champs électriques pulsés sur l'ADN des lymphocytes humains. *Cell Biol Toxicol* 2006;22:409-15.
47. Hong R, Zhang Y, Liu Y, Weng EQ. Effets des champs électromagnétiques de fréquence extrêmement basse sur l'ADN des cellules testiculaires et la structure de la chromatine des spermatozoïdes chez les souris. *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi* 2005;23:414-17. [Article en chinois].
48. Ivancsits S, Diem E, Pilger A, Rudiger HW, Jahn O. Induction of DNA strand breaks by intermittent exposure to extremely-low-frequency electromagnetic fields in human diploid fibroblasts. *Mutat Res* 2002;519:1-13.
49. Ivancsits S, Diem E, Jahn O, Rudiger HW. Age-related effects on induction of DNA strand breaks by intermittent exposure to electromagnetic fields. *Mech Ageing Dev* 2003;124:847-50.
50. Ivancsits S, Pilger A, Diem E, Jahn O, Rudiger HW. Cell type-specific genotoxic effects of intermittent extremely low-frequency electromagnetic fields. *Mutat Res* 2005;583 : 184-8.
51. Jajte J, Zmyslony M, Palus J, Dziubaltowska E, Rajkowska E. Protective effect of melatonin against in vitro iron ions and 7 mT 50 Hz magnetic field-induced DNA damage in rat lymphocytes. *Mutat Res* 2001;483:57-64.
52. Lourencini da Silva R, Albano F, Lopes dos Santos LR, Tavares AD Jr., Felzenszwalb I. The effect of electromagnetic field exposure on the formation of DNA lesions. *Redox Rep* 2000;5:299-301.
53. Schmitz C, Keller E, Freuding T, Silny J, Korr H. L'exposition à un champ magnétique de 50 Hz influence la réparation de l'ADN et la synthèse de l'ADN mitochondrial de types cellulaires distincts dans le cerveau et le rein de souris adultes. *Acta Neuropathol* 2004;107:257-64.
54. Svedenstal BM, Johanson KJ, Mild KH. DNA damage induced in brain cells of CBA mice exposed to magnetic fields. *In Vivo* 1999 ; 13:551-2.
55. Winker R, Ivancsits S, Pilger A, Adlkofer F, Rudiger HW. Dommages chromosomiques dans les fibroblastes diploïdes humains par exposition intermittente à des champs électromagnétiques de fréquences extrêmement basses. *Mutat Res* 2005;585:43-9.
56. Wolf FI, Torsello A, Tedesco B, Fasanella S, Boninsegna A, D'Ascenzo M, et al. 50-Hz extremely low frequency electromagnetic fields enhance cell proliferation and DNA damage : possible involvement of a redox mechanism. *Biochim Biophys Acta* 2005;743:120-9.
57. Yokus B, Cakir DU, Akdag MZ, Sert C, Mete N. Oxidative DNA damage in rats exposed to extremely low frequency electromagnetic fields. *Free Radic Res* 2005;39:317-23.
58. Zmyslony M, Palus J, Jajte J, Dziubaltowska E, Rajkowska E. DNA damage in rat lymphocytes treated in vitro with iron cations and exposés à des champs magnétiques de 7 mT (statiques ou 50 Hz). *Mutat Res* 2000;453:89-96.
59. Chow K, Tung WL. Magnetic field exposure enhances DNA repair through the induction of DnaK/J synthesis. *FEBS Lett* 2000;478 : 133-6.
60. Robison JG, Pendleton AR, Monson KO, Murray BK, O'Neill KL. Decreased DNA repair rates and protection from heat induced apoptosis mediated by electromagnetic field exposure. *Bioelectromagnetics* 2002;23:106-12.
61. Sarimov R, Alipov ED, Belyaev IY. Les champs magnétiques de 50 hertz affectent individuellement la conformation de la chromatine dans les lymphocytes humains : dépendance de l'amplitude, de la température et de l'état initial de la chromatine. *Bioelectromagnetics* 2011;32:570-9.
62. Yakymenko I, Tsybulin O, Sidorik E, Henshel D, Kyrlylenko O, Kyrlylenko S. Mécanismes oxydatifs de l'activité biologique du rayonnement de radiofréquence de faible intensité. *Electromagn Biol Med* 2016 ; 35:186-202.
63. Sarkar S, Ali S, Behari J. Effect of low power microwave on the mouse genome : a direct DNA analysis. *Mutat Res* 1994;320:141-7.
64. Phillips JL, Ivaschuk O, Ishida-Jones T, Jones RA, Campbell-Beachler M, Haggren W. DNA damage in Molt-4 T-lymphoblastoid cells exposed to cellular telephone radiofrequency fields *in vitro*. *Bioelectrochem Bioenerg* 1998 ; 45:103-10.
65. Lai H. Effets génétiques des champs électromagnétiques non ionisants. *Electromagn Biol Med* 2021. (en ligne le 2/4/2021). <https://doi.org/10.1080/15368378.2021.1881866>.
66. Diem E, Schwarz C, Adlkofer F, Jahn O, Rudiger H. Non-thermal DNA breakage by mobile-phone radiation (1800-MHz) in human fibroblasts and in transformed GF5H-R17 rat granulosa cells in vitro. *Mutat Res* 2005;583:178-83.
67. 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.
68. Bagheri Hosseiniabadi M, Khanjani N, Mirzaii M, Norouzi P, Atashi A. Lésions de l'ADN dues à l'exposition professionnelle à long terme aux champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence chez les travailleurs des centrales électriques. *Mutat Res* 2019;846:403079.
69. Gandhi G, Kaur G, Nisar U. Une étude transversale de contrôle de cas sur les dommages génétiques chez les personnes résidant à proximité d'une station de base de téléphonie mobile. *Electromagn Biol Med* 2015;34:344-54.
70. Zendeheel R, Yu IJ, Hajipour-Verdom B, Panjali Z. Effets sur l'ADN d'une exposition professionnelle de faible niveau à des champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence (50/60 Hz). *Toxicol Ind Health* 2019;35 : 424-30.
71. Zothansiam, Zosangzuali M, Lalramdinpuii M, Jagetia GC. Impact du rayonnement radiofréquence sur les dommages à l'ADN et les antioxydants dans les lymphocytes du sang périphérique des humains résidant à proximité des stations de base de téléphonie mobile. *Electromagn Biol Med* 2017;36:295-305.
72. Marino A. Évaluation des risques sanitaires des tours de téléphonie mobile. In : Levitt BB, éditeur. *Tours cellulaires, commodité sans fil ou risques environnementaux ? Actes du "Cell Towers Forum" état de la science/état du droit*. Bloomington : iUniverse, Inc ; 2011:87-103 pp.
73. Groupe de travail BioInitiative. Rapport BioInitiative : justification d'une norme d'exposition du public fondée sur la biologie pour les champs électromagnétiques (ELF et RF). Rapport mis à jour : 2014/2020. Sage, C., Carpenter, D.O (eds.) ; 2012. Disponible à l'adresse : [www.bioinitiative.org](http://www.bioinitiative.org).



74. Blank M, Goodman R. L'ADN est une antenne fractale dans les champs électromagnétiques. *Int J Radiat Biol* 2011;87:409-15.
75. Werner DH, Ganguly S. An overview of fractal antenna engineering research. *IEEE Antenn Propag Mag* 2003;45 : 38-57.
76. Adey WR, Sheppard AR. Cell surface ionic phenomena in transmembrane signaling to intracellular enzyme systems. In : Blank M, Findl E, éditeurs. Mechanistic approaches to interactions of electric and electromagnetic fields with living systems. New York NY, USA : Plenum Press ; 1987:365-87 pp.
77. Adey WR. The sequence and energetics of cell membrane transductive coupling to intracellular enzyme systems. *Bioelectrochem Bioenerg* 1986;15:447-56.
78. Adey WR. Evidence of cooperative mechanisms in the susceptibility of cerebral tissue to environmental and intrinsic electric fields. Dans : Schmitt FO, Schneider DM, Crothers DM, éditeurs. Functional linkage in biomolecular systems. New York, NY, USA : Raven Press ; 1975:325-42 pp.
79. Adey WR. Modèles de membranes de cellules cérébrales comme substrats pour le stockage d'informations. *Biosystems* 1977;8:163-78.
80. Adey WR. Tissue interactions with nonionizing electromagnetic fields. *Physiol Rev* 1981;61:435-514.
81. 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., USA : American Chemical Soc ; 1981:271-97 pp.
82. Adey WR. Molecular aspects of cell membranes as substrates for interactions with electromagnetic fields. In : Basar E, Flohr H, Haken H, Mandell AJ, éditeurs. Synergistics of the brain. New York, NY, USA : Springer International Publisher ; 1983:201-11 pp.
83. Adey WR. Nonlinear, nonequilibrium aspects of electromagnetic field interactions at cell membranes. In : Adey WR, éditeur. Nonlinear electrodynamics in biological systems. Lawrence AF. New York, NY, USA : Plenum Press, 1984:3-22 pp.
84. Lawrence AF, Adey WR. Mécanismes d'ondes non linéaires dans les interactions entre les tissus excitables et les champs électromagnétiques. *Neurol Res* 1982;4:115-53.
85. Maddox J. Des physiciens sur le point de détourner l'ADN ? *Nature* 1986;324:11.
86. Goodman R, Bassett CA, Henderson AS. Pulsing electromagnetic fields induce cellular transcription. *Science* 1983;220:1283-5.
87. 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.
88. Blackman, CF. La prudence est-elle de mise dans le choix de l'emplacement des antennes relais ? Relier la science et la santé publique. Dans : Levitt BB, éditeur. Cell Towers, Wireless Convenience ? Or Environmental Hazard ? Actes du Forum sur les tours cellulaires, état de la science, état du droit. Bloomington, IN : iUniverse edition ; 2011:50-64 pp.
89. Pall ML. Les preuves scientifiques contredisent les conclusions et les hypothèses du Groupe canadien de sécurité 6 : les micro-ondes agissent par l'activation du canal calcique voltage-gated pour induire des impacts biologiques à des niveaux non-thermiques, soutenant un changement de paradigme pour l'action des micro-ondes/champs électromagnétiques de basse fréquence. *Rev Environ Health* 2015;30:99-116.
90. Bawin SM, Kaczmarek LK, Adey WR. Effets des champs VHF modulés sur le système nerveux central. *Ann NY Acad Sci* 1975;247:74-81.
91. Bawin SM, Adey WR. Sensibilité de la fixation du calcium dans le tissu cérébral à de faibles champs électriques environnementaux oscillant à basse fréquence. *Proc Natl Acad Sci Unit States Am* 1976;73 : 1999-2003.
92. Blackman CF, Benane SG, Elder JA, House DE, Lampe JA, Faulk JM. Induction of calcium-ion efflux from brain tissue by radiofrequency radiation : effect of sample number and modulation frequency on the power-density window. *Bioelectromagnetics* 1980;1:35-43.
93. Blackman CF, Benane SG, Joines WT, Hollis MA, House DE. Calcium-ion efflux from brain tissue : power-density versus internal field-intensity dependencies at 50-MHz RF radiation. *Bioelectromagnetics* 1980;1:277-83.
94. Blackman CF, Benane SG, Kinney LS, Joines WT, House DE. Effects of ELF fields on calcium-ion efflux from brain tissue in vitro. *Radiat Res* 1982;92:510-20.
95. Blackman CF, Kinney LS, House DE, Joines WT. Multiple power density windows and their possible origin. *Bioelectromagnetics* 1989;10:115-28.
96. Adey WR, Bawin SM, Lawrence AF. Effects of weak amplitude-modulated microwave fields on calcium efflux from awake cat cerebral cortex. *Bioelectromagnetics* 1982;3:295-307.
97. Blackman CF, Benane SG, Rabinowitz JR, House DE, Joines WTA. Role for the magnetic field in the radiation-induced efflux of calcium ions from brain tissue in vitro. *Bioelectromagnetics* 1985;6:327-37.
98. Liboff AR, Williams JT, Strong DM, Wistar JR. Time-varying magnetic fields : effect on DNA synthesis. *Science* 1984;223:818-20.
99. Liboff AR. Résonance cyclotronique géomagnétique dans les cellules vivantes. *J Biol Phys* 1985;13:99-102.
100. Yakymenko I, Burlaka A, Tsybulin O, Brieieva O, Buchynska L, Tsehmistrenko S, et al. Effets oxydatifs et mutagènes du rayonnement micro-ondes GSM 1800 MHz de faible intensité. *Exp Oncol* 2018 ; 40:282-7.
101. Blank M, Goodman R. Les champs électromagnétiques stressent les cellules vivantes. *Pathophysiology* 2009;16:71-8.
102. Goodman R, Blank M. Biosynthetic stress response in cells exposed to electromagnetic fields. In : Blank M, éditeur. Electromagnetic fields, biological interactions and mechanisms, *Advances in Chemistry Series* 250. Washington, DC : American Chemical Society ; 1995:425-36 pp.
103. Goodman R, Blank M. Magnetic field induces expression of hsp70. *Cell Stress Chaperones* 1998;3:79-88.
104. Pai VP, Lemire JM, Par'e JF, Lin G, Chen Y, Levin M. Les gradients endogènes de potentiel de repos modèlent de manière instructive le tissu neural embryonnaire via la signalisation notch et la régulation de la prolifération. *J Neurosci* 2015;35:4366-85.
105. Lai H. Neurological effects of radiofrequency electromagnetic radiation, presented at the "workshop on possible biological and health effects of RF electromagnetic fields". In : Mobile phone and health symposium. Vienne, Autriche : Université de Vienne ; 1998.
106. 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.
107. 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.
108. Vácha M, Puzová T, Kvicalová M. Les champs magnétiques de radiofréquence perturbent la magnétoréception de la blatte américaine. *J Exp Biol* 2009;212:3473-7.

109. Shepherd S, Lima MAP, Oliveira EE, Sharkh SM, Jackson CW, Newland PL. Les champs électromagnétiques de fréquences extrêmement basses altèrent les capacités cognitives et motrices des abeilles domestiques. *Sci Rep* 2018;8:7932.
110. Hart V, Kušta T, Němec P, Bláhová V, Ježek M, Nováková P, et al. L'alignement magnétique chez les carpes : preuve par le marché aux poissons de Noël tchèque. *PLoS One* 2012;7:e51100.
111. Hart V, Malkemper EP, Kušta T, Begall S, Nováková P, Hanzal V, et al. Préférence de la boussole directionnelle pour l'atterrissage chez les oiseaux aquatiques. *Front Zool* 2013;10:38.
112. 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.
113. 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.
114. Schwarze S, Schneibder 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 (*Erithacus rubecula*) que les forts champs à bande étroite. *Front Behav Neurosci* 2016;10:55.
115. La Vignera S, Condorelli RA, Vicari E, D'Agata R, Calogero AE. Effets de l'exposition aux téléphones mobiles sur la reproduction masculine : une revue de la littérature. *J Androl* 2012;33:350-6.
116. Merhi ZO. Contester l'impact des téléphones cellulaires sur la reproduction : une revue. *J Assist Reprod Genet* 2012;29:293-7.
117. Magras IN, Xenos TD. RF-induced changes in the prenatal development of mice. *Bioelectromagnetics* 1997;18:455-61.
118. Aldad TS, Gan G, Gao XB, Taylor HS. L'exposition fœtale aux radiations radiofréquences des téléphones cellulaires classés 800-1900 MHz affecte le neurodéveloppement et le comportement chez la souris. *Sci Rep* 2012;2:312.
119. Meral I, Mert H, Mert N, Deger Y, Yoruk I, Yetkin A, et al. Effects of 900-MHz electromagnetic field emitted from cellular phone on brain oxidative stress and some vitamin levels of Guinea pigs. *Brain Res* 2007;1169:120-4.
120. Lai H, Horita A, Guy AW. Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat. *Bioelectromagnetics* 1994;15:95-104.
121. Cassel JC, Cosquer B, Galani R, Kuster N. Whole-body exposure to 2.45 GHz electromagnetic fields does not alter radial-maze performance in rats. *Behav Brain Res* 2004;155:37-43.
122. Cobb BL, Jauchem J, Adair ER. Radial arm maze performance of rats following repeated low level microwave radiation exposure. *Bioelectromagnetics* 2004;25:49-57.
123. Cosquer B, Galani R, Kuster N, Cassel JC. Whole-body exposure to 2.45 GHz electromagnetic fields does not alter anxiety responses in rats : a plus-maze study including test validation. *Behav Brain Res* 2005;156:65-74.
124. Lai, H. Un résumé de la littérature récente (2007-2017) sur les effets neurobiologiques des radiations de radiofréquence. Dans : Markov M, éditeur. *Les communications mobiles et la santé publique*. Boca Raton, FL, USA : CRC Press ; 2018, chapitre 8:187-222 pp.
125. Daniels WM, Pitout IL, Afullo TJ, Mabandla MV. The effect of electromagnetic radiation in the mobile phone range on the behaviour of the rat. *Metab Brain Dis* 2009;24:629-41.
126. Lee HJ, Lee JS, Pack JK, Choi HD, Kim N, Kim SH, et al. Absence de tératogénicité après exposition combinée de souris gravides à des champs électromagnétiques de radiofréquence CDMA et WCDMA. *Radiat Res* 2009;172:648-52.
127. Lee HJ, Jin YB, Kim TH, Pack JK, Kim N, Choi HD, et al. Les effets de l'exposition combinée simultanée aux champs électromagnétiques CDMA et WCDMA sur la fonction testiculaire du rat. *Bioelectromagnetics* 2012;33:356-64.
128. Poulietier de Gannes F, Haro E, Hurtier A, Taxile M, Athane A, Ait-Aissa S, et al. Effet de l'exposition in utero au Wi-Fi sur le développement pré- et postnatal des rats. *Res B Dev Reprod Toxicol* 2012 ; 95:130-6.
129. Imai N, Kawabe M, Hikage T, Nojima T, Takahashi S, Shirai T. Effects on rat testis of 1.95-GHz W-CDMA for IMT-2000 cellular phones. *Syst Biol Reprod Med* 2011;57:204-9.
130. Kolomytseva MP, Gapeev AB, Sadovnikov VB, Chemeris NK. Suppression de la résistance non spécifique de l'organisme sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique de fréquence extrêmement élevée et de faible intensité. *Biofizika* 2002;47:71-7. (Article en russe).
131. Balmori A. Murci'elago rabudo-Tadarida *teniotis*. In : Carrascal LM, Salvador A, éditeurs. *Enciclopedia Virtual de los Vertebrados Españoles*. Madrid, Espagne : Museo Nacional de Ciencias Naturales ; 2004.
132. Jana B, Selakovi V, Rauš S, Radenovi L, Zrni M, Proli Z. Modèles temporels de changements de comportement moteur induits par un champ magnétique de fréquence extrêmement basse chez des gerbilles de Mongolie d'âge différent. *Int J Radiat Biol* 2012;88:359-66.
133. 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. (article en allemand).
134. Löscher W. Survey of effects of radiofrequency electromagnetic fields on production, health and behavior of farm animals. *Der Prakt Tierarzt* 2003;84:11. (article en allemand).
135. Stärk KD, Krebs T, Altpeter E, Manz B, Griot TC, Abelin T. Absence d'effet chronique de l'exposition à un signal de radiodiffusion à ondes courtes sur les concentrations de mélatonine salivaire chez les bovins laitiers. *J Pineal Res* 1997;22:171-6.
136. Hultgren J. Small electric currents affecting farm animals and man : a review with special reference to stray voltage. I. Electrical properties of the body and the problem of stray voltage. *Vet Res Commun* 1990;14:287-98.
137. Hultgren J. Small electric currents affecting farm animals and man : a review with special reference to stray voltage. II. Effets physiologiques et concept de stress. *Vet Res Commun* 1990;14:299-308.
138. Kirk JH, Reese ND, Bartlett PC. Tension parasite dans les fermes laitières du Michigan. *J Amer Vet Assoc* 1984;185:426-8.
139. Burchard JF, Nguyen DH, Block E. Progesterone concentrations during estrous cycle of dairy cows exposed to electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 1998;19:438-43.
140. Rodriguez M, Petitclerc D, Burchard JF, Nguyen DH, Block E, Downey BR. Réponses du cycle œstral 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.
141. Burchard JF, Monardes H, Nguyen DH. Effet de champs électriques et magnétiques de 10kV, 30  $\mu$ T, 60 Hz sur la production de lait et la prise alimentaire chez des vaches laitières non gestantes. *Bioelectromagnetics* 2003 ; 24:557-63.
142. Burchard JF, Nguyen DH, Rodriguez R. Concentrations plasmatiques de thyroxine chez les vaches laitières exposées à des champs électriques et magnétiques de 60 Hz. *Bioelectromagnetics* 2006;27:553-9.
143. Hjeresen DL, Miller MC, Kaune KT, Phillips RD. Réponse comportementale des porcs à un champ électrique de 60 Hz. *Bioelectromagnetics* 1982;3:443-51.

- 144.Sikov MR, Rommereim DN, Beamer JL, Buschbom RL, Kaune WT, Phillips DE GRUYTER RW. Developmental studies of Hanford miniature swine exposed to 60-Hz electric fields. *Bioelectromagnetics* 1987;8 : 229-42.
- 145.Bigu-del-Blanco J, Romero-Sierra C. The properties of bird feathers as converse piezoelectric transducers and as receptors of microwave radiation. I. Les plumes d'oiseaux comme transducteurs piézoélectriques inversés. *Biotélémétrie* 1975a;2:341-53.
- 146.Bigu-del-Blanco J, Romero-Sierra C. The properties of bird feathers as converse piezoelectric transducers and as receptors of microwave radiation. II. Les plumes d'oiseaux comme récepteurs diélectriques du rayonnement micro-ondes. *Biotélémétrie* 1975b;2:354-64.
- 147.Tanner JA. Effet des radiations micro-ondes sur les oiseaux. *Nature* 1966 ; 210:636.
- 148.Tanner JA, Romero-Sierra C, Davie SJ. Effets non-thermiques des radiations micro-ondes sur les oiseaux. *Nature* 1967;216:1139.
- 149.van Dam W, Tanner JA, Romero-Sierra C. A preliminary investigation of piezoelectric effects in chicken feathers. *IEEE Trans Biomed Eng* 1970;17:71.
- 150.Manville AM, II. The ABC's of avoiding bird collisions at communications towers : the next steps. In : Proceedings of the avian interactions workshop. USA : Charleston, SC ; 1999.
- 151.Manville AM, II. U.S. fish and wildlife service involvement with towers, turbines, power lines, buildings, bridges and MBTA E.O. 13186 MOUs - Lessons learned and next steps. migratory bird treaty act meeting - a workshop held in the Washington fish and wildlife office. Lacey, WA : 32 diapositives PowerPoint ; 2009.
- 152.Manville AM, II. Tours, turbines, lignes électriques et bâtiments - mesures prises par l'U.S. Fish and Wildlife Service pour éviter ou minimiser les prises d'oiseaux migrants sur ces structures. Dans : Rich TD, Arizmendi C, Demarest DW, Thompson C, éditeurs. De la toundra aux tropiques : Connecting Birds, Habitats and People. Actes de la 4e conférence internationale Partners in Flight. Texas, USA : McAllen ; 2009:262-72 pp.
- 153.Beason RC, Semm P. Responses of neurons to amplitude modulated microwave stimulus. *Neurosci Lett* 2002;333:175-8.
- 154.Semm P, Beason RC. Responses to small magnetic variations by the trigeminal system of the bobolink. *Brain Res Bull* 1990;25 : 735-40.
- 155.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.
- 156.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.
- 157.Grigor'ev I. Biological effects of mobile phone electromagnetic field on chick embryo (risk assessment using the mortality rate). *Radiats Biol Radioecol* 2003;43:541-3.
- 158.Xenos TD, Magras IN. Effets du rayonnement RF à faible densité de puissance sur les embryons et les fœtus d'animaux de laboratoire. In : Stavroulakis P, éditeur. Biological effects of electromagnetic fields. New York, NY, USA : Springer International Publishers ; 2003:579-602 pp.
- 159.Batellier F, Couty I, Picard D, Brillard JP. Effets de l'exposition d'œufs de poule à un téléphone portable en position "appel" pendant toute la période d'incubation. *Theriogenology* 2008;69:737-45.
- 160.Tsybulin O, Sidorik E, Kyrylenko S, Henshel D, Yakymenko I. Le rayonnement micro-ondes GSM 900 MHz affecte le développement embryonnaire des cailles japonaises. *Electromagn Biol Med* 2012;31:75-86.
- 161.Tsybulin O, Sidorik E, Brieieva O, Buchynska L, Kyrylenko S, Henshel D, et al. Le rayonnement du téléphone cellulaire GSM 900 MHz peut stimuler ou déprimer l'embryogenèse précoce chez les cailles japonaises en fonction de la durée d'exposition. *Int J Radiat Biol* 2013;89:756-63.
- 162.Berman E, Chacon L, House D, Koch BA, Koch WE, Leal J. Development of chicken embryos in a pulsed magnetic field. *Bioelectromagnetics* 1990;11:169-87.
- 163.Ubeda A, Trillo MA, Chacón L, Blanco MJ, Leal J. Le développement de l'embryon de poulet peut être irréversiblement altéré par une exposition précoce à de faibles champs magnétiques de très basse fréquence. *Bioelectromagnetics* 1994;15:385-98.
- 164.Fernie KJ, Bird DM, Petittclerc D. Effects of electromagnetic fields on photophasic circulating melatonin levels in American kestrels. *Environ Health Perspect* 1999;107:901-4.
- 165.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.
- 166.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.
- 167.Fernie KJ, Bird DM. Evidence of oxidative stress in American kestrels exposed to electromagnetic fields. *Environ Res* 2001 ; 86:198-207.
- 168.Fernie KJ, Reynolds SJ. The effects of electromagnetic fields from power lines on avian reproductive biology and physiology : a review. *Toxicol Environ Health B Crit Rev* 2005;8:127-40.
- 169.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.
- 170.Bernhardt JH. Sécurité des rayonnements non ionisants : rayonnements de radiofréquence, champs électriques et magnétiques. *Phys Med Biol* 1992;37 : 80-4.
- 171.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.
- 172.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.
- 173.Southern W. Orientation of gull chicks exposed to Project Sanguine's electromagnetic field. *Science* 1975;189:143.
- 174.Larkin RP, Sutherland PJ. Migrating birds respond to Project Seafarer's electromagnetic field. *Science* 1977;195:777-9.
- 175.U.S. Fish and Wildlife Service. Birds of Conservation Concern. Arlington, VA, USA : United States Department of Interior, Fish and Wildlife Service, Division of Migratory Bird Management ; 2008:85 p.
- 176.Windle BC. Les effets de l'électricité et du magnétisme sur le développement. *J Anat Physiol* 1895;29:346-51.
- 177.Mckinley GM, Charles DR. Certains effets biologiques des champs de haute fréquence. *Science* 1930;71:490.
- 178.Frings H. Factors determining the effects of radio-frequency electromagnetic fields on insects and the materials they infect. *J Econ Entomol* 1952;45:396.
- 179.Carpenter RI, Livingstone EM. Evidence for nonthermal effects of microwave radiation : abnormal development of irradiated insect pupae. *IEEE Trans Microw Theor Tech* 1971;MMT-19:173.
- 180.Imig CJ, Searle GW. Review of work conducted at State University of Iowa on organisms exposed to 2450 mc cw microwave irradiation. Rome, NY, USA : Griffin AFB, Rome Air Development Center ; 1962.

181. Searle GW, Duhlen RW, Imig CJ, Wunder CC, Thomson JD, Thomas JA, et al. Effect of 2450 mc microwaves in dogs, rats, and larvae of the common fruit fly. In : Peyton MF, éditeur. Biological effects of microwave radiation, vol 1. New York, NY, USA : Plenum Press ; 1961:187 p.
182. Beyer EC, Pay TL, Irwin ET Jr. Development and genetic testing of *Drosophila* with 2450 MHz microwave radiation. In : Hodge DM, éditeur. Radiation bio-effects summary report ; 1970:45 p.
183. Heller JH, Mickey GH. Effets non-thermiques de la radiofréquence dans les systèmes biologiques. In : Digest of the 1961 International Conference on Medical Electronics. New York, NY, USA : Plenum Press ; 1961:152 p.
184. Tell RA. Caractéristiques d'absorption des micro-ondes de *Drosophila melanogaster*. Dans : Rapport annuel du laboratoire de recherche de Twinbrook. Washinton, D.C., USA : EPA ; 1971:155 p.
185. Weisbrot D, Lin H, Ye L, Blank M, Goodman R. Effects of mobile phone radiation on reproduction and development in *Drosophila melanogaster*. J Cell Biochem 2003;89:48-55.
186. Panagopoulos DJ, Chavdoula ED, Nezis IP, Margaritis LH. Cell death induced by GSM 900-MHz and DCS 1800-MHz mobile telephony radiation. Mutat Res 2007;626:69-78.
187. Panagopoulos DJ, Messini N, Karabarounis A, Philippitis AL, Margaritis LH. Radio frequency electromagnetic radiation within "safety levels" alters the physiological function of insects. In : Kostarakis P, Stavroulakis P, éditeurs. Proceedings of the Millennium International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields. Grèce : Heraklion, Crete ; 2000:169-75 pp.
188. Panagopoulos DJ, Margaritis LH. Considérations théoriques sur les effets biologiques des champs électromagnétiques. In : Stavroulakis P, éditeur. Effets biologiques des champs électromagnétiques. New York, N, USA : Springer International Publishers ; 2003:5-33 pp.
189. 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.
190. Gonet B, Kosik-Bogacka DI, Kuźna-Grygiel W. Effets des champs magnétiques d'extrêmement basse fréquence sur l'oviposition de *Drosophila melanogaster* sur trois générations. Bioelectromagnetics 2009;30:687-9.
191. Savi T, Jana B, Todorovi D, Proli Z. Le développement embryonnaire et post-embryonnaire chez deux espèces de drosophiles exposées au champ magnétique statique de 60 mT. Electromagn Biol Med 2011 ; 30:108-14.
192. Newland PL, Hunt E, Sharkh SM, Hama N, Takahata M, Jackson CW. Détection des champs électriques statiques et évitement comportemental chez les cafards. J Exp Biol 2008;211:3682-90.
193. Proli Z, Jovanovi R, Konjevi G, Jana B. Behavioral differences of the insect *morimus funereus* (Coleoptera, Cerambycidae) exposed to an extremely low frequency magnetic field. Electromagn Biol Med 2003;22:63-73.
194. Berberich G, Berberich M, Grumpe A, Wöhler C, Schreiber U. Premiers résultats d'un suivi de trois ans des changements comportementaux des fourmis rouges des bois et de leur possible corrélation avec les événements sismiques. Animals 2013;3:63-84.
195. Anderson JB, Vander Meer RK. Orientation magnétique chez la fourmi de feu, *Solenopsis invicta*. Naturwissenschaften 1993;80 : 568-70.
196. Banks AN, Srygley RB. Orientation par champ magnétique chez les fourmis coupeuses de feuilles, *Atta colombica* (Hymenoptera : formicidae). Ethologie 2003;109:835-46.
197. Jander R, Jander U. La boussole lumineuse et magnétique de la fourmi tisserande, *Oecophylla smaragdina*, (Hymenoptera : formicidae). Ethologie 1998;104:743-58.
198. Esquivel DMS, Acosta-Avalos D, El-Jaick LJ, Cunha ADM, Malheiros MG, Wajnberg E. Evidence for magnetic material in the fire ant *Solenopsis* [sp.by](#) electron paramagnetic resonance measurements. Naturwissenschaften 1999;86:30-2.
199. Riveros AJ, Srygley RB. Les fourmis coupeuses de feuilles, *Atta colombica*, orientent-elles leur vecteur domestique intégré au chemin avec une boussole magnétique ? Anim Behav 2008;75:1273e1281.
200. Acosta-Avalos D, Pinho AT, de Souza Barbosa J, Belova N. Les champs magnétiques alternatifs de 60 Hz affectent l'orientation magnétique et la magnétosensibilité des fourmis de feu. J Insect Behav 2015;28:664-73.
201. Camlitepe Y, Aksoy V, Uren N, Yilmaz A. An experimental analysis on the magnetic field sensitivity of the black-meadow ant *Formica pratensis* Retzius (Hymenoptera : formicidae). Acta Biol Hung 2005;56:215-24.
202. 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.
203. 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.
204. 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.
205. Vander Meer RK, Slowik TJ, Thorvilson HG. Semiochimiques libérés par les fourmis de feu importées rouges stimulées électriquement, *Solenopsis invicta*. J Chem Ecol 2002;28:2585-600.
206. Forel A. Les sens des insectes. Londres, Royaume-Uni : Methuen & Co ; 1886. Traduction anglaise 1908.
207. Wang Q, Goodger JQD, Woodrow IE, Elgar MA. Signaux d'hydrocarbures cuticulaires spécifiques à un emplacement chez un insecte social. Proc Biol Sci 2016;283:20160310.
208. Acosta-Avalos D, Wajnberg E, Oliveira PS, Leal I, Farina M, Esquivel DMS. Isolation de nanoparticules magnétiques à partir de fourmis *Pachycondyla marginata*. J Exp Biol 1999;202:2687-92.
209. Wajnberg E, Acosta-Avalos D, El-Jaick LJ, Abracado L, Coelho JLA, Bazukis AF, et al. Étude par résonance paramagnétique électronique des abdominaux de la fourmi migratrice *Pachycondyla marginata*. Biophys J 2000;78:1018-23.
210. Wajnberg E, Cernicchiaro GR, Esquivel DMS. Les antennes : la partie la plus magnétique de la fourmi migratrice. Biometals 2004 ; 17:467-70.
211. de Oliveira JF, Wajnberg E, de Souza Esquivel DM, Weinkauff S, Winkhofer M, Hanzlik M. Ant antennes : sont-ils des sites de magnétoréception ? J R Soc Interface 2010;7:143-52.
212. Vargová B, Kurimsk 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.
213. Vargová B, Majláth I, Kurimsk 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.
214. Frątczak M, Vargová B, Tryjanowski P, Majláth I, Jerzak L, Kurimsk J, et al. Les tiques infectées *Ixodes ricinus* sont attirées par



- rayonnement électromagnétique de 900 MHz. Tiques Tick-borne Dis 2020;11:101416.
215. Brower LP. Understanding and misunderstanding the migration of the monarch butterfly (Nymphalidae) in North America : 1857- 1995. J Lepid Soc 1995;49:304-85.
  216. Brower LP. Orientation du papillon monarque : pièces manquantes d'un magnifique puzzle. J Biol 1996;199:93-103.
  217. Urquhart FA. Le papillon monarque. Toronto, Canada : University of Toronto Press ; 1960.
  218. Urquhart FA. Found at last : the monarch's winter home. Natl Geogr 1976;150:161-73.
  219. Urquhart FA, Urquhart NR. Voies de migration automnale de la population orientale du papillon monarque (*Danaus p. plexippus* L ; Danaidae ; Lepidoptera) en Amérique du Nord vers le site d'hivernage du plateau néovolcanique du Mexique. Can J Zool 1978;56:1759-64.
  220. Reppert SM, Gegear RJ, Merlin C. Navigational mechanisms of migrating monarch butterflies. Trends Neurosci 2010;33 : 399-406.
  221. Reppert SM, de Roode JC. Démystifier la migration des papillons monarques. Curr Biol 2018;28:R1009-22.
  222. Froy O, Gotter AL, Casselman AL, Reppert SM. Illumination de l'horloge circadienne dans la migration du papillon monarque. Science 2003 ; 300:1303-5.
  223. Lohmann KJ. Sea turtles : navigating with magnetism. Curr Biol 2007;17:R102-104.
  224. Merlin C, Gegear RJ, Reppert SM. Les horloges circadiennes antennaires coordonnent l'orientation de la boussole solaire chez les papillons monarques migrants. Science 2009;325:1700-4.
  225. Mouritsen H, Frost BJ. Virtual migration in tethered flying monarch butterflies reveals their orientation mechanisms. Proc Natl Acad Sci Unit States Am 2002;99:10162-6.
  226. Oliveira EG, Dudley R, Srygley RB. Evidence for the use of a solar compass by neotropical migratory butterflies. Bull Ecol Soc Am 1996;77:332.
  227. Oliveira EG, Srygley RB, Dudley R. Les papillons migrants néotropicaux naviguent-ils à l'aide d'une boussole solaire ? J Exp Biol 1998;201 : 3317-31.
  228. Perez SM, Taylor OR. Le comportement migratoire des papillons monarques persiste malgré les changements des conditions environnementales. In : Oberhauser KS, Solensky MJ, éditeurs. The monarch butterfly : biology and conservation. Cornell, NY, USA : Cornell University Press ; 2004:85-9 pp.
  229. Perez SM, Taylor OR, Jander R. A sun compass in monarch butterflies. Nature 1997;387:29.
  230. Perez SM, Taylor OR, Jander R. The effect of a strong magnetic field on monarch butterfly (*Danaus plexippus*) migratory behavior. Naturwissenschaften 1999;86:140-3.
  231. Reppert SM. Un modèle coloré de l'horloge circadienne. Cell 2006 ; 124:233-6.
  232. Reppert SM. The ancestral circadian clock of monarch butterflies : role in time-compensated sun compass orientation. Cold Spring Harbor Symp Quant Biol 2007;72:113-18.
  233. Reppert SM, Zhu H, White RH. Polarized light helps monarch butterflies navigate. Curr Biol 2004;14:155-8.
  234. Sauman I, Briscoe AD, Zhu H, Ski D, Froy O, Stalleicken J, et al. Connecting the navigational clock to sun compass input in monarch butterfly brain. Neuron 2005;46:457-67.
  235. Srygley R, Oliveira E. Sun compass and wind drift compensation in migrating butterflies. J Navig 2001;54:405-17.
  236. Zhu H, Yuan Q, Briscoe AD, Froy O, Casselman A, Reppert SM. Les deux CRYs du papillon. Curr Biol 2005;15:R953-954.
  237. Zhu H, Casselman A, Reppert SM. Chasing migration genes : a brain expressed sequence Tag resource for summer and migratory Monarch butterflies (*Danaus plexippus*). PLoS One 2008;3:e1345.
  238. Zhu H, Gegear RJ, Casselman A, Kanginakudru S, Reppert SM. Définition des différences comportementales et moléculaires entre les papillons monarques estivaux et migrants. BMC Biol 2009;7:14.
  239. Kirschvink JL. Birds, bees and magnetism : a new look at the old problem of magnetoreception. Trends Neurosci 1982;5:160-7.
  240. Kirschvink JL, Gould JL. Biogenic magnetite as a basis for magnetic field sensitivity in animals. Biosystems 1981;13 : 181-201.
  241. Kyriacou CP. Horloges, cryptochromes et migrations des monarques. J Biol 2009;8:55.
  242. Yuan Q, Metterville D, Briscoe AD, Reppert SM. Insect cryptochromes : la duplication et la perte de gènes définissent diverses façons de construire les horloges circadiennes des insectes. Mol Biol Evol 2007;24:948-55.
  243. Jones DS, MacFadden BJ. Induced magnetization in the monarch butterfly, *Danaus plexippus* (insecta, Lepidoptera). J Exp Biol 1982;96:1-9.
  244. Stindl R, Stindl W Jr. Vanishing honey bees : is the dying of adult worker bees a consequence of short telomeres and premature aging ? Med Hypotheses 2010;75:387-90.
  245. van Engelsdorp D, Hayes J Jr, Underwood RM, Pettis J. A survey of honey bee colony losses in the U.S., fall 2007 to spring 2008. PLoS One 2008;3:e4071.
  246. Schacker M. A spring without bees, how colony collapse disorder has endangered our food supply. Connecticut, États-Unis : Lyons Press, Guilford ; 2008:52-3 pp.
  247. Schmuck R, Schoning R, Stork A, Schramel O. Risk posed to honey bees (*Apis mellifera* L, Hymenoptera) by an imidacloprid seed dressing of sunflowers. Pest Manag Sci 2001;57:225-38.
  248. Bacandritsos N, Granatom A, Budge G, Papanastasiou I, Roinioti E, Caldon M, et al. Sudden deaths and colony population decline in Greek honey bee colonies. J Invertebr Pathol 2010;105 : 335-40.
  249. Bromenshenk JJ, Henderson CB, Wick CH, Stanford MF, Zulich AW, Jabbour RE, et al. Iridovirus et microsporidies liés au déclin des colonies d'abeilles domestiques. PLoS One 2010;5:e13181.
  250. Département de l'agriculture des États-Unis. Honey bee colonies, ISSN:2470-993X released august 1,2017, national agricultural statistics service (NASS), agricultural statistics board, United States department of agriculture (USDA) ; 2017. Disponible sur : [https://www.nass.usda.gov/Publications/Todays\\_Reports/reports/hcnv0817.pdf](https://www.nass.usda.gov/Publications/Todays_Reports/reports/hcnv0817.pdf).
  251. Département de l'agriculture des États-Unis. Honey bee colonies, ISSN:2470-993X released august 1,2019, national agricultural statistics service (NASS), agricultural statistics board, United States department of agriculture (USDA) ; 2019. Disponible sur : <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/rn301137d/f7623q868/ft849239n/hcnv0819.pdf>.
  252. Partenariat Bee Informed 2018-2019. Pertes de colonies d'abeilles domestiques aux États-Unis : résultats préliminaires, 2019. Disponible sur : <https://beeinformed.org/results/2018-2019/>.
  253. U.S. Department of Interior, Fish and Wildlife Service 50 CFR Part 17 [Docket No. FWS-R3-ES-2015-0112 ; 4500030113] RIN 1018-BB 66 Espèces sauvages et végétales menacées et en voie de disparition ; statut d'espèce en voie de disparition pour le Rusty.

- Bourdon à pattes. 3186 Federal Register/ Vol. 82, n° 7 / Mercredi 11 janvier 2017 / Règles et réglementations. Disponible sur : <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2017-01-11/pdf/2017-00195.pdf>.
254. Mathiasson ME, Rehan SM. Les changements de statut des abeilles sauvages du nord-est de l'Amérique du Nord sur 125 ans révélés par les spécimens de musée. *Insect Conserv Divers* 2019;12 : 278-88.
  255. Brodschneider R, Gray A, Adjlane N, Ballis A, Brusbardis V, Charrière JD, et al. Taux de perte de colonies d'abeilles domestiques dans plusieurs pays pendant l'hiver 2016/2017. *Enquête COLOSS*. *J Apicult Res* 2018;57:452-7.
  256. Kulhanek K, Steinhauer N, Rennich K, Caron DM, Sagili RR, Pettis JS, et al. Une enquête nationale sur les pertes annuelles de colonies d'abeilles domestiques gérées 2015-2016 aux États-Unis. *J Apicult Res* 2017;56 : 328-40.
  257. Miller-Struttmann NE. Où sont passées toutes les fleurs : complexité et déclin mondial des abeilles. *PLOS Blogs* 2016. Disponible sur : <https://blogs.plos.org/ecology/2016/01/11/where-have-all-the-flowers-gone-complexity-worldwide-bee-declines-by-nicole-miller-struttmann/>.
  258. Potts SG, Roberts SPM, Dean R, Marris G, Brown MA, Jones R, et al. Declines of managed honey bees and beekeepers in Europe. *J Apicult Res* 2010;49:1.
  259. Vanbergen AJ, Potts SG, Vian A, Malkemper EP, Young J, Tscheulin T. Risk to pollinators from anthropogenic electromagnetic radiation (EMR) : evidence and knowledge gaps. *Sci Total Environ* 2019;695:133833.
  260. Miller-Struttmann NE, Geib JC, Franklin JD, Kevan PG, Holdo RM, Ebert-May D, et al. Functional mismatch in a bumble bee pollination mutualism under climate change. *Science* 2015;349 : 1541-4.
  261. Powney GD, Carvell C, Edwards M, Morris RKA, Roy HE, Woodcock BA. Pertes généralisées d'insectes pollinisateurs en Grande-Bretagne. *Nat Commun* 2019;10:1018.
  262. Conseil national de recherches des États-Unis. Statut des pollinisateurs en Amérique du Nord. Comité sur le statut des pollinisateurs en Amérique du Nord. Washington, D.C. : National Academies Press ; 2007 [consulté le 13 mai 2007].
  263. von Frisch K. The dancing bees, an account of the life and senses of the honey bee. Vienne, Autriche : Springer-Verlag Wien ; 1954.
  264. von Frisch K. The dance language and orientation of bees. Princeton, NJ, USA : Belknap Press of Harvard University Press ; 1967.
  265. Hammer M, Menze IR. Apprentissage et mémoire chez l'abeille domestique. *J Neurosci* 1995;15:1617-30.
  266. Walker MM, Bitterman ME. Attached magnets impair magnetic field discrimination by honeybees. *J Exp Biol* 1989;141:447-51.
  267. Kirschvink JL, Kobayashi-Kirschvink A. La sensibilité géomagnétique est-elle réelle ? Reproduction de l'expérience de conditionnement de Walker-Bitterman chez les abeilles domestiques. *Am Zool* 1991;31 : 169-85.
  268. Walker MM, Bitterman ME. Les abeilles domestiques peuvent être entraînées à répondre à de très petits changements dans l'intensité du champ magnétique. *J Exp Biol* 1989;145:489-94.
  269. Valkova T, Vacha M. Comment les abeilles utilisent-elles leur boussole magnétique ? Peuvent-elles voir le nord ? *Bull Entomol Res* 2012;102 : 461-7.
  270. Clarke D, Whitney H, Sutton G, Robert D. Détection et apprentissage des champs électriques floraux par les bourdons. *Science* 2013 ; 340:66-9.
  271. Clarke D, Morley E, Robert D. L'abeille, la fleur et le champ électrique : écologie électrique et électroréception aérienne. *J Comp Physiol* 2017;203:737-48.
  272. Sutton GP, Clarke D, Morley EL, Robert D. Les poils mécanosensoriels des bourdons (*Bombus terrestris*) détectent les champs électriques faibles. *Proc Natl Acad Sci Unit States Am* 2016;113:7261-5.
  273. Greggers U, Koch G, Schmidt V, Durr A, Floriou-Servou A, Piepenbrock D, et al. Réception et apprentissage des champs électriques chez les abeilles. *Proc R Soc B* 2013;280:20130528.
  274. Erickson EH. Potentiels électriques de surface sur les abeilles ouvrières quittant et entrant dans la ruche. *J Apicult Res* 1975;14:141-7.
  275. Colin ME, Richard D, Chauzy S. Measurement of electric charges carried by bees : evidence of biological variations. *Electromagn Biol Med* 1991;10:17-32.
  276. Corbet SA, Beament J, Eisikowitch D. Les forces électrostatiques sont-elles impliquées dans le transfert de pollen ? *Plant Cell Environ* 1982;5:125-9.
  277. Warnke U. Effets des charges électriques sur les abeilles domestiques. *Bee World* 1976;57:50-6.
  278. Warnke U. Les oiseaux, les abeilles et l'humanité. L'initiative de compétence pour l'humanité, l'environnement et la démocratie. Brochure 1 2007. Disponible sur : <https://ecfsapi.fcc.gov/file/7521097891.pdf>.
  279. Yong E. Les abeilles peuvent sentir les champs électriques des fleurs. *National Geographic* 2013.
  280. Wellenstein G. L'influence des lignes à haute tension sur les colonies d'abeilles domestiques (*Apis mellifera* L.). *Zeitschrift Fur Angewandte Entomologie* ; 1973:86-94 pp. (Trans. De l'allemand pour Batelle Pacific Northwest laboratories, Addis Translations International).
  281. Rogers LE, Warren JL, Gano KA, Hinds RL, Fitzner RE, Gilbert RO. Environmental studies of 1100-kV prototype transmission line : an interim report Batelle Pacific Northwest Laboratories. Portland, Oregon : Report Prepared for Bonneville Power Administration ; 1980.
  282. Rogers LE, Warren JL, Hinds NR, Gano KA, Fitzner RE, Piepel GF. Environmental studies of 1100-kV prototype transmission line : an annual report for the 1981 study period Batelle Pacific Northwest Laboratories. Portland, Oregon : Report Prepared for Bonneville Power Administration ; 1982.
  283. Rogers LE, Breedlow PA, Carlile DW, Gano KA. Environmental studies of 1100-kV prototype transmission line : an annual report for the 1983 study period Batelle Pacific Northwest Laboratories. Portland, Oregon : Report Prepared for Bonneville Power Administration ; 1984.
  284. Rogers LE, Breedlow PA, Carlile DW, Gano KA. Environmental studies of 1100-kV prototype transmission line : an annual report for the 1984 study period Batelle Pacific Northwest Laboratories. Portland, Oregon : Report Prepared for Bonneville Power Administration ; 1984.
  285. Greenberg B, Bindokas VP, Gaujer JR. Biological effects of a 760 kV transmission line : exposures and thresholds in honeybee colonies. *Bioelectromagnetics* 1981;2:315-28.
  286. Greenberg B, Bindokas VP, Gaujer JR. Lignes de transmission à très haute tension : mécanismes des effets biologiques sur les colonies d'abeilles domestiques. EA-4218. Palo Alto, Californie : Préparé pour l'Electric Power Research Institute ; 1985.
  287. U.S. Department of Energy, Bonneville Power Administration, Lee JM, Chartier VL, Hartmann DP, Lee GE, Pierce KS, Shon FL, et al. Electrical and biological effects of transmission lines : a review. Portland, Oregon, USA; 1989, pp. 24-25.

288. Bindokas VP, Gauger JR, Greenberg B. Mechanism of biological effects observed in honey bees (*Apis mellifera* L.) hived under extra-high-voltage transmission lines. *Bioelectromagnetics* 1988;9:285-301.
289. Migdał P, Murawska A, Bienkowski P, Berbec E, Roman A. Changements dans les paramètres de comportement des abeilles sous l'influence du champ électrique à 50 Hz et à intensité variable. *Animals* 2021;11 : 247.
290. Korall H, Leucht T, Martin H. Bursts of magnetic fields induce jumps of misdirection in bees by a mechanism of magnetic resonance. *J Comp Physiol* 1988;162:279-84.
291. Pereira-Bomfim MGC, Antonialli-Junior WF, Acosta-Avalos D. Effet du champ magnétique sur le rythme de recherche de nourriture et le comportement de la guêpe à papier *Polybia paulista* Ihering (Hymenoptera : vespidae) qui forme des essaims. *Sociobiologie* 2015;62:99-104.
292. Shepherd S, Jackson CW, Sharkh SM, Aonuma H, Oliveira EE, Newland PL. Les champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence entraînent les battements d'ailes des criquets. *Bioelectromagnetics* 2021;42 : 296-308.
293. Wyszowska J, Shepherd S, Sharkh S, Jackson CW, Newland PL. L'exposition aux champs électromagnétiques de fréquences extrêmement basses modifie le comportement, la physiologie et les niveaux de protéines de stress des criquets pèlerins. *Sci Rep* 2016;6:36413.
294. Harst W, Kuhn J, Stever H. L'exposition électromagnétique peut-elle provoquer un changement de comportement ? Étude des influences non thermiques possibles sur les abeilles domestiques - une approche dans le cadre de l'informatique éducative. *Acta Systemica-IIAS Internat J.* 2006;6:1-6.
295. Kimmel S, Kuhn J, Harst W, Stever H. Electromagnetic radiation : influences on honeybees (*Apis mellifera*). In : IIAS - Conférence InterSymp. Baden-Baden, Allemagne ; 2007. Disponible à l'adresse : [https://www.researchgate.net/publication/292405747\\_Electromagnetic\\_radiation\\_influences\\_on\\_honeybees\\_Apis\\_mellifera\\_IIAS-InterSymp\\_Conference](https://www.researchgate.net/publication/292405747_Electromagnetic_radiation_influences_on_honeybees_Apis_mellifera_IIAS-InterSymp_Conference).
296. Stever H, Kimmel S, Harst W, Kuhn J, Otten C, Wunder B. Verhaltensänderung der Honigbiene *Apis mellifera* unter elektromagnetischer Exposition. Folgeversuch 2006. Disponible sur : <http://agbi.uni-landau.de/>.
297. Favre D. Piping des ouvrières d'abeilles par les téléphones portables. *Apidologie* 2011;42:270-9.
298. Darney K, Giraudin A, Joseph R, Abadie P, Aupinel P, Decourtaye A, et al. Effet des radiations à haute fréquence sur la survie de l'abeille domestique (*Apis mellifera* L.). *Apidologie* 2016;47:703-10.
299. 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.
300. Sharma VP, Kumar NR. Changes in honeybee behaviour and biology under the influence of cellphone radiations. *Curr Sci* 2010;98:1376-8.
301. Vilić M, Tlak Gajger I, Tucak P, Štambuk A, Šrut M, Klobučar G, et al. Effets de l'exposition à court terme aux radiofréquences des téléphones mobiles (900 MHz) sur la réponse oxydative et la génotoxicité chez les larves d'abeilles domestiques. *JApic Res* 2017;56:430-8.
302. Kumar NR, Sangwan S, Badotra P. L'exposition aux radiations des téléphones portables entraîne des modifications biochimiques chez les abeilles ouvrières. *Toxicol Int* 2011;18:70-2.
303. Sharma A. Biochemical changes in *Apis mellifera* L. worker brood induced by cell phone radiation. M Phil. Thèse. Chnadigarh, Inde : Département de zoologie. Université du Punjab ; 2008.
304. Mall P, Kumar Y. Effet des rayonnements électromagnétiques sur la couvaison, la production de miel et le comportement de butinage des abeilles européennes (*Apis mellifera* L.). *Afr J Agric Res* 2014;9 : 1078-85.
305. Mixson TA, Abramson CI, Nolf SL, Johnson GA, Serrano E, Wells H. Effect of GSM cellular phone radiation on the behavior of honey bees (*Apis mellifera*). *Sci Bee Cult* 2009;1:22-7.
306. 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.
307. Taye RR, Deka MK, Rahman A, Bathari M. Effet du rayonnement électromagnétique des tours de téléphonie cellulaire sur le comportement de butinage de l'abeille domestique asiatique, *Apis cerana* F. (Hymenoptera : apidae). *J Entomol Zool Study* 2017;5:1527-9.
308. Vijver MG, Bolte JFB, Evans TR, Tamis WLM, Peijnenburg WJGM, Musters CJM, et al. Investigation de l'exposition à court terme aux champs électromagnétiques sur la capacité de reproduction des invertébrés en situation de terrain. *Electromagn Biol Med* 2013 ; 33:21-8.
309. 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.
310. 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.
311. 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.
312. 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.
313. Kumar SS. Trouble de l'effondrement des colonies (CCD) chez les abeilles domestiques causé par les rayonnements CEM. *Bioinformation* 2018;14:521-4.
314. Panagopoulos DJ. Le rayonnement électromagnétique produit par l'homme n'est pas quantifié. In : Horizons de la physique mondiale, vol 296. ISBN 978-153614-125-2. Hauppauge, NY, USA : Reimer A., 2018 Nova Science Publishers, Inc ; 2018. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/327578880\\_Man-Made\\_Electromagnetic\\_Radiation\\_Is\\_Not\\_Quantized](https://www.researchgate.net/publication/327578880_Man-Made_Electromagnetic_Radiation_Is_Not_Quantized).
315. Kostoff RN. Effets indésirables des rayonnements sans fil. PDF 2019. Disponible sur : <http://hdl.handle.net/1853/61946>.
316. Kostoff RN, Lau CGY. Effets modifiés sur la santé des rayonnements électromagnétiques non ionisants combinés à d'autres agents rapportés dans la littérature médicale. Dans : Geddes CG, éditeur. *Microwave effects on DNA and proteins*. New York, NY, USA : Springer International Publishing ; 2017.
317. UICN. L'Union internationale pour la conservation de la nature, évaluation globale des amphibiens. Washington, DC : Center for Applied Biodiversity Science ; 2004.
318. Stuart SN, Chanson JS, Cox NA, Young BE, Rodrigues ASL, Fischman DL, et al. Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. *Science* 2004;306:1783-6.
319. Blaustein AR, Johnson PTJ. La complexité des amphibiens déformés. *Front Ecol Environ* 2003;1:87-94.
320. Alford RA, Bradfield KS, Richards SJ. Ecology : global warming and amphibian losses. *Nature* 2007;447:E3-4.

321. Pounds AJ, Bustamante MR, Coloma LA, Consuegra JA, Fogden MPL, Foster PN, et al. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature* 2006;439 : 161-7.
322. Lecture CJ. Linking global warming to amphibian declines through its effects on female body condition and survivorship. *Oecologia* 2006;151:125-31.
323. Johnson PTJ, Chase JM. Parasites in the food web : linking amphibian malformations and aquatic eutrophication. *Ecol Lett* 2004;7:521-6.
324. Johnson PTJ, Chase JM, Dosch KL, Hartson RB, Gross JA, Larson DJ, et al. L'eutrophisation aquatique favorise les infections pathogènes chez les amphibiens. *Proc Natl Acad Sci Unit States Am* 2007;104 : 15781-6.
325. Knapp RA, Matthews KR. Non-native fish introductions and the decline of the mountain yellow-legged frog from within protected areas. *Conserv Biol* 2000;14:428-38.
326. Dohm MR, Muatz WJ, Andrade JA, Gellert KS, Salas-Ferguson LJ, Nicolaisen N, et al. Effets de l'exposition à l'ozone sur la capacité phagocytaire non spécifique des macrophages pulmonaires d'un amphibien, *Bufo marinus*. *Environ Toxicol Chem* 2009;24 : 205-10.
327. Johnson PTJ, Lunde KB, Thurman EM, Ritchie EG, Wray SN, Sutherland DR, et al. Parasite (*Ribeiroia ondatrae*) infection linked to amphibian malformations in the Western United States. *Ecol Monogr* 2002;72:151-68.
328. Hayes TB, Collins A, Lee M, Mendoza M, Noriega N, Stuart AA, et al. Hermaphroditic demasculinized frogs after exposure to the herbicide atrazine at low ecologically relevant doses. *Proc Natl Acad Sci Unit States Am* 2002;99 : 5476-80.
329. Relyea RA. L'impact des insecticides et des herbicides sur la biodiversité et la productivité des communautés aquatiques. *Ecol Appl* 2004;15:618-27.
330. Relyea RA. L'impact légal du roundup sur les amphibiens aquatiques et terrestres. *Ecol Appl* 2005;15:1118-24.
331. Bradley GA, Rosen PC, Sredl MJ, Jones TR, Longcore JE. Chytridiomycose chez les grenouilles indigènes de l'Arizona. *J Wildl Dis* 2002;38 : 206-12.
332. Daszak P, Berger L, Cunningham AA, Hyatt AD, Green DE, Speare R. Emerging infectious diseases and amphibian population declines. *Emerg Infect Dis* 1999;5:735-48.
333. Lips KR, Brem F, Brenes R, Reeve JD, Alford RA, Voyles J, et al. Emerging infectious disease and the loss of biodiversity in a Neotropical amphibian community. *Proc Nat Acad Sci. USA* 2006;103:3165-70.
334. Trenton WJG, Perkins MW, Govindarajulu P, Seglie D, Walker S, Cunningham AA, et al. Le pathogène amphibien émergent *Batrachochytrium dendrobatidis* infecte globalement les populations introduites de la grenouille-taureau nord-américaine, *Rana catesbeiana*. *Biol Lett* 2006;2:455-9.
335. Weldon C, du Preez LH, Hyatt AD, Muller R, Speare R. Origin of the amphibian chytrid fungus. *Emerg Infect Dis* 2004;10 : 2100-5.
336. Bancroft BA, Baker NJ, Blaustein AR. Effects of UVB radiation on marine and freshwater organisms : a synthesis through meta-analysis. *Ecol Lett* 2007;10:332-45.
337. Belden LK, Blaustein AR. Population differences in sensitivity to UV-B radiation for larval long-toed salamanders. *Ecology* 2002 ; 83:1586-90.
338. Blaustein AR, Kiesecker JM, Chivers DP, Anthony RG. Ambient UV-B radiation causes de déformations dans les embryons d'amphibiens. *Proc Nat Acad Sci. USA* 1995;92:11049-52.
339. Licht LE. Shedding light on ultraviolet radiation and amphibian embryos. *BioSci* 2003;53:551-61.
340. Sun JWC, Narins PM. Anthropogenic sounds differentially affect amphibian call rate. *Biol Conserv* 2005;121:419-27.
341. Baker BJ, Richardson JML. The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, *Rana clamitans melanota*. *Can J Zool* 2006;84:1528-32.
342. 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.
343. McCallum ML. Amphibian decline or extinction ? current declines dwarf background extinction rate. *J Herpetol* 2007;41:483-91.
344. Becker RO, Selden G. Le corps électrique, l'électromagnétisme et le fondement de la vie. New York, NY, USA : Quill William Morrow Publisher ; 1985:40-67 pp.
345. Becker RO. Modèle de champ bioélectrique chez la salamandre et sa simulation par un analogue électronique. *IRE Trans Med Electron* 1960;ME-7:202-6.
346. Becker RO. Forces électromagnétiques et processus de vie. *Technol Rev* 1972;75:32-8.
347. Becker RO. Stimulation de la régénération partielle des membres chez les rats. *Nature* 1972;235:109-11.
348. Becker RO. Le système biologique de base de transmission et de contrôle des données influencé par les forces électriques. *Ann NY Acad Sci* 1974 ; 238:236-41.
349. Becker RO, Murray DG. Une méthode pour produire une redifférenciation cellulaire au moyen de très petits courants électriques. *Trans NY Acad Sci Ser II* 1967;29:606-15.
350. Becker RO, Sparado JA. Stimulation électrique de la régénération partielle des membres chez les mammifères. *Bull NY Acad Med* 1972;48:627-641.
351. Smith SD. Effets du placement des électrodes sur la stimulation de la régénération des membres de grenouilles adultes. *Ann NY Acad Sci* 1974;238:500-7.
352. Lund EJ. Contrôle expérimental de la polarité organique par le courant électrique I. *J Exp Zool* 1921;34:471-94.
353. Lund EJ. Contrôle expérimental de la polarité organique par le courant électrique III. *J Exp Zool* 1923;37:69-87.
354. Lund EJ. Champs bioélectriques et croissance. Austin, TX, USA : University of Texas Press ; 1947.
355. Burr HS, Lane CT. Caractéristiques électriques des systèmes vivants. *Yale J Biol Med* 1935;8:31-5.
356. Burr HS, Northrop FSC. La théorie électro-dynamique de la vie. *Q Rev Biol* 1937;10:322-33.
357. Burr HS, Northrop FSC. Evidence for the existence of an electrodynamic field in living organisms. *Proc Natl Acad Sci Unit States Am* 1939;25:284-8.
358. Burr HS. Propriétés de champ de l'œuf de grenouille en développement. *Proc Natl Acad Sci Unit States Am* 1941;27:267-81.
359. Levin M. Bioelectromagnetics in morphogenesis. *Bioelectromagnetics* 2003;24:295-315.
360. 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:S241-56.
361. Phillips JB, Muheim R, Jorge PE. Une perspective comportementale sur la biophysique de la boussole magnétique dépendante de la lumière : un lien entre la perception directionnelle et spatiale ? *J Exp Biol* 2010;213 : 3247-55.



362. Diego-Rasilla FJ, Luengo RM, Phillips JB. Boussole magnétique dépendante de la lumière chez les têtards de grenouille verte ibérique. *Naturwissenschaften* 2010;97:1077-88.
363. Diego-Rasilla FJ, Luengo RM, Phillips JB. Utilisation d'une boussole magnétique dépendante de la lumière pour l'orientation sur l'axe y chez les têtards de grenouille commune européenne (*Rana temporaria*). *J Comp Physiol* 2013;199:619-28.
364. Diego-Rasilla FJ, Phillips JB. Orientation de la boussole magnétique chez les larves de grenouilles vertes ibériques, *Pelophylax perezi*. *Ethologie* 2007 ; 113:474-9.
365. Freake MJ, Borland SC, Phillips JB. Use of a magnetic compass for Y-axis orientation in larval bullfrogs, *Rana catesbeiana*. *Copeia* 2002;2002:466-71.
366. Freake MJ, Phillips JB. Light-dependent shift in bullfrog tadpole magnetic compass orientation : evidence for a common magnetoreception mechanism in anuran and urodele amphibians. *Ethologie* 2005;111:241-54.
367. Phillips JB. Magnetic compass orientation in the Eastern redspotted newt (*Notophthalmus viridescens*). *J Comp Physiol* 1986;158:103-9.
368. Phillips JB, Borland SC. Behavioral evidence for the use of a light-dependent magnetoreception mechanism by a vertebrate. *Nature* 1992;359:142-4.
369. Phillips JB, Borland SC. Wavelength-specific effects of light on magnetic compass orientation of the eastern red-spotted newt (*Notophthalmus viridescens*). *Ethol Ecol Evol* 1992;4:33-42.
370. Phillips JB, Deutschlander ME, Freake MJ, Borland SC. The role of extraocular photoreceptors in newt magnetic compass orientation : parallels between light-dependent magnetoreception and polarized light detection in vertebrates. *J Exp Biol* 2001;204:2543-52.
371. Shakhparonov 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.
372. Diego-Rasilla FJ, Pérez-Mellado V, Pérez-Cembranos A. Comportement d'alignement magnétique spontané chez les lézards vivant en liberté. *Sci Nat* 2017;104:13.
373. Light P, Salmon M, Lohmann KJ. Geomagnetic orientation of loggerhead sea turtles : evidence for an inclination compass. *J Exp Biol* 1993;182:1-10.
374. Nishimura T, Okano H, Tada H, Nishimura E, Sugimoto K, Mohri K, et al. Les lézards répondent à un champ électromagnétique de très basse fréquence. *J Exp Biol* 2010;213:1985-90.
375. Nishimura T, Tada H, Fukushima M. Corrélation entre la phase lunaire et le comportement de soulèvement de la queue des lézards (*Pogona vitticeps*) exposés à un champ électromagnétique de très basse fréquence. *Animals* 2019;9:208.
376. Nishimura T. L'œil pariétal des lézards (*Pogona vitticeps*) a besoin d'une lumière d'une longueur d'onde inférieure à 580 nm pour activer la magnétoréception dépendante de la lumière. *Animals* 2020;10:489.
377. Levitt NA. Effet des micro-ondes sur le rythme cardiaque des lapins pendant l'irradiation locale des parties du corps. *Bull Exp Biol Med* 1966. 1964;58:67-9. (Article en russe).
378. Frey AH, Seifert E. Pulse modulated UHF energy illumination of the heart associated with change in heart rate. *Life Sci* 1968;7:505-12.
379. Miura M, Okada J. Non-thermal vasodilatation by radio frequency burst-type electromagnetic field radiation in the frog. *J Physiol* 1991;435:257-73.
380. Schwartz JL, House DE, Mealing GA. Exposure of frog hearts to CW or amplitude-modulated VHF fields : selective efflux of calcium ions at 16 Hz. *Bioelectromagnetics* 1990;11:349-58.
381. 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.
382. Grefner N, Yakovleva T, Boreisha I. Effects of electromagnetic radiation on tadpole development in the common frog (*Rana temporaria* L.). *Russ J Ecol* 1998;29:133-4.
383. Mortazavi SMJ, Rahimi S, Talebi A, Soleimani A, Rafati A. Enquête sur les effets de l'exposition au rayonnement radiofréquence de 900 MHz émis par un téléphone mobile GSM sur le schéma des contractions musculaires dans un modèle animal. *J Biomed Phys Eng* 2015;5:121-32.
384. Rafati A, Rahimi S, Talebi A, Soleimani A, Haghani M, Mortazavi SM. L'exposition aux radiations radiofréquences émises par les brouilleurs de téléphones portables courants modifie le schéma des contractions musculaires : une étude sur un modèle animal. *J Biomed Phys Eng* 2015;5:133-42.
385. Levengood WC. Un nouvel agent tératogène appliqué aux embryons d'amphibiens. *J Embryol Exp Morphol* 1969;21:23-31.
386. Neurath PW. Un champ magnétique à gradient élevé inhibe le développement embryonnaire des grenouilles. *Nature* 1968;219:1358.
387. Ueno S, Iwasaka M. Early embryonic development of frogs under intense magnetic fields up to 8 T. *J Appl Phys* 1994;75 : 7165-7.
388. Severini M, Bosco L, Alilla R, Loy M, Bonori M, Giuliani L, et al. Retard de métamorphose chez les têtards de *Xenopus laevis* (Daudin) exposés à un champ magnétique faible de 50 Hz. *Int J Radiat Biol* 2010 ; 86:37-46.
389. Severini M, Bosco L, Alilla R, Loy M, Bonori M, Giuliani L, et al. Retard de métamorphose chez les têtards de *Xenopus laevis* (Daudin) exposés à un champ magnétique faible de 50 Hz. *Int J Radiat Biol* 2010 ; 86:37-46.
390. Schlegel PA. Sensibilité comportementale de la salamandre des cavernes aveugle européenne, *Proteus anguinus*, et d'un triton pyrénéen, *Euproctus asper*, aux champs électriques dans l'eau. *Brain Behav Evol* 1997;49 : 121-31.
391. Schlegel PA, Bulog B. Electrosensibilité comportementale spécifique à la population de la salamandre des cavernes aveugle européenne, *Proteus anguinus*. *J Physiol* 1997;91:75-9.
392. Landesman RH, Douglas WS. Régénération anormale des membres chez les tritons adultes exposés à un champ électromagnétique pulsé. *Teratology* 1990;42:137-45.
393. 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.
394. Fey DP, Greszkiewicz M, Otremba Z, Andruliewicz E. Effet du champ magnétique statique sur le succès d'éclosion, la croissance, la mortalité et l'absorption du sac vitellin des larves de brochet du Nord *Esox lucius*. *Sci Total Environ* 2019;647:1239-44.
395. Fey DP, Jakubowska M, Greszkiewicz M, Andruliewicz E, Otremba Z, Urban-Malinga B. Les champs magnétiques et électromagnétiques d'origine anthropique sont-ils des menaces potentielles pour les premiers stades de vie des poissons ? *Aquat Toxicol* 2019;209:150-8.
396. Walker MM, Dennis TE. Rôle du sens magnétique dans la distribution et l'abondance des animaux marins. *Mar Ecol Prog Ser* 2005;287:295-307.
397. Wiltschko R, Wiltschko W. Magnetic orientation in animals. New York, NY, USA : Springer International Publisher ; 1995.
398. Nyqvist D, Durif C, Johnsen MG, De Jong K, Forland TN, Sivle LD. Sensations électriques et magnétiques chez les animaux marins, et potentiel

- effets comportementaux des enquêtes électromagnétiques. *Mar Environ Res* 2020;155:104888.
399. Putman NF, Scanlan MM, Billman EJ, O'Neil JP, Couture RB, Quinn TP, et al. Une carte magnétique héritée guide la navigation océanique chez le saumon du Pacifique juvénile. *Curr Biol* 2014;24 : 446-50.
  400. Josberger E, Hassanzadeh P, Deng Y, Sohn J, Rego M, Amemiya C, et al. Conductivité protonique dans les ampoules de la gelée de Lorenzini. *Sci Adv* 2016;2:e1600112.
  401. Lorenzini S. Osservazioni Intorno Alle Torpedini. Firenze : Per l'Onofri ; 1678.
  402. Murray RW. La réponse des ampoules de Lorenzini des élasmodontes à la stimulation électrique. *J Exp Biol* 1962;39 : 119-28.
  403. Brown BR, Hutchison JC, Hughes ME, Kellogg DR, Murray RW. Caractérisation électrique du gel recueilli à partir d'électrocapteurs de requin. *Phys Rev E - Stat Nonlinear Soft Matter Phys* 2002;65:061903.
  404. Camperi M, Tricas TC, Brown BR. From morphology to neural information : the electric sense of the skate. *PLoS Comput Biol* 2007;3:e113.
  405. Fields RD. Le sens électrique du requin. *Sci Am* 2007;297:74-81.
  406. Fields RD, Fields KD, Fields MC. Un gel semi-conducteur dans les organes sensoriels des requins ? *Neurosci Lett* 2007;426:166-70.
  407. Sperelakis N. Cell physiology sourcebook : essentials of membrane biophysics, 4th ed. Amsterdam, Pays-Bas : Elsevier/AP ; 2012:970 p. part. xxvi.
  408. Waltman B. Propriétés électriques et structure fine des canaux ampullaires de Lorenzini. *Acta Physiol Scand Suppl* 1966 ; 264:1-60.
  409. Brown BR. Neurophysiologie : détection de la température sans canaux ioniques. *Nature* 2003;421:495.
  410. Brown BR. Réponse à la température dans les électrocapteurs et tensions thermiques dans les électrolytes. *J Biol Phys* 2010;36:121-34.
  411. Kirschvink JL, MacFadden BJ, Jones DS. Biominéralisation de la magnétite et magnétoréception dans les organismes. New York, NY, USA : Plenum Press ; 1985.
  412. Kremers D, Marulanda JL, Hausberger M, Lemasson A. Preuve comportementale de la magnétoréception chez les dauphins : détection de champs magnétiques expérimentaux. *Naturwissenschaften* 2014;101:907-11.
  413. Walker MM, Kirschvink JL, Ahmed G, Diction AE. Evidence that fin whales respond to the geomagnetic field during migration. *J Exp Biol* 1992;171:67-78.
  414. Bauer GB, Fuller M, Perry A, Dunn JR, Zoeger J. Magnétoréception et biominéralisation de la magnétite chez les cétacés. In : Kirschvink JL, Jones DS, MacFadden BJ, éditeurs. *Magnetite biomineralization and magnetoreception in organisms : a new biomagnetism*. New York, NY, USA : Plenum Press ; 1985:489-507 pp.
  415. Zoeger J, Dunn JR, Fuller M. Magnetic material in the head of the common Pacific dolphin. *Science* 1981;213:892-4.
  416. Klinowska M. Cetacean live stranding sites relate to geomagnetic topography. *Aquat Mamm* 1985;1:27-32.
  417. Kirschvink JL, Dizon AE, Westphal JA. Evidence from strandings for geomagnetic sensitivity in cetaceans. *J Exp Biol* 1986;120 : 1-24.
  418. Granger J, Walkowicz L, Fitak R, Johnsen S. Les baleines grises s'échouent plus souvent les jours où les niveaux de bruit de radiofréquence atmosphérique augmentent. *Curr Biol* 2020;30:R135-58.
  419. Ferrari TE. Les échouages de cétacés sont en corrélation avec les perturbations géomagnétiques dans la magnétosphère terrestre : un exemple de l'impact des changements astronomiques sur l'avenir de la vie. *Int J Astrobiol* 2017;16:163-75.
  420. Vanselow KH, Jacobsen S, Hall C, Garthe S. Les tempêtes solaires peuvent déclencher des échouages de cachalots : approches d'explication pour les échouages multiples en mer du Nord en 2016. *Int J Astrobiol* 2017;17:336-44.
  421. Stafne GM, Manger PR. Prédominance de la nage dans le sens des aiguilles d'une montre pendant le repos chez les dauphins de l'hémisphère sud. *Physiol Behav* 2004;82:919-26.
  422. Putman NF, Lohmann KJ, Putman EM, Quinn TP, Klimley AP, Noakes DLG. Preuve de l'empreinte géomagnétique comme mécanisme de homing pour les saumons du Pacifique. *Curr Biol* 2013;23:312-16.
  423. 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;223:218735.
  424. Kirschvink JL, Walker MM, Chang SB, Dizon AE, Peterson KA. Chaînes de particules de magnétite à domaine unique dans le saumon quinnat. *Oncorhynchus tshawytscha*. *J Comp Physiol* 1985;157:375-81.
  425. Naisbett-Jones LC, Putman NF, Scanlan MM, Noakes DL, Lohmann KJ. Magnétoréception chez les poissons : l'effet des impulsions magnétiques sur l'orientation des saumons juvéniles du Pacifique. *J Exp Biol* 2020 ; 223:jeb222091.
  426. Royce WF, Smith LS, Hartt AC. Modèles de migrations océaniques du saumon du Pacifique et commentaires sur les mécanismes de guidage. *Fish Bull* 1968;66:441-62.
  427. Quinn TP. Evidence for celestial and magnetic compass orientation in lake migratory Sockeye salmon frey. *J Comp Physiol* 1980;137:243-8.
  428. Klimley AP. Highly directional swimming by scalloped hammerhead sharks, *Sphyrna lewini*, and subsurface irradiance, temperature, bathymetry, and geomagnetic field. *Mar Biol* 1993;117:1-22.
  429. Ardelean M, Minnebo P. Les câbles électriques sous-marins CCHT dans le monde. état des connaissances. EUR 27527 FR 2015.
  430. Öhman MC, Sigray P, Westerberg H. Offshore windmills and the effects of electromagnetic fields on fish. *Ambio* 2007;36:630-3.
  431. Hutchison ZL, Sigray P, He H, Gill AB, King J, Gibson C. Electromagnetic field (EMF) impacts on Elasmobranch (shark, rays, and skates) and American lobster movement and migration from direct current cables. Sterling (VA) : Département de l'Intérieur des États-Unis, Bureau de la gestion de l'énergie océanique. Étude OCS BOEM ; 2018.
  432. Fey DP, Greszkiewicz M, Jakubowska M, Lejk AM, Otremba Z, Andrulewicz E, et al. Otolith fluctuating asymmetry in larval trout, *Oncorhynchus mykiss* Walbaum, as an indication of organism bilateral instability affected by static and alternating magnetic fields. *Sci Total Environ* 2020;707:135489.
  433. Li Y, Liu X, Liu K, Miao W, Zhou C, Li Y, et al. Les champs magnétiques d'extrêmement basse fréquence induisent une toxicité pour le développement et l'apoptose chez les embryons de Zebrafish (*Danio rerio*). *Biol Trace Elem Res* 2014;162:324-32.
  434. Sedigh E, Heidari B, Roozati A, Valipour A. The Effect of different intensities of static magnetic field on stress and selected reproductive indices of the Zebrafish (*Danio rerio*) during acute and subacute exposure. *Bull Environ Contam Toxicol* 2019;102 : 204-9.
  435. Hunt RD, Ashbaugh RC, Reimers M, Udpa L, Saldana De Jimenez G, Moore M, et al. La direction de nage du poisson-chat de verre est

- sensibles à la stimulation magnétique. *PloS One* 2021;16 : e0248141.
- 436.Boles LC, Lohmann KJ. Navigation véritable et cartes magnétiques chez les langoustes. *Nature* 2003;421:60-3.
  - 437.Taormina B, Di Poic C, Agnaldt A-L, Carlierb A, Desroye N, Escobar-Luxf RH, et al. Impact des champs magnétiques générés par les câbles électriques sous-marins AC/DC sur le comportement du homard européen juvénile (*Homarus gammarus*). *Aquat Toxicol* 2020 ; 220:105401.
  - 438.Scott K, Harsanyia P, Lyndon AR. Comprendre les effets des émissions de champs électromagnétiques des dispositifs d'énergie renouvelable marins (MRED) sur le crabe comestible commercialement important. *Cancer pagurus* (L.). *Mar Pollut Bull* 2018;131:580-8.
  - 439.Nirwane A, Sridhar V, Majumdar A. Modifications neurocomportementales et stress oxydatif cérébral induits par une exposition aiguë aux radiations de la téléphonie mobile GSM 900 chez le poisson zèbre (*Danio rerio*). *Toxicol Res* 2016;32:123-32.
  - 440.Piccinetti CC, De Leo A, Cosoli G, Scalise L, Randazzo B, Cerri G, et al. Mesure des effets in vivo du rayonnement CEM de 100 MHz sur le développement embryonnaire du poisson zèbre *D. rerio* : une étude multidisciplinaire. *Ecotoxicol Environ Saf* 2018;154 : 268-79.
  - 441.Dasgupta S, Wang G, Simonich MT, Zhang T, Truong L, Liu H, et al. Impacts de la radiofréquence des téléphones cellulaires à haute dose de 3,5 GHz sur le développement embryonnaire du poisson zèbre. *PloS One* 2020;15 : e0235869.
  - 442.Putman NF, Endres CS, Lohmann CMF. Lohmann KJ Perception de la longitude et cartes magnétiques bicoordonnées chez les tortues de mer. *Curr Biol* 2011;21:463-6.
  - 443.Putman NF, VerleyP, Shay TJ, Lohmann KJ. Simulation des migrations transocéaniques des jeunes tortues de mer caouannes : fusion du comportement de navigation magnétique avec un modèle de circulation océanique. *J Exp Biol* 2012;215:1863-70.
  - 444.Mathis A, Moore FR. Geomagnetism and the homeward orientation of the box turtle, *Terrapene carolina*. *Ethologie* 1988 ; 78:265-74.
  - 445.Lohmann KJ, Lohmann CMF, Brothers JR, Putman NF. Natal homing and imprinting in sea turtles. In : Wyneken J, Lohmann KJ, Musick JA, éditeurs. *The biology of sea turtles*. Boca Raton, Florida, USA : CRC Press ; 2013, vol 3:59-77 pp.
  - 446.Lohmann KJ. Magnetic orientation by hatchling loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*). *J Exp Biol* 1991;155:37-49.
  - 447.Lohmann CMF, Lohmann KJ. Orientation aux vagues océaniques par les éclosions de tortues vertes. *J Exp Biol* 1992;171:1-13.
  - 448.Lohmann KJ, Lohmann CMF. Un compas magnétique indépendant de la lumière chez la tortue luth. *Biol Bull* 1993;185 : 149-51.
  - 449.Lohmann KJ, Lohmann CMF. Acquisition de la préférence directionnelle magnétique chez les tortues de mer caouannes en éclosion. *J Exp Biol* 1994 ; 190:1-8.
  - 450.Lohmann KJ, Lohmann CMF. Détection de l'angle d'inclinaison magnétique par les tortues de mer : un mécanisme possible pour déterminer la latitude. *J Exp Biol* 1994;194:23-32.
  - 451.Lohmann KJ, Lohmann CMF. Détection de l'intensité des champs magnétiques par les tortues de mer. *Nature* 1996;380:59-61.
  - 452.Lohmann KJ, Lohmann CMF. Orientation et navigation en haute mer chez les tortues de mer. *J Exp Biol* 1996;199:73-81.
  - 453.Lohmann KJ, Lohmann CMF. Mécanismes de guidage migratoire chez les tortues marines. *J Avian Biol* 1998;29:585-96.
  - 454.Lohmann KJ, Lohmann CMF. Mécanismes d'orientation des caouannes en éclosion. In : Bolten A, Witherington B, éditeurs. *Loggerhead sea turtles*. Washington, DC, USA : Smithsonian Institution Press ; 2003:44-62 pp.
  - 455.Lohmann KJ, Swartz AW, Lohmann CMF. Perception de la direction des vagues océaniques par les tortues de mer. *J Exp Biol* 1995;198:1079-85.
  - 456.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, FL, USA : CRC Press ; 1997:107-35 pp.
  - 457.Lohmann KJ, Cain SD, Dodge SA, Lohmann CMF. Regional magnetic fields as navigational markers for sea turtles. *Science* 2001;294:364-6.
  - 458.Lohmann KJ, Johnsen S. The neurobiology of magnetoreception in vertebrate animals. *Trends Neurosci* 2000;24:153-9.
  - 459.Irwin WP, Lohmann KL. Magnet-induced disorientation in hatchling loggerhead sea turtles. *J Exp Biol* 2003;206:497-501.
  - 460.Merritt R, Purcell C, Stroink G. Uniform magnetic field produced by three, four, and five square coils. *Rev Sci Instrum* 1983;54 : 879-82.
  - 461.Keeton WT. Magnets interfere with pigeon homing. *Proc Natl Acad Sci Unit States Am* 1971;68:102-6.
  - 462.Haugh CV, Davison M, Wild M, Walker MM. P-gps (pigeon geomagnetic positioning system) : I. Analyse du conditionnement de la magnétoréception et de son mécanisme chez le pigeon voyageur (*Columbia livia*). In : RIN 01. Oxford, UK : Royal Institute of Navigation ; 2001. Document n° 7.
  - 463.Luschi P, Benhamou S, Girard C, Ciccione 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.
  - 464.Papi F, Luschi P, Akesson S, Capogrossi S, Hays GC. Migration en haute mer de tortues de mer magnétiquement perturbées. *J Exp Biol* 2000 ; 203:3435-43.
  - 465.Sinsch U. Orientation behavior of toads (*Bufo bufo*) displaced from the breeding site. *J Comp Physiol* 1987;161:715-27.
  - 466.Wiltschko W. La boussole magnétique des merles européens. *Science* 1972;176:62-4.
  - 467.Wiltschko W, Wiltschko R. Magnetic orientation in birds. *Curr Ornithol* 1988;5:67-121.
  - 468.Wiltschko W, Wiltschko R. Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. *J Comp Physiol* 2005;191A:675-93.
  - 469.Fuxjager MJ, Eastwood BS, Lohmann KJ. Orientation des tortues de mer caouannes en éclosion aux champs magnétiques régionaux le long d'une voie migratoire transocéanique. *J Exp Biol* 2011;214 : 2504-8.
  - 470.Collett TS, Collett M. Animal navigation : following signposts in the sea. *Curr Biol* 2011;21:R843-6.
  - 471.Gould JL. Animal navigation : longitude at last. *Curr Biol* 2011;21 : R225-7.
  - 472.Merrill MW, Salmon M. Magnetic orientation by hatchling loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) from the Gulf of Mexico. *Mar Biol* 2010;158:101-12.
  - 473.Maniere X, Lebois F, Matic I, Ladoux B, Di Meglio J-M, Hersen P. Running worms : *C. elegans* self-sorting by electrotaxis. *PloS One* 2011;6:e16637.
  - 474.Hung Y-C, Lee J-H, Chen H-M, Huang GS. Effets des champs magnétiques statiques sur le développement et le vieillissement de *Caenorhabditis elegans*. *J Exp Biol* 2010;213:2079-85.

475. Sukul NC, Croll NA. Influence de la différence de potentiel et du courant sur l'électrotaxie de *Caenorhabditis elegans*. *J Nematol* 1978;10 : 314-17.
476. Gabel CV, Gabel H, Pavlichin D, Kao A, Clark DA, Samuel ADT. Neural circuits mediate electrosensory behavior in *Caenorhabditis elegans*. *J Neurosci* 2007;27:7586-96.
477. Daniells C, Duce I, Thomas D, Sewell P, Tattersall J, de Pomerai D. Nématodes transgéniques comme biomoniteurs du stress induit par les micro-ondes. *Mutat Res* 1998;399:55-64.
478. Tkalec M, Stambuk A, Srut M, Malarić K, Klobučar GI. Effets oxydatifs et génotoxiques des champs électromagnétiques de 900 MHz chez le ver de terre *Eisenia fetida*. *Ecotoxicol Environ Saf* 2013;90:7-12.
479. Jakubowska M, Urban-Malinga B, Otremba Z, Andrulewicz E. Effet du champ électromagnétique basse fréquence sur le comportement et la bioénergétique du polychète *Hediste diversicolor*. *Mar Environ Res* 2019;150:104766.
480. Hanslik KL, Allen SR, Harkenrider TL, Fogerson SM, Guadarrama E, Morgan JR. La capacité de régénération de la moelle épinière de la lamproie n'est pas altérée après une transection répétée. *PLoS One* 2019;14 : e0204193.
481. Nittby H, Moghadam MK, Sun W, Malmgren L, Eberhardt J, Persson BR, et al. Effets analgésiques des champs électromagnétiques de radiofréquence GSM-1900 non thermiques chez l'escargot terrestre *Helix pomatia*. *Int J Radiat Biol* 2011;88:245-52.
482. Goodman EM, Greenbaum B, Marron MT. Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on *Physarum polycephalum*. *Radiat Res* 1976;66:531-40.
483. Friend AW, Finch ED, Schwan HP. Low frequency electric field induced changes in the shape and motility of amoebas. *Science* 1975;187:357-9.
484. Marron MT, Goodman EM, Greenbaum B, Tipnis P. Effects of sinusoidal 60-Hz electric and magnetic fields on ATP and oxygen levels in the slime mold, *Physarum polycephalum*. *Bioelectromagnetics* 1986;7:307-14.
485. Luchian A-M, Lungulescu E-M, Voina A, Mateescu C, Nicula N, Patroi E. Évaluation de l'effet du champ magnétique de 5-10 mT sur les microalgues *Chlorella sorokiniana*. *Electroteh Electron Autom* 2017;65:123-7.
486. 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.
487. Cammaerts MC, Debeir O, Cammaerts R. Changes in *Paramecium caudatum* (Protozoa) near a switched-on GSM telephone. *Electromagn Biol Med* 2011;30:57-66.
488. Botstein D, Fink GR. La levure : un organisme expérimental pour la biologie du 21<sup>e</sup> siècle. *Genetics* 2011;189:695-704.
489. Lin KW, Yang CJ, Lian HY, Cai P. L'exposition aux CEM-ELF et aux CEM-FR augmente le taux de transport du glucose et le cycle TCA dans la levure bourgeonnante. *Front Microbiol* 2016;7:1378.
490. Mercado-Sáenz S, Burgos-Molina AM, López-Díaz B, Sendra-Portero F, Ruiz-Gómez MJ. Effet de l'exposition aux champs magnétiques sinusoïdaux et pulsés sur le vieillissement chronologique et la stabilité cellulaire de *S. cerevisiae*. *Int J Radiat Biol* 2019;95:1588-96.
491. Wang J, Bai Z, Xiao K, Li X, Liua Q, Liua X, et al. Effet du champ magnétique statique sur la corrosion de moule des cartes de circuit imprimé. *Bioelectrochemistry* 2020;131:107394.
492. Sun L, Li X, Ma H, He R, Donkor PO. Changements globaux de l'expression génique reflétant les effets pléiotropiques de *Irpex lacteus* induits par un champ électromagnétique de faible intensité. *Bioelectromagnetics* 2019;40:104-17.
493. Buzina W, Lass-Flörl C, Kropshofer G, Freund MC, Marth E. The polypore mushroom *Irpex lacteus*, a new causative agent of fungal infections. *J Clin Microbiol* 2005;43:2009-2011.
494. Sztarfrowski D, Suchodolski J, Muraszko J, Sigler K, Krasowska A. L'influence des pôles N et S du champ magnétique statique (SMF) sur la formation des hyphes de *Candida albicans* et l'activité antifongique de l'amphotéricine B. *Folia Microbiol* 2019;64:727-34.
495. Mah TF, O'Toole GA. Mechanisms of biofilm resistance to antimicrobial agents. *Trends Microbiol* 2001;9:34-9.
496. Pfaller MA. Nosocomial candidiasis : emerging species, reservoirs, and modes of transmission. *Clin Infect Dis* 1996;22 : S89-94.
497. Martel CM, Parker JE, Bader O, Weig M, Gross U, Warrilow AGS, et al. A clinical isolate of *Candida albicans* with mutations in ERG11 (encoding sterol 14 $\alpha$ -demethylase) and ERG5 (encoding C22 desaturase) is cross resistant to azoles and amphotericin B. *Antimicrob Agents Chemother* 2010;54:3578-83.
498. Novickij V, Staigvila G, Gudikaitė R, Zinkevičienė A, Girkontaitė I, Paškevičius A, et al. Le champ électrique pulsé de durée nanoseconde associé à l'acide formique déclenche une apoptose dépendante de la caspase chez les levures pathogènes. *Bioélectrochimie* 2019;128 : 148-54.
499. Choe M, Choe W, Cha S, Lee I. Modifications du transport cationique dans la levure transformée AtCAX5 par les environnements de champ électromagnétique. *J Biol Phys* 2018;44:433-48.
500. Lian HY, Lin KW, Yang C, Cai P. La génération et la propagation du prion de levure [URE3] sont élevées sous champ électromagnétique. *Chaperons du stress cellulaire* 2018;23:581-94.
501. Zimmer C. Les bactéries câblées forment le réseau électrique de la nature : Nous avons une planète électrique, les bactéries électroactives faisaient passer du courant dans des "fils" bien avant que les humains n'apprennent le truc. *New York Times*, Science 1<sup>er</sup> juillet 2019. Disponible sur : <https://www.nytimes.com/2019/07/01/science/bacteria-microbes-electricity.html>.
502. Nyrop JE. Un effet spécifique des courants électriques à haute fréquence sur les objets biologiques. *Nature* 1946;157:51.
503. Chung HJ, Bang W, Drake MA. Stress response of *Escherichia coli*. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 2006;5:52-64.
504. Salmen SH. Effets biologiques non-thermiques du champ électromagnétique sur les bactéries-une revue. *Am J Res Commun* 2016;4:16-28.
505. 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.
506. Mohd-Zain Z, Mohd-Ismai M, Buniyamin N. Effets du champ électromagnétique haute fréquence généré par les téléphones portables sur la viabilité et la formation de biofilms de *Staphylococcus aureus*. *World Acad Sci Eng Technol* 2012;70:221-4.
507. Nakouti I, Hobbs G, Teethaisong Y, Phipps D. Une démonstration des effets athermiques de l'irradiation continue par micro-ondes sur la croissance et la sensibilité aux antibiotiques de *Pseudomonas aeruginosa* PAO1. *Biotechnol Prog* 2017;33:37-44.
508. Segatore B, Setacci D, Bennato F, Cardigno R, Amicosante G, Iorio R. Evaluations of the effects of extremely low-frequency electromagnetic fields on growth and antibiotic susceptibility of



- Escherichia coli* et *Pseudomonas aeruginosa*. Internet J Microbiol 2012;2012:587293.
509. Taheri M, Mortazavi S, Moradi M, Mansouri S, Nouri F, Mortazavi SAR, et al. *Klebsiella pneumonia*, un micro-organisme qui approuve les réponses non linéaires aux antibiotiques et à la théorie de la fenêtre après l'exposition au rayonnement radiofréquence électromagnétique Wi-Fi 2,4 GHz. J Biomed Phys Eng 2015;5:115.
  510. Taheri M, Mortazavi SM, Moradi M, Mansouri S, Hatam GR, Nouri F. Évaluation de l'effet du rayonnement radiofréquence émis par un routeur Wi-Fi et un simulateur de téléphone mobile sur la sensibilité antibactérienne des bactéries pathogènes *Listeria monocytogenes* et *Escherichia coli*. Dose Resp 2017;15. <https://doi.org/10.1177/1559325816688527>.
  511. Cellini L, Grande R, Di Campli E, Di Bartolomeo S, Di Giulio M, Robuffo I, et al. Réponse bactérienne à l'exposition de champs électromagnétiques de 50 Hz. Bioelectromagnetics 2008;29 : 302-11.
  512. Crabtree DPE, Herrera BJ, Sanghoon Kang S. La réponse des bactéries humaines au champ magnétique statique et au champ électromagnétique de radiofréquence. J Microbiol 2017;55:809-15.
  513. Mortazavi SMJ, Motamedifar M, Mehdizadeh AR, Namdari G, Taheri M. L'effet de la pré-exposition aux radiations de radiofréquence émises par un téléphone mobile GSM sur la susceptibilité des souris BALB/c à *Escherichia coli*. J Biomed Phys Eng 2012;2:139-46.
  514. Said-Salman IH, Jebai 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 Epidermis*. J Biomed Phys Eng 2019;9:579-86.
  515. Movahedi MM, Nouri F, Tavakoli Golpaygani A, Ataee L, Amani S, Taheri M. Schéma de sensibilité antibactérienne du *Pseudomonas aeruginosa* et du *Staphylococcus aureus* après exposition aux ondes électromagnétiques émises par un simulateur de téléphone mobile. J Biomed Phys Eng 2019;9:637-46.
  516. Sharma AB, Lamba OS, Sharma L, Sharma A. Effect of mobile tower radiation on microbial diversity in soil and antibiotic resistance. In : International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC). Inde : G. L. Bajaj Inst. of Technology and Management Greater Noida, U. P. ; 2018. <https://doi.org/10.1109/PEEIC.2018.8665432>.
  517. Potenza L, Ubaldi L, De Sanctis R, De Bellis R, Cucchiariini L, Dachà M. Effects of a static magnetic field on cell growth and gene expression in *Escherichia coli*. Mutat Res 2004;561:53-62.
  518. Zaporozhan V, Ponomarenko A. Mechanisms of geomagnetic field influence on gene expression using influenza as a model system : basics of physical epidemiology. Int J Environ Res Publ Health 2010;7:938-65.
  519. Ertel S. Influenza pandemics and sunspots-asing the controversy. Naturwissenschaften 1994;8:308-11.
  520. Hope-Simpson RE. Taches solaires et grippe : une corrélation. Nature 1978 ; 275:86.
  521. Yeung JW. A hypothesis : sunspot cycles may detect pandemic influenza A in 1700-2000 A.D. Med Hypotheses 2006;67:1016-22.
  522. Galland P, Pazur A. Magnétoréception dans les plantes. J Plant Res 2005;118:371-89.
  523. Czerwińska M, Januszkiewicz L, Vian A, Lázaro A. L'influence du rayonnement bioactif de la téléphonie mobile au niveau d'une communauté végétale - mécanismes et indicateurs possibles des effets. Ecol Indic 2020;108:105683.
  524. Wohlleben P. La vie cachée des arbres, ce qu'ils ressentent, comment ils communiquent ? Vancouver, BC, Canada : Greystone Books ; 2015. p. 8-12.
  525. Gagliano M, Mancuso S, Robert D. Toward understanding plant bioacoustics. Trends Plant Sci 2012;17:323-5.
  526. Oskin B. Jardin sonore : les plantes peuvent-elles réellement parler et entendre ? LiveScience ; 2013. Disponible à l'adresse : <https://www.livescience.com/27802-plants-trees-talk-with-sound.html>.
  527. Halgamuge MN. Faible exposition aux radiofréquences du rayonnement des téléphones portables sur les plantes. Electromagn Biol Med 2017 ; 36:213-35.
  528. Volkrodt W. Les micro-ondes sont-elles confrontées à un fiasco similaire à celui qu'a connu l'énergie nucléaire ? Wetter-Boden-Mensch. Allemagne : Waldbrunn-Wk ; 1991.
  529. Kasevich RS. Bref aperçu des effets des champs électromagnétiques sur l'environnement. In : Levitt BB, éditeur. Cell Towers, Wireless Convenience or Environmental Hazards ? Proceedings of the "Cell Towers Forum" State of the Science/State of the Law. Bloomington, IN : iUniverse edition ; 2011:170-5.
  530. Vashisth A, Nagarajan S. Effet sur la germination et les caractéristiques de croissance précoce des graines de tournesol (*Helianthus annuus*) exposées à un champ magnétique statique. J Plant Physiol 2010;167:149-56.
  531. Mild KH, Greenebaum B. Champs électromagnétiques rencontrés dans l'environnement et au travail. In : Barnes FS, Greenebaum B, éditeurs. Bioengineering and biophysical aspects of electromagnetic fields. Boca Raton, FL, USA : CRC Press ; 2007:440 p.
  532. Burr HS. Blueprint for immortality, the electric patterns of life. Saffron Walden, Royaume-Uni : C.W. Daniel Company Ltd. ; 1972.
  533. Chen YB, Li J, Liu JY, Zeng LH, Wan Y, Li YR, et al. Effet des impulsions électromagnétiques (EMP) sur l'apprentissage associatif chez les souris et étude préliminaire du mécanisme. Int J Radiat Biol 2011;87:1147-54.
  534. Huss A, Egger M, Hug K, Huwiler-Müntener K, Rössli M. Source of funding and results of studies of health effects of mobile phone use : systematic review of experimental studies. Environ Health Perspect 2007;115:1-4.
  535. Geddes P. The life and work of Sir Jadadis C. Londres, Royaume-Uni : Bose. Publisher : Longmans, Green and Co. ; 1920.
  536. Emerson DT. Le travail de Jagadis Chandra Bose : 100 ans de recherche sur les ondes millimétriques. IEEE Trans Microw Theor Tech 1997 ; 45:2267-73.
  537. Markson R. Potentiels des arbres et facteurs externes. In : HS Burr, S Walden, éditeur. Blueprint for immortality, the electric patterns of life. UK : C.W. Daniel Company Ltd ; 1972:166-84 pp.
  538. Balodis V, Brumelis G, Kalvickis K, Nikodemus O, Tjarve D, Znotiga V. Does the Skrunda Radio Location Station diminish the radial growth of pine trees ? Sci Total Environ 1996;180:57-64.
  539. Hajnourouzi A, Vaezzadeh M, Ghanati F, Jamnezhad H, Nahidian B. Promotion de la croissance et diminution du stress oxydatif dans les semis de maïs par une combinaison de champs géomagnétiques et électromagnétiques faibles. J Plant Physiol 2011;168:1123-8.
  540. Radhakrishnan R. Le champ magnétique régule les fonctions des plantes, leur croissance et améliore leur tolérance aux stress environnementaux. Physiol Mol Biol Plants 2019;25:1107-19.
  541. 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.
  542. Vian A, Davies E, Gendraud M, Bonnet P. Réponses des plantes aux champs électromagnétiques de haute fréquence. BioMed Res Int 2016;2016 : 1830262.

- 543.Evered C, Majevadia B, Thompson DS. La teneur en eau de la paroi cellulaire a un effet direct sur l'extensibilité des hypocotyles en croissance du tournesol (*Helianthus annuus* L.). *J Exp Bot* 2007;58:3361-71.
- 544.Belyavskaya NA. Ultrastructure and calcium balance in meristem cells of pea roots exposed to extremely low magnetic fields. *Adv Space Res* 2001;28:445-50.
- 545.Kumar A, Kaur S, Chandel S, Singh HP, Batish DR, Kohli RK. Comparaison de la cyto- et de la génotoxicité des radiations des champs électromagnétiques de 900 MHz et 1800 MHz dans les méristèmes des racines d'*Allium cepa*. *Ecotoxicol Environ Saf* 2020;188:109786m.
- 546.Chandel S, Kaur S, Issa M, Singh HP, Batish DR, Kohli RK. Évaluation des effets immédiats et tardifs des radiations des téléphones mobiles à 2100 MHz sur l'activité mitotique et l'intégrité de l'ADN dans les méristèmes racinaires d'*Allium cepa*. *Protoplasma* 2019;256:1399-407.
- 547.Stefi AL, Margaritis LH, Christodoulakis NS. L'effet du rayonnement non ionisant sur les plantes cultivées d'*Arabidopsis thaliana* (Col.). *Flora* 2016;223:114-20.
- 548.Stefi AL, Margaritis LH, Christodoulakis NS. Les séquelles d'une exposition à long terme aux rayonnements non ionisants sur des plants de pin cultivés en laboratoire (*Pinus halepensis* M.). *Flora* 2017;234 : 173-86.
- 549.Stefi AL, Margaritis LH, Christodoulakis NS. L'effet du rayonnement non ionisant sur les plants de coton des hautes terres (*Gossypium hirsutum* L.) exposés et cultivés en laboratoire. *Flora* 2017;226 : 55-64.
- 550.Stefi AL, Margaritis LH, Christodoulakis NS. L'effet du rayonnement non ionisant sur les plantes de maïs (*Zea mays* L.) exposées et cultivées en laboratoire. *Flora* 2017;233:22-30.
- 551.Kumar A, Singh HP, Batish DR, Kaur S, Kohli RK. La croissance précoce des semis de maïs (*Zea mays*) inhibée par les radiations CEM (1800 MHz) implique des altérations du métabolisme de l'amidon et du saccharose. *Protoplasma* 2015;253:1043-9.
- 552.Jayasanka SMDH, Asaeda T. L'importance des micro-ondes dans l'environnement et leurs effets sur les plantes. *Environ Rev* 2014;22 : 220-8.
- 553.Waldman-Selsam C, Balmori-de la Puente A, Helmut Breunig H, Balmori A. Le rayonnement de radiofréquence blesse les arbres autour des stations de base de téléphonie mobile. *Sci Total Environ* 2016;572 : 554-69.
- 554.Tanner JA, Romero-Sierra C. Biological effects of nonionizing radiation : an outline of fundamental laws. *Ann N Y Acad Sci* 1974;238:263-72.
- 555.Scialabba A, Tamburello C. Microwave effects on germination and growth of radish (*Raphanus sativus* L.) seedlings. *Acta Bot Gall* 2002;149:113-23.
- 556.Tafforeau M, Verdus MC, Norris V, White GJ, Cole M, Demarty M, et al. Plant sensitivity to low intensity 105 GHz electromagnetic radiation. *Bioelectromagnetics* 2004;25:403-7.
- 557.Ragha L, Mishra S, Ramachandran V, Bhatia MS. Effets des champs de micro-ondes de faible puissance sur la germination et le taux de croissance des graines. *J Electromagn Anal Appl* 2011;3:165-71.
- 558.Jovićević Petrović J, Karlić V, Petrović I, Ćirković S, Ristić-Djurović JL, Raićević V. Biomagnetic priming-possible strategy to revitalize old mustard seeds. *Bioelectromagnetics* 2021;42:238-49.
- 559.Klink A, Polechonska L, Dambiec M, Bienkowski P, Klink J, Salamacha Z. L'influence d'un champ électrique sur la croissance et la teneur en métaux traces des plantes aquatiques. *Int J Phytoremediation* 2019;21:246-50.
- 560.Kral N, Ougolnikova AH, Sena G. Un champ électrique imposé de l'extérieur améliore la régénération des extrémités des racines. **DE GRUYTER** *Regeneration* 2016 ; 3:156-67.
- 561.Akbal A, Kiran Y, Sahin A, Turgut-Balik D, Balik HH. Effets des ondes électromagnétiques émises par les téléphones mobiles sur la germination, la croissance des racines et la division mitotique des cellules de l'extrémité des racines de *lens culinaris medik*. *Pol J Environ Stud* 2012;21:23-9.
- 562.Bhardwaj J, Anand A, Nagarajan S. Changements biochimiques et biophysiques associés à la magnétoprime dans les graines de concombre en germination. *Plant Physiol Biochem* 2012;57:67-73.
- 563.Bhardwaj J, Anand A, Pandita VK, Nagarajan S. Le champ magnétique pulsé améliore la qualité des graines de pois verts vieillis par homéostasie de la teneur en radicaux libres. *J Food Sci Technol* 2016;53 : 3969-77.
- 564.Patel P, Kadur Narayanaswamy G, Kataria S, Baghel L. Implication de l'oxyde nitrique dans l'amélioration de la germination et de la croissance des semis des graines de maïs magnétoprimées. *Plant Signal Behav* 2017;12:e1293217.
- 565.Payez A, Ghanati F, Behmanesh M, Abdolmaleki P, Hajnorouzi A, Rajabbeigi E. Augmentation de la germination, de la croissance et de l'intégrité membranaire des semis de blé par exposition à un champ électromagnétique statique et à un champ électromagnétique de 10 KHz. *Electromagn Biol Med* 2013;32:417-29.
- 566.Rajabbeigi E, Ghanati F, Abdolmaleki P, Payez A. Capacité antioxydante des cellules de persil (*Petroselinum crispum* L.) en relation avec les niveaux de ferritine induits par le fer et le champ magnétique statique. *Electromagn Biol Med* 2013;32:430-41.
- 567.Sharma VP, Singh HP, Kohli RK, Batish DR. Le rayonnement des téléphones mobiles inhibe la croissance des racines de vigna radiata (haricot mungo) en induisant un stress oxydatif. *Sci Total Environ* 2009a;407:5543-7.
- 568.Sharma VP, Singh HP, Kohli RK. Effet des CEM des téléphones mobiles sur les changements biochimiques dans les semis émergents de *Phaseolus aureus* Roxb. *Ecscan* 2009b;3:211-14.
- 569.Shine MB, Guruprasad KN, Anand A. Effet des intensités de champ magnétique stationnaire de 150 et 200 mT sur la production d'espèces réactives de l'oxygène dans le soja. *Bioelectromagnetics* 2012;33:428-37.
- 570.Singh HP, Sharma VP, Batish DR, Kohli RK. Les radiations des champs électromagnétiques des téléphones cellulaires affectent la rhizogenèse par l'altération des processus biochimiques. *Environ Monit Assess* 2012;184:1813-21.
- 571.Tkalec M, Malari K, Pevalak-Kozlina B. Exposure to radiofrequency radiation induces oxidative stress in duckweed *lemna minor* L. *Sci Total Environ* 2007;388:78-89.
- 572.Roux D, Vian A, Girard S, Bonnet P, Paladian F, Davies E, et al. Champ électromagnétique de haute fréquence (900 MHz) et de faible amplitude (5 V m<sup>-1</sup>) : un véritable stimulus environnemental qui affecte la transcription, la traduction, le calcium et la charge énergétique chez la tomate. *Planta* 2008;227:883-91.
- 573.Roux D, Faure C, Bonnet P, Girard S, Ledoigt G, Davies E, et al. A possible role for extra-cellular ATP in plant responses to high frequency, low amplitude electromagnetic field. *Plant Signal Behav* 2008;3:383-5.
- 574.da Silva JA, Dobránszki J. Champs magnétiques : comment la croissance et le développement des plantes sont-ils impactés ? *Protoplasma* 2016;253:231-48.
- 575.Maffei ME. Effets des champs magnétiques sur la croissance, le développement et l'évolution des plantes. *Front Plant Sci* 2014;5:445.

---

**Matériel supplémentaire :** La version en ligne de cet article propose des documents supplémentaires (<https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0050>).