

Il s'agit de la traduction française de l'étude anglaise "Effets biologiques des CEM sur les insectes". Le titre original est Thill A, Cammaerts M-C, Balmori A. Biological Effects of Electromagnetic Fields on Insects: a Systematic Review and Meta-analysis. Paru en novembre 2023 dans la revue scientifique "Reviews on Environmental Health" aux éditions De Gruyter, en ligne : <https://doi.org/10.1515/reveh-2023-0072>

Alain Thill*, Marie-Claire Cammaerts, Alfonso Balmori

Effets biologiques des champs électromagnétiques sur les insectes : une revue systématique et une méta-analyse

Résumé: Dans le monde entier, le nombre d'insectes diminue à un rythme alarmant. L'utilisation de pesticides et les pratiques agricoles modernes jouent un rôle majeur dans ce phénomène. Les effets cumulatifs de multiples toxines à faible dose et la distribution des substances toxiques dans la nature commencent seulement à être étudiés de manière méthodique. Les recherches actuelles font état d'un autre facteur d'origine anthropique qui pourrait avoir des effets nocifs subtils : l'utilisation de plus en plus fréquente de champs électromagnétiques (CEM) provenant de technologies créées par l'homme. Cette revue systématique résume les résultats des études portant sur la toxicité des champs électromagnétiques chez les insectes. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les preuves des effets néfastes sur les insectes de l'infrastructure technologique croissante, en se concentrant particulièrement sur les lignes électriques et le réseau cellulaire. La prochaine génération de technologies de communication mobile, la 5G, est en cours de déploiement - sans avoir été testée en ce qui concerne les effets toxiques potentiels. Avec la quête de l'omniprésence technologique de l'humanité, les effets, même modestes, des champs électromagnétiques sur les organismes pourraient finir par atteindre un niveau de saturation qu'il n'est plus possible d'ignorer. Une vue d'ensemble des effets rapportés et des mécanismes biologiques de l'exposition aux champs électromagnétiques, qui tient compte des nouvelles découvertes en biologie cellulaire, est incluse. Les effets biologiques des CEM non thermiques sur les insectes sont clairement prouvés en laboratoire, mais seulement en partie sur le terrain, de sorte que les implications écologiques plus larges sont encore inconnues. Davantage d'études sur le terrain sont nécessaires, mais l'extrapolation à partir du laboratoire, qui est une pratique courante en écotoxicologie, justifie déjà l'augmentation du niveau de menace de l'impact des CEM environnementaux sur les insectes.

Mots-clés: rayonnement électromagnétique; haute fréquence ; basse fréquence ; téléphone portable ; drosophile ; abeille domestique.

Effets biologiques des champs électromagnétiques sur les insectes : une revue systématique et une méta-analyse

Titre abrégé : Effets biologiques des CEM sur les insectes

Alain Thill¹, Marie-Claire Cammaerts², Alfonso Balmori³

¹ Chercheur indépendant, Luxembourg

² Chercheuse indépendante, retraitée de l'Université de Bruxelles

³ Chercheur indépendant, Valladolid, Espagne.

ORCID ID : 0000-0002-4118-0912

*Auteur correspondant:

Alain Thill, Msc Env Sciences (alain.thill@protonmail.com)

Introduction

Les insectes font partie intégrante de tous les écosystèmes. On estime que plus de 80% des plantes à fleurs ont besoin de pollinisateurs [1]. En l'absence d'insectes pollinisateurs, environ un tiers de toutes les espèces de plantes sauvages ne produiraient aucune graine, et la moitié d'entre elles verraient leur fertilité diminuer de 80% [2]. Les pollinisateurs contribuent à la productivité de la plupart des cultures agricoles, et leur absence ne pourrait être compensée que par des substituts coûteux [3]. En outre, les insectes contribuent à la dispersion des graines, au cycle des nutriments, à la décomposition des détritiques et constituent une étape essentielle des chaînes alimentaires [4]. De nombreuses espèces d'amphibiens, de reptiles et d'oiseaux dépendent des insectes pour leur alimentation, au moins pendant les périodes critiques de croissance [5, 6]. La disparition des pollinisateurs pourrait entraîner une augmentation annuelle du nombre de décès humains dans le monde d'environ 1,4 million, ce qui correspond à une augmentation de 2,7% [7, 8].

Le déclin des insectes a commencé il y a plusieurs décennies et est causé par une multitude de facteurs aux effets cumulatifs [9–11]. Les principales causes sont l'utilisation de pesticides et la destruction, la dégradation ou la fragmentation des habitats naturels et, dans une moindre mesure, les espèces invasives, le changement climatique et la surexploitation [12]. Les polluants dont la présence dans la nature a drastiquement augmenté au cours des dernières décennies sont également susceptibles d'être impliqués: les perturbateurs endocriniens, les métaux lourds et les champs électromagnétiques [13–15]. Les produits agrochimiques ont des effets toxiques synergiques: deux pesticides, administrés chacun à une dose qui tue 10% des animaux de laboratoire, peuvent en tuer jusqu'à 90% lorsqu'ils sont administrés simultanément [16].

Cette étude systématique conforme aux lignes directrices PRISMA [17] porte sur les effets des champs électromagnétiques à basse et haute fréquence sur les insectes. Les champs électromagnétiques (CEM) sont des champs non quantiques produits par des charges électriques en mouvement, qui exercent des forces sur tout objet chargé se trouvant à proximité. Ils sont constitués de deux composantes de champ distinctes mais inséparables (électrique et magnétique) perpendiculaires l'une à l'autre, comme le décrivent les

équations de Maxwell [18]. Les rayonnements électromagnétiques naturels (EMR), par exemple la lumière du soleil et les résonances dans l'atmosphère causées par les décharges de foudre (résonances de Schumann), diffèrent des CEM d'origine humaine. Les CEM anthropogéniques sont cohérents, polarisés et plus puissants que les CEM naturels [19]. On distingue les champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence (CEM-BF), principalement les lignes électriques à haute tension et le courant de secteur avec une fréquence de 50 ou 60 Hz, et les "radiofréquences", c'est-à-dire les CEM de haute fréquence (CEM-HF), par exemple le Wi-Fi et la téléphonie mobile, mais aussi le Radar, principalement dans la gamme de quelques GHz [20]. Techniquement, les CEM-HF d'origine anthropique actuellement courants entrent dans la catégorie des ultra ou super hautes fréquences, c'est-à-dire des micro-ondes (300 MHz-300 GHz), mais elles seront désignées ici par le terme HF. Les CEM-HF se propagent de manière ondulatoire, comme un rayonnement (c'est-à-dire en champ lointain), alors que les CEM-BF provenant des lignes électriques sont mieux décrites comme étant liées à ces lignes électriques (c'est-à-dire en champ proche). Les CEM-HF technologiques sont généralement pulsés ou modulés par pulsation, ce qui signifie que la fréquence porteuse (une onde sinusoïdale) est émise, coupée et réémise plusieurs fois par seconde. Les valeurs typiques sont de 10 Hz (WiFi), 100 Hz (DECT), 217 Hz (GSM) jusqu'à 1000 Hz et plus (4G et 5G). L'utilisation généralisée des nouvelles technologies qui utilisent les CEM-HF, c'est-à-dire le WiFi et les téléphones portables, a commencé à partir de 1990. En général, on distingue les effets thermiques et non thermiques des CEM-HF. L'effet thermique est basé sur le chauffage direct des tissus (comme dans un four à micro-ondes) et est biologiquement pertinent pour une augmentation de plus de 1° C. En dessous des intensités où l'échauffement des tissus est substantiel, plusieurs effets non thermiques ont été décrits, par exemple la résonance paramétrique et l'audition des micro-ondes chez l'homme (effet Frey) [21, 22]. De récentes découvertes en biologie cellulaire indiquent l'implication de multiples mécanismes ou voies pour expliquer les effets biologiques des CEM observés expérimentalement, comme indiqué ci-dessous.

Couplage éphaptique et perception des CEM par les canaux ioniques pour la synchronisation de l'activité neuronale

Les animaux ont des rythmes stables dans leur cerveau, mesurables par électroencéphalogramme (EEG) ou électrodes, par exemple. Chez les abeilles et les criquets, une fréquence principale de 18 Hz ou 20 Hz a été observée, et de 20 à 30 Hz chez les mouches des fruits *Drosophila* [23–25]. La résonance paramétrique décrit la modification de l'EEG humain ou animal observée lors de l'exposition à des CEM pulsés [26, 27]. Les CEM pulsés à des fréquences cérébrales ont des effets beaucoup plus importants que les CEM continus non pulsés. Il s'agit probablement d'une conséquence du mode de fonctionnement des canaux ioniques dépendants du voltage (CIDV) responsables de la transmission des impulsions nerveuses, et qui pourrait donc affecter tous les animaux et toutes les plantes [22, 28]. Les CIDV, par exemple les canaux Na⁺, K⁺, Ca²⁺, ainsi que le récepteur N-méthyl-D-aspartate (NMDA), sont sensibles aux intensités non thermiques (c'est-à-dire très faibles) des CEM endogènes. La perception des CEM environnants provenant de l'activité neuronale peut conduire au couplage des fibres nerveuses en raison des

champs électriques locaux [29–31]. Ce "couplage éphaptique" influence la synchronisation du déclenchement des potentiels d'action dans les neurones et semble jouer un rôle actif dans le cœur, l'hippocampe, le cervelet et les nerfs olfactifs ou antennaires [30, 32–35]. Il a été démontré que les CIDV réagissent au CEM-BF [36–39]. L'activation des canaux sodiques ou potassiques voltage dépendants ou des récepteurs NMDA conduit indirectement à une activation accrue des canaux calciques dépendants du voltage synaptiques (CCDV) et à la libération de calcium [40]. Le calcium est un messager secondaire important dans tous les organismes, et des niveaux élevés de calcium ont un effet stimulant, par exemple sur la chaîne respiratoire et les muscles [41, 42]. Une suractivation de la neurotransmission dépendante du calcium conduit à la production d'espèces réactives de l'oxygène (ERO) telles que le peroxy-nitrite, c'est-à-dire au stress oxydatif. Le stress oxydatif chronique a un effet toxique sur les organismes, par exemple en bloquant la chaîne respiratoire, en endommageant les mitochondries, en désactivant le système immunitaire et en augmentant le taux de mutation [43, 44].

Il a été démontré que les tempêtes géomagnétiques provoquées par les éruptions solaires causent du stress chez les animaux, un fait bien documenté chez les poissons et les *Daphnia*, les oiseaux migrateurs et les abeilles domestiques [45–47]. Lors des éruptions solaires ayant un impact sur la Terre, la distance entre l'ionosphère et le sol change, ce qui modifie les résonances de Schumann [48]. Il se peut que la perception des fréquences stables des résonances de Schumann (7,83 Hz, 14 Hz, 20 Hz) ait été une étape clé dans l'histoire de l'évolution qui a permis d'obtenir des biorythmes stables [49, 50]. Le cœur du rat réagit à des champs magnétiques très faibles dans la plage de la première résonance de Schumann (7,6–8 Hz) [51]. Ce phénomène peut être médié par les CCDV et les pompes Ca²⁺ du réticulum sarcoplasmique (SERCA), car des bloqueurs spécifiques abolissent l'effet [52]. Ceci est en accord avec les calculs théoriques de Panagopoulos et Balmori, et pourrait être la façon dont les animaux perçoivent les tremblements de terre à l'avance, puisque les tremblements de terre sont précédés par des perturbations du champ géomagnétique et de l'ionosphère [53, 54]. L'hypothèse selon laquelle les CCDV sont le principal canal par lequel les effets biologiques des CEM sont produits repose sur des observations selon lesquelles les CEM provoquent la libération de calcium (entraînant un stress oxydatif), que les bloqueurs de canaux calciques protègent des effets néfastes, ainsi que sur des bases théoriques [55, 56].

Sens magnétique

Un sens magnétique a été décrit dans la plupart des ordres d'insectes, par exemple chez les papillons, les coléoptères, les mouches, les fourmis et les abeilles, les termites et les cafards [57–61]. Il n'a pas encore été élucidé de manière concluante, et il existe au moins deux mécanismes de perception du champ géomagnétique: le cryptochrome et la magnétite, tous deux présents chez les vertébrés et les insectes [62, 63]. En outre, certains poissons et insectes (par exemple l'anguille électrique et le frelon) possèdent des organes ou des cellules spécialisées dans la détection des champs électriques [64].

Cryptochrome

Le cryptochrome (CRY), une molécule de la famille des récepteurs de la lumière bleue, régule le rythme circadien chez les insectes. De plus, le cryptochrome est magnétosensible une

fois activé par une lumière de haute énergie via le mécanisme des paires de radicaux [65]. Le CRY se trouve dans les yeux et le cerveau de la plupart des insectes et vertébrés, où il joue le rôle d'horloge moléculaire (voir [66]). En utilisant le mutant cryptochrome *Drosophila*, Fedele et al. ont montré que le cryptochrome est nécessaire pour le retard de la rythmicité circadienne induit par la lumière et les champs électromagnétiques [67]. Fogle et al. ont montré que le CRY, par l'intermédiaire d'espèces réactives de l'oxygène (ERO), ouvre le canal potassique Kv dans les neurones "pacemaker" de *Drosophila*, ce qui entraîne une augmentation du taux de déclenchement de potentiels d'action [36]. Sherrard et al. ont étudié la production de radicaux libres chez la *Drosophila* [68]. Les dispositifs CEMP ("champ électromagnétique pulsé") sont des bobines ayant des applications médicales, par exemple la cicatrisation accélérée de plaies ou de fractures osseuses [40]. Le type sauvage *Drosophila* a montré une réponse d'aversion et la formation d'ERO après irradiation avec un CEMP de 10 Hz. Ce n'était pas le cas chez le mutant *Drosophila* déficient en CRY. Un effet chez le type sauvage n'a été constaté qu'en présence de lumière bleue ou blanche, car le cryptochrome des insectes a besoin de photons bleus à haute énergie pour être activé. En revanche, les punaises *Pyrrhocoris* semblent posséder un mécanisme permettant de maintenir le cryptochrome à l'état activé pendant plus d'une journée après exposition à la lumière, et il reste à voir dans quelle mesure les différents ordres d'insectes sont comparables à cet égard [69]. Il a été démontré que le CRY est nécessaire à la formation de radicaux libres lorsqu'il est traité avec des bobines de CEMP, et cela peut s'appliquer à toutes les sources de CEM-BF [68]. L'activation du cryptochrome par les CEM, prouvée et largement élucidée chez les oiseaux et les insectes, entraîne l'ouverture des CCDV dans les neurones de l'horloge chez *Drosophila* (Fig. 8). Comme ces neurones régulent la division cellulaire dans tout le corps, cela implique un effet promoteur du cancer, ce qui a été démontré *in vitro* [70–72].

Magnétite

Tous les insectes possèdent des cryptochromes dans leurs yeux et leur cerveau. Les cryptochromes oculaires ne fonctionnent comme magnétosenseurs que sous lumière bleue (lumière rouge dans le cas des oiseaux). Les insectes actifs dans l'obscurité semblent plutôt utiliser un sens magnétique basé sur la magnétite, ce qui a été confirmé expérimentalement chez les abeilles, les fourmis et les termites [60, 73, 74]. Chez les abeilles, les changements de taille des cristaux de magnétite provoquent une libération de calcium [75]. Les termites et les cafards utilisent une combinaison de CRY et de magnétite pour s'orienter - CRY pendant la journée, magnétite pendant la nuit ou dans l'obscurité [76–79].

Revue précédente dont les références ont été incluses dans cette revue

Revue de Cucurachi: „Les insectes sont un système cible utile pour l'étude des CEM-HF en raison de leur taille limitée, de leur cycle de vie court et de la possibilité de détecter facilement les erreurs de développement [80].”

Revue de Balmori: Balmori mentionne que les insectes réagissent depuis longtemps aux rayonnements électromagnétiques (non thermiques) dans la gamme des micro-ondes, puisque cela a été décrit pour la première fois il y a 50 ans par Carpenter et Livstone [81, 82]. Les micro-ondes pulsées

émises par les téléphones portables ou le WiFi perturbent le développement des mouches à fruits *Drosophila* et entraînent une diminution de la fécondité et une augmentation du taux de mutation ; ces effets ont été documentés par plusieurs groupes de recherche [83–85].

Revue de Levitt et al.: Levitt et al. est une étude en trois parties sur les effets des CEM sur la flore et la faune [86]. La deuxième partie traite des effets des CEM sur les animaux et énumère 140 références concernant les insectes. Citation: “De nombreux aspects comportementaux en biologie sont censés être synchronisés avec les champs naturels de la Terre et les résonances de Schumann. Mais aujourd'hui, pour la première fois dans l'histoire de l'évolution, nous avons recouvert la surface de la Terre d'une couverture de champs énergétiques artificiels sans savoir quelles pourraient en être les conséquences”.

Rapport EKLIPSE et examen de Vanbergen et al.: Un rapport détaillé a été rédigé à la demande de l'ONG anglaise “Bug-Life” [87, 88]. 39 études ont été évaluées selon les aspects écologiques, dont 26 ont été évaluées en plus selon les aspects techniques. Vanbergen et al, qui ont contribué au rapport EKLIPSE, ont évalué le risque pour les insectes pollinisateurs uniquement, excluant ainsi la plupart des études sur les CEM chez les insectes [89]. Les auteurs soulignent la nocivité avérée de la “lumière artificielle nocturne” et affirment que le seul effet clairement prouvé des rayonnements électromagnétiques artificiels à ce jour est la perturbation de l'orientation [90–92]. Il s'agit là d'une simple opinion des auteurs qui n'est pas étayée par la science, comme nous le verrons plus loin.

Méthodes

Recherche documentaire

Une recherche documentaire a été effectuée sur la base de données EMF-Portal [93], en utilisant les termes de recherche suivants: “insect drosophila bee apis pollinator ant termite locust cockroach” (séparés par “ou”). Les références des revues énumérées ci-dessus ont été extraites à l'aide de l'outil Crossref SimpleTextQuery, puis du paquet R ‘RefManager’ et intégrées dans une bibliographie commune. Une recherche Google Scholar et Pubmed Central pour les années 2012–2022 a été effectuée séparément, en utilisant les termes de recherche suivants : un de chaque : “insect ; drosophila ; bee ; apis ; pollinator ; ant ; termite ; locust ; cockroach” et tous les termes suivants (séparés par “ou”) : “EMR; EMF; electromagnetic field ; electromagnetic radiation ; electromagnetic ; high frequency ; HF; low frequency ; LF ; WiFi”.

Méthodologie de sélection des études

Les titres et les résumés de toutes les entrées ont été lus et les entrées qui n'étaient ni en anglais ni en allemand, ou qui n'étaient pas liées au sujet, ont été exclues. Ensuite, les articles en texte intégral ont été consultés, et seuls ceux décrivant des expériences avec des CEM sur des insectes, ne datant pas de plus de 1980, et prenant en compte les effets non thermiques, ont été conservés. Les études ont été classées comme non thermiques sur la base des mesures de température des tissus fournies ou des densités de puissance déclarées utilisées dans les expériences, si elles étaient inférieures aux limites de l'ICNIRP [94]. Certaines études sur le sens magnétique ont été utilisées pour l'introduction, mais

n'ont pas fait l'objet d'une analyse plus approfondie.

Évaluation de la qualité

Les études ont fait l'objet d'une évaluation de la qualité avant d'être incluses dans l'examen. La liste de contrôle des critères d'examen publiée par la Task Force of Academic Medicine et le comité GEA-RIME a été utilisée à cette fin, telle qu'adaptée par Bertagna et al. [55, 95]. Toutes les études pertinentes pour le sujet ont été examinées par l'auteur principal pour en vérifier la qualité à l'aide de 13 critères prédéfinis, et celles qui répondaient à au moins 11 des 13 critères ont été retenues [55].

Extraction et traitement des données

Toutes les études incluses dans la revue ont été évaluées et les données ont été enregistrées (par l'auteur principal) dans une feuille de calcul pour les CEM-HF et BF. Le format de la base de données de l'Oceania Radiofrequency Scientific Advisory Association (ORSAA) a été utilisé pour enregistrer les sources de CEM utilisées, les intensités de champ et la durée des expériences, ainsi que les résultats biologiques [96]. Des colonnes supplémentaires ont été ajoutées pour l'ampleur de l'effet (en pourcentage de changement par rapport au contrôle) et la direction de l'effet (nocif, bénéfique, incertain, nul). L'orientation de l'effet a été déterminée sur la base du jugement des auteurs des études respectives, ou sur la base d'une compréhension logique de la biologie (telle que l'augmentation de la mortalité ou l'apparition de mutations étant nocif), ou sur la base de variables corollaires que les auteurs de l'étude avaient mesurés. Par exemple, l'augmentation du stress oxydatif était généralement classée comme "incertaine", à moins qu'une réduction de la capacité de reproduction ou des dommages à l'ADN ne soient également observés, auquel cas elle était classée comme "nocive". Dans la mesure du possible, les données extraites ont été comparées aux valeurs déjà enregistrées dans la base de données ORSAA. Les durées d'exposition ont été converties en heures et les intensités de champ ou les densités de puissance en V/m, dans la mesure du possible, à l'aide des formules figurant dans l'annexe.

Les estimations de l'ampleur de l'effet ont été obtenues et normalisées en convertissant les changements de pourcentage en ratios de moyennes ("ratio of means", ROM) et en inversant le ratio de moyennes en cas de diminution. Ainsi, une diminution de 50% a été considérée comme un ROM de 0,5, et l'inverse de ce ratio, 2, a été noté comme estimation de l'ampleur de l'effet. De cette manière, les mesures de toxicité positives, telles que l'augmentation des dommages à l'ADN dans les ovaires, ont pu être comparées aux changements négatifs, tels que la réduction de la capacité de reproduction [97]. Les tailles d'effet des expériences ayant abouti à des résultats bénéfiques ont été inversées, de sorte que tous les résultats nocifs aient un ROM > 1, et tous les résultats bénéfiques un ROM < 1. Les bioeffets observés ont été classés dans les catégories suivantes: réduction de la capacité de reproduction (dommages aux ovules ou aux spermatozoïdes, réduction du nombre d'œufs pondus ou de la descendance), effets sur le développement (retard ou accélération du développement larvaire, apparition de mutations), dommages à l'ADN, altération de l'ADN ou de la transcription de l'ADN, altération de l'activité enzymatique ou du métabolisme, stress oxydatif, altération du comportement (vitesse de locomotion,

vitesse de réaction, orientation, réaction aux phéromones), altération de la mémoire, autres. La perturbation du sens de la direction ou de l'orientation a été incluse dans l'"altération du comportement" [89]. Les données ont été tracées dans RStudio.

Synthèse des données et analyse statistique

Une minorité d'études disposait des informations statistiques complètes nécessaires à la méta-analyse, et il était possible de déduire les erreurs standard des valeurs p pour un plus grand nombre d'études (paquet R "dmetar"). Les expériences qui ont fourni une taille d'effet mais qui ont été déclarées "non statistiquement significatives" ou "sans effet" ont été affectées d'une valeur p de 0,5. Une méta-analyse a été réalisée pour toutes les études sur les CEM-HF qui ont révélé des effets sur la reproduction chez *Drosophila*, ce sous-groupe étant celui qui a fait l'objet du plus grand nombre d'études. En outre, pour les appareils les plus souvent utilisés dans les études, il a été possible de dériver des estimations des tailles d'effet regroupées par méta-analyse, en utilisant les paquets R "meta" et "bayesmeta" [98, 99]. RStudio a été utilisé pour la synthèse des données, l'analyse et les graphiques.

Résultats

La recherche documentaire dans EMF-Portal a donné 413 résultats. Les bibliographies des revues précédentes et la recherche documentaire sur Pubmed et Google Scholar ont permis de trouver 291 études. Après élimination des doublons, 587 entrées au total ont été traitées comme suit et comme décrit dans l'organigramme PRISMA (Fig. 1).

Sélection des études

130 études relatives à des expériences sur les CEM chez les insectes, publiées après 1980, ont fait l'objet d'une évaluation de la qualité. 3 études sur les CEM qui sont des simulations informatiques ont été traitées séparément [100–102]. Ces études sont prospectives par nature et n'ont pas fourni de points de données pour les graphiques, mais ont fourni des informations sur les impacts à attendre dans le futur. 11 études ont été exclues en raison de lacunes qualitatives (absence de mesures des CEM, mauvaise procédure expérimentale, conception inadéquate des expériences, mauvais traitement des données ou absence de rapport sur les analyses statistiques) (cf. Tableaux suppl. 1 et 2). 119 études (64 études LF, 55 études HF) impliquant des expériences sur les CEM chez les insectes ont fait l'objet d'une extraction de données et ont été incluses dans les tableaux récapitulatifs (cf. Tableaux suppl. 3–6).

Tendances

185 articles (y compris des revues) sur les effets des CEM sur les insectes et 145 études sur la détection magnétique des insectes ont été publiés depuis 1980 (Fig. 2). Les tendances indiquent une légère augmentation de l'intérêt pour le sujet, mais il y a probablement un manque de sensibilisation aux effets biologiques des CEM en général, étant donné qu'ils ne font pas partie de la plupart des programmes d'études universitaires et qu'ils nécessitent des connaissances dans plusieurs domaines. En outre, le domaine de la recherche sur les CEM est sous-financé et considéré comme controversé.

La majorité des études ont été menées sur des mouches des fruits *Drosophila* ou des abeilles (Fig. 3A). En général, des téléphones portables, des systèmes de bobines ou des générateurs de signaux ont été utilisés (Fig. 3B). Les bobines de Helmholtz sont des bobines de fil alimentées par un courant de ligne et émettent des CEM à basse fréquence de 50 Hz. Dans 70% des études utilisant un système de bobines, ce sont des bobines de Helmholtz qui ont été utilisées. Néanmoins, une minorité d'études ont utilisé des bobines de Merritt, des solénoïdes ou des simples bobines électromagnétiques : toutes ces études ont été regroupées dans la catégorie "système de bobines". Les générateurs de signaux sont, dans le cas le plus simple, des oscilloscopes configurés pour produire des signaux à haute fréquence, avec des caractéristiques de signal similaires à celles des systèmes de communication sans fil (WiFi, cellulaire 1G à 5G, etc.). Le signal est généralement envoyé à une antenne conique pour émettre des

CEM-HF.

Dans les études CEM-HF, les intensités de rayonnement (ou les intensités de champ électrique) allaient de 0,00005 à 38200 mW/m², respectivement de 0,0043 à 120 V/m (Fig. 4). La durée d'exposition des insectes allait de 30 secondes à 8,5 mois. 64% des expériences ont indiqué une taille d'effet, 51% des expériences ont également indiqué une valeur p, tandis que 23% ont en outre indiqué des écarts types ou des erreurs types (ES). En dérivant les ES des valeurs p, 53% des expériences ou 39% des études ont pu être incluses dans la méta-analyse. Très peu des études incluses furent du type "essai contrôlé randomisé" (ECR). Toutefois, une méta-analyse de 2014 comparant les essais contrôlés randomisés aux études par observation uniquement conclut que ces études sont aussi efficaces que les essais contrôlés randomisés pour trouver et évaluer les effets dans le monde réel [103].

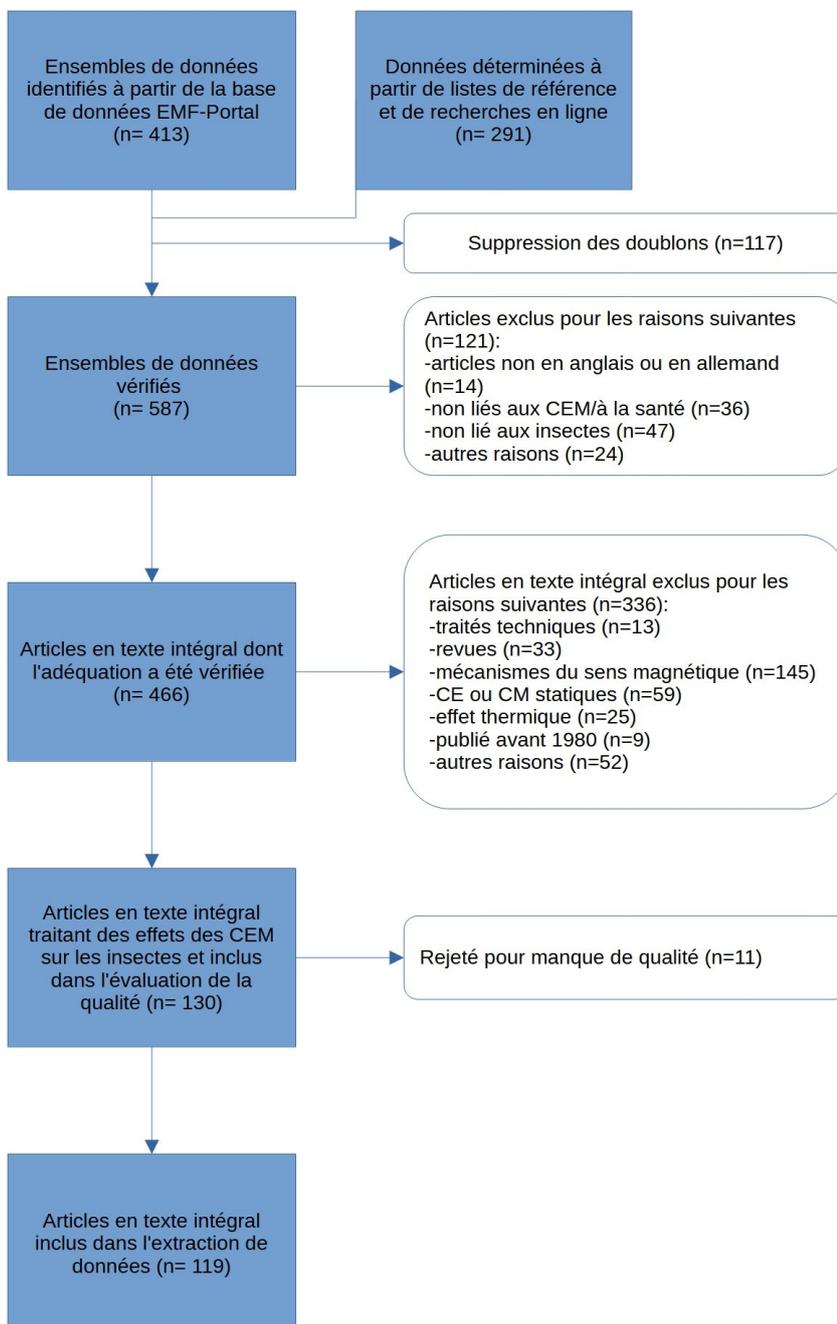


Figure 1 : Organigramme PRISMA pour la sélection des études.

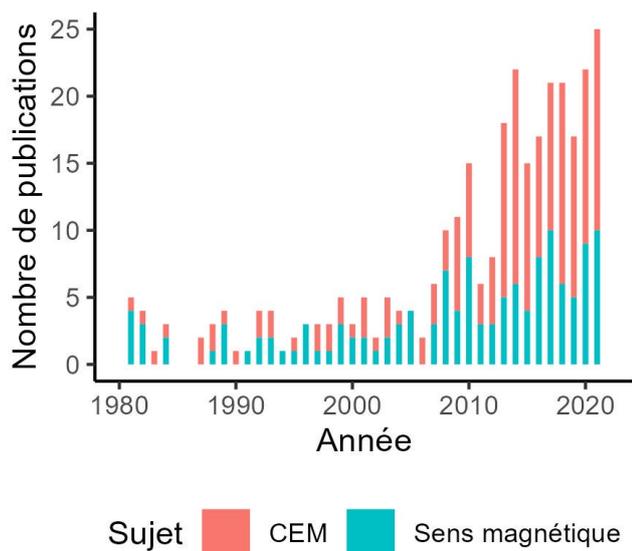


Figure 2 : Nombre de publications sur les insectes par an et par thème.

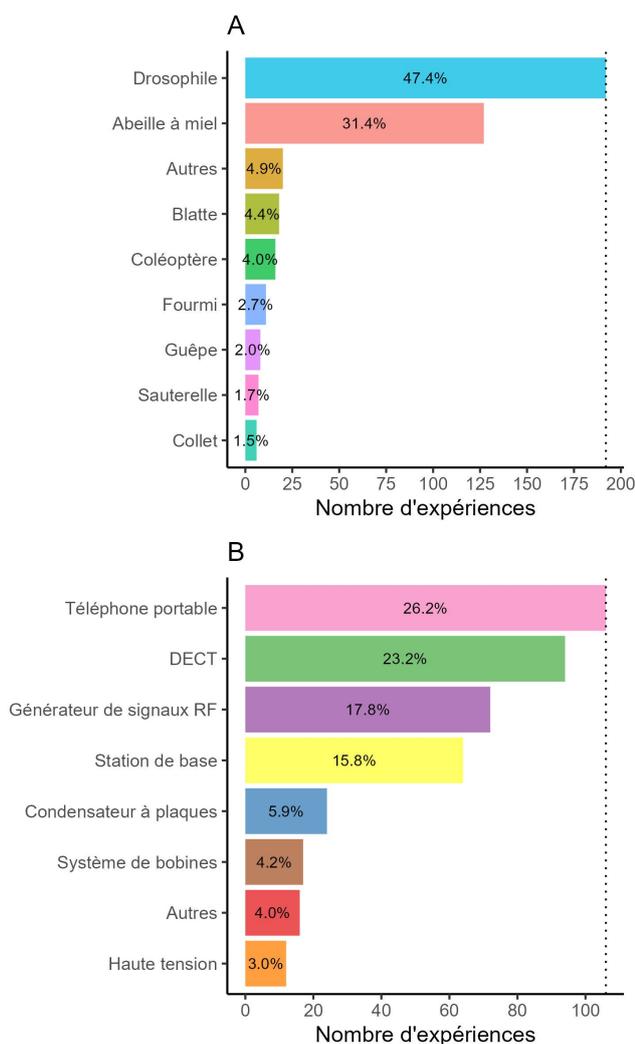


Figure 3 : Nombre et pourcentage de résultats expérimentaux publiés par espèce ou groupe d'insectes (A) et par source de CEM (B) utilisée dans les expériences.

Estimations de l'ampleur de l'effet de la toxicité

En ce qui concerne la toxicité des différentes sources de CEM (Fig. 5), les appareils HF - téléphone sans fil (DECT), téléphone cellulaire et générateur de signaux - semblent présenter une toxicité similaire. Les stations de base semblent moins nocives que les téléphones cellulaires, bien qu'elles utilisent toutes deux la même technologie. Cette divergence est probablement due au fait que les études sur les téléphones cellulaires sont généralement des études de laboratoire dans un environnement contrôlé à des intensités de champ relativement élevées, alors que les études sur les stations de base sont des expériences sur le terrain, généralement à des intensités de champ beaucoup plus faibles ou avec une durée d'exposition trop courte pour trouver des effets à long terme. L'intensité du champ du signal des tours cellulaires était de l'ordre de 0,56 V/m en moyenne (valeur médiane de 0,32 V/m), tandis que l'intensité du champ des téléphones cellulaires était de 18,7 V/m en moyenne (valeur médiane de 16,2 V/m) (Fig. 4). Convertie en densité de puissance (valeurs médianes), la différence quantitative est plus facile à saisir. Tour cellulaire: 0,27 mW/m² ; téléphone cellulaire: 695 mW/m². Les intensités de champ typiques actuelles des tours cellulaires (utilisées dans les expériences) sont moins nocives que celles des téléphones cellulaires, du DECT et du WiFi. Les données expérimentales actuelles issues des études sur les stations de base ne doivent pas être interprétées comme indiquant que les effets sont faibles en soi, mais qu'en général, le dispositif expérimental était tel que seules des densités de puissance relativement faibles ont été testées (généralement entre 100 et 500 m de l'émetteur), alors que les insectes peuvent être soumis à des densités de puissance beaucoup plus élevées s'ils s'approchent des antennes. Les expériences menées avec des téléphones portables ont souvent révélé des effets néfastes dans les 10 minutes suivant l'irradiation, tandis que les expériences sur le terrain dans les stations de base ont révélé des effets néfastes généralement après plusieurs semaines ou plusieurs mois (Discussion). Cependant, certaines études épidémiologiques humaines récentes et des études de terrain sur les insectes, les oiseaux et les pins autour de stations de base de téléphonie cellulaire indiquent des effets nocifs chroniques même aux niveaux de puissance actuels [104–109].

Les estimations de toxicité dérivées de la méta-analyse se chiffrent à un rapport des moyennes d'environ 1,5 pour les appareils CEM-HF (Fig. suppl. 15, 16, 17, Tableau suppl. 1). Cette estimation comprend tous les types d'effets biologiques observés qui pourraient être classés sans équivoque comme nuisibles ou bénéfiques (Fig. 6), et pourrait être interprétée comme une augmentation de 50% des dommages à l'ADN ou une réduction de 33% de la capacité de reproduction, dans le pire des cas. L'estimation de la toxicité pour les stations de base est d'environ 1,49 (fig. suppl. 13). Cette estimation inclut également les résultats qui ont observé un évitement ou une réduction de l'abondance des insectes autour des stations de base, et des recherches supplémentaires sont nécessaires pour clarifier l'impact réel de l'évitement des stations de base par les insectes, mais les effets comportementaux ne doivent pas être sous-estimés [110]. Une estimation basée uniquement sur les marqueurs directs de toxicité (comme la réduction de la couvée, de la ponte, etc.) a donné une toxicité beaucoup plus faible de 1,09, correspondant à une réduction de 8% de la capacité de reproduction (fig. suppl. 14).

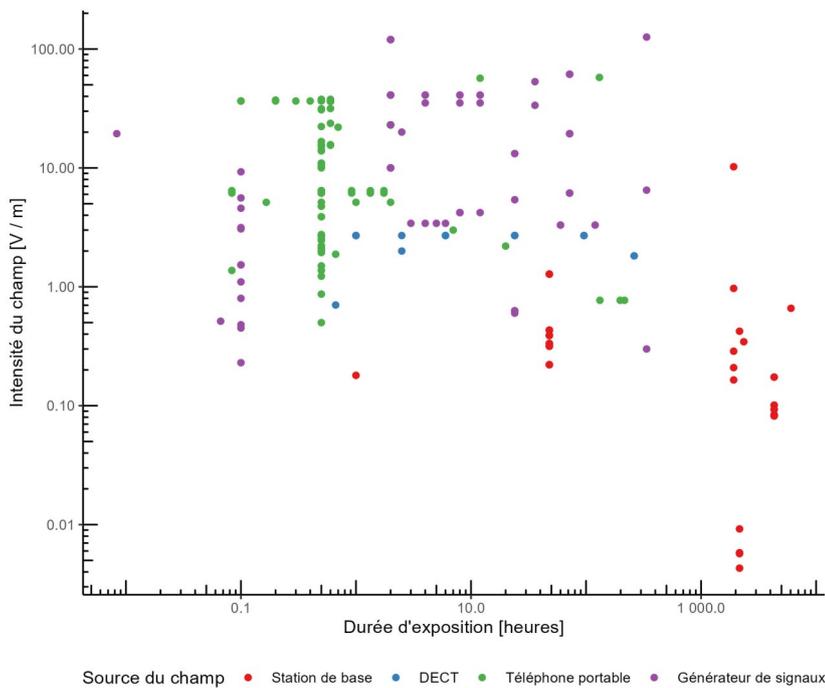


Figure 4 : Intensité du champ EM en fonction de la durée d'exposition (points de données provenant de 239 expériences ou groupes expérimentaux dans 48 études sur les CEM-HF).

Les estimations de la toxicité sont statistiquement très significatives pour les DECT, les téléphones mobiles et les générateurs de signaux RF, à peine significatives pour les systèmes de bobines et non significatives pour les stations de base. Les diagrammes de forêt révèlent une hétérogénéité considérable entre les études (I^2 généralement $> 90\%$) et de larges intervalles de prédiction décrivant l'éventail des tailles d'effet observées. Cela peut être dû à de grandes différences dans les paramètres mesurés ainsi que dans l'intensité, le type et la durée de l'exposition aux CEM. L'hétérogénéité pourrait également indiquer un manque de compréhension des mécanismes d'action sous-jacents, conduisant à des conceptions expérimentales inadéquates (à quelques exceptions notables près), ce qui entraîne de fortes variations entre les résultats expérimentaux.

Les résultats de la méta-analyse pour toutes les expériences ayant révélé une toxicité pour la reproduction chez *Drosophila* à une intensité de champ électrique supérieure à 7 V/m (fig. suppl. 10) sont proches de ceux de la cohorte d'expériences réalisées entre 2 et 7 V/m (Fig. suppl. 11) : estimation des effets aléatoires : 1,40 ou 1,44, ce qui correspond à une capacité de reproduction réduite de 29 à 31% ($p = 0,01$). La méta-analyse de toutes les expériences ayant révélé une toxicité pour la reproduction à moins de 2 V/m (fig. suppl. 12) indique une toxicité moindre, avec une estimation des effets de 1,22, correspondant à une réduction de 18% de la capacité de reproduction ($p = 0,03$). Les tableaux supplémentaires 1 et 2 répertorient toutes les estimations dérivées respectivement de la méta-analyse à trois niveaux et de la méta-analyse bayésienne.

Résumé des résultats de l'étude

Un certain nombre d'études sur les effets des lignes électriques sur les abeilles ont été menées dans les années 1970 et 1980 [111–115]. La plupart des études ultérieures ont utilisé des bobines de Helmholtz ou d'autres systèmes de bobines en laboratoire, ce qui permet de contrôler plus facile-

ment les paramètres expérimentaux. Les bobines produisent des champs magnétiques beaucoup plus intenses, mais des champs électriques (induits) plus faibles que les sources de CEM-HF [116–118].

Les fréquences utilisées dans les expériences HF étaient réparties comme suit : 5% des expériences HF ont utilisé des fréquences proches de 900 MHz, correspondant à la norme de téléphonie mobile GSM (2G) et LTE (4G). 8% ont utilisé 1900 MHz (DECT), 7,6% ont utilisé 1800 MHz, ce qui correspond à DCS (2G), et 3,6% ont utilisé 3500 MHz, comme la bande basse 5G.

Les effets biologiques des CEM-BF et HF observés dans les expériences diffèrent clairement (Fig. 6, 7), ce qui pourrait indiquer des cibles biologiques différentes pour les systèmes de bobines de CEM-BF par rapport aux CEM-HF, et pourrait être dû au fait que les bobines fonctionnaient généralement avec un courant alternatif sinusoïdal, alors que les dispositifs de CEM-HF utilisaient des signaux porteurs pulsés ; les générateurs de signaux RF utilisaient un signal pulsé dans 21% des expériences, un signal modulé en fréquence à 50 kHz dans 17%, et un signal sinusoïdal continu dans 61% des expériences. En ce qui concerne les CEM-HF, les effets observés étaient pour la plupart nocifs (57%). Environ un quart d'entre eux ont été classés dans la catégorie des effets incertains (tels que l'augmentation ou la réduction de la locomotion). Pour les CEM-BF (133 expériences), un effet comportemental a été observé dans 29% des expériences, dans 12% des expériences, l'effet concernait le métabolisme et dans 11% des expériences, la capacité de reproduction était altérée. Pour les CEM-HF (238 expériences), les tendances suivantes ont été observées : diminution de la capacité de reproduction dans 37% des expériences, altération du comportement (18%), stress oxydatif (10%), lésions de l'ADN (7%) et altération du développement (5%). Dans 10% des expériences, aucun effet n'a pu être constaté ; ce chiffre plus élevé que pour les CEM-BF (6%) est probablement dû au fait que plusieurs études sur les HF étaient des études de terrain avec des sta-

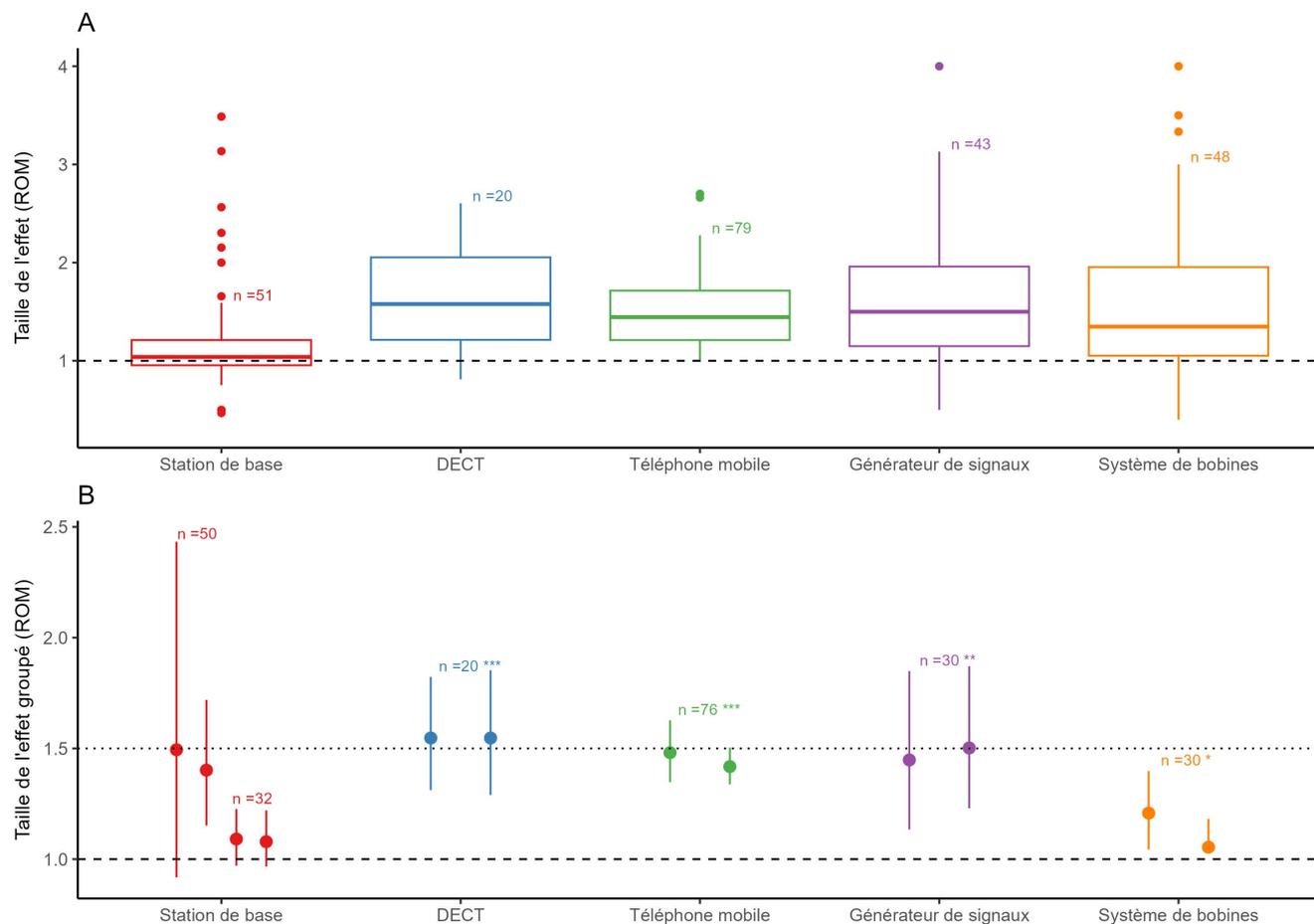


Figure 5: (A) Diagrammes en boîte (médiane et quartiles) de l'ampleur de l'effet constaté dans les expériences par type de CEM, exprimée sous forme de rapport des moyennes (ROM) normalisé, avec indication du nombre n d'expériences. Un ROM > 1 indique des effets néfastes. (B) Estimation de la toxicité dérivée de la méta-analyse, l'ampleur de l'effet étant donnée sous forme de rapport des moyennes avec un intervalle de confiance à 95% (* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ & *** $p < 0,001$). Estimation à partir d'une analyse à trois niveaux "groupée" (R package "meta") ou estimation bayésienne (R package "bayesmeta"), avec indication du nombre n d'expériences à partir desquelles l'estimation est dérivée. Pour les stations de base, estimations incluant tous les résultats de réduction de l'abondance ou d'altération du comportement (à gauche) et estimations basées uniquement sur les résultats toxicologiques (à droite).

tions de base, à des intensités de champ faibles, et qu'il est plus facile de trouver des résultats significatifs dans les études de laboratoire.

Discussion

La grande majorité des études ont mis en évidence des effets, généralement néfastes. Il est peu probable que ces résultats soient le fruit du hasard. Les sceptiques pourraient objecter que la plupart des études n'étaient pas des essais contrôlés randomisés (mais voir ici [103]). Malgré ces lacunes, l'existence de résultats cohérents provenant de nombreuses études menées par divers groupes de recherche utilisant différents protocoles constitue un argument irréfutable en faveur d'effets néfastes des CEM-BF et HF de faible puissance sur les insectes [86, 119]. Un rapport récent commandé par l'Office fédéral suisse de l'environnement (BAFU) corrobore également cette thèse [120]. Les CEM-HF semblent produire des effets plus forts et plus nocifs sur les insectes que les CEM-BF. Il est très probable que les effets observés en laboratoire se produisent également dans des conditions réelles [110]. Un résumé et une chronique des études individuelles sur les insectes sont disponibles dans les documents complémentaires et dans d'autres revues [86, 105, 121]. Les bioef-

fets des CEM ont également été démontrés chez les plantes et tous les animaux étudiés, ainsi que chez les humains [86, 122–124]. Les insectes devraient toutefois être les plus touchés, car ils sont déjà soumis à de multiples menaces, moins résilients aux facteurs de stress et aux polluants que les animaux plus grands, et en raison de leur petite taille, plus vulnérables aux fréquences de plus en plus élevées utilisées par les infrastructures de téléphonie mobile (5G et 6G à l'avenir) [12, 100, 125].

Comparaison entre le problème de la lumière artificielle nocturne (ALAN) et d'autres champs électromagnétiques

Certaines menaces pour l'environnement et la biodiversité ont récemment suscité l'intérêt des chercheurs et des décideurs, par exemple le bruit anthropique et la lumière artificielle nocturne [126, 127]. Il n'en va pas de même pour la pollution électromagnétique, bien que son augmentation ait été exponentielle ces dernières années [15, 86, 128]. Nous comparons ici les effets de la lumière artificielle nocturne (LAN) à ceux des champs électromagnétiques de haute fréquence (CEM-HF) des communications sans fil. La lumière a conduit le développement et l'organisation des systèmes

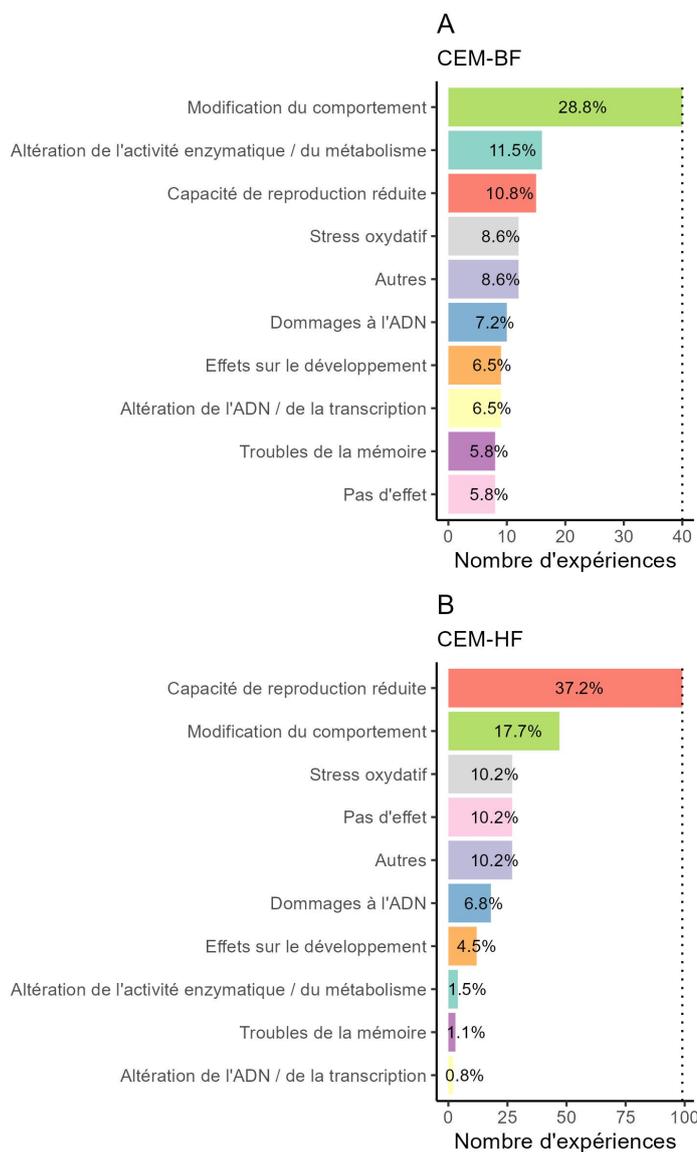


Figure 6 : Nombre et pourcentage d'expériences classées selon les catégories d'effets biologiques, (A) CEM basse fréquence, (B) CEM haute fréquence.

biologiques du niveau moléculaire aux cycles de l'écosystème [127]. En outre, la vie a évolué dans une matrice de champs électromagnétiques et géomagnétiques naturels relativement faibles. La LAN est totalement inédite et a été introduite dans des lieux, à des moments et à des intensités où elle ne se produit pas naturellement et avec un spectre différent de celui de la lumière du soleil [127]. De même, les CEM-HF d'origine humaine ont été rapidement introduits dans le monde entier, à des intensités bien supérieures à celles qui se produisent naturellement. Les CEM anthropiques sont polarisés, pulsés, modulés et comprennent des fréquences extrêmement basses dans leur taux d'impulsion, alors que les CEM naturels ne présentent pas ces caractéristiques [128]. La pollution lumineuse a augmenté au cours des 100 dernières années, alors que le développement des communications mobiles n'a commencé qu'il y a quelques décennies. Les CEM-HF ont été introduits très rapidement dans le monde entier, et les niveaux d'exposition ont augmenté d'un facteur d'environ 10^{18} par rapport aux niveaux ambiants naturels [15]. Les effets physiologiques et comportementaux de la LAN et des CEM-

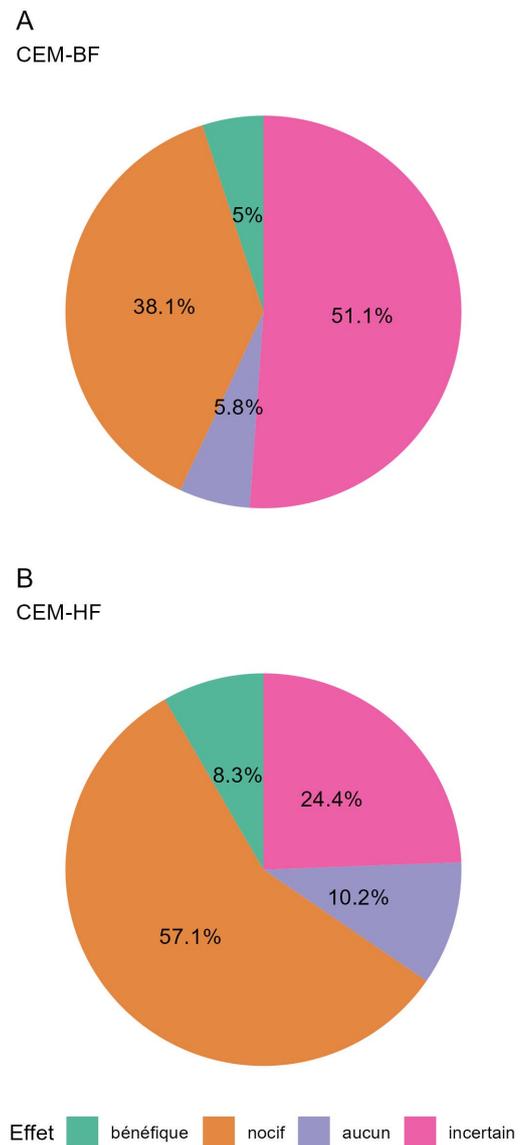


Figure 7 : Pourcentage d'expériences ayant révélé des effets biologiques des CEM sur les insectes en fonction de la direction de l'effet, (A) CEM à basse fréquence, (B) CEM à haute fréquence.

HF sont largement documentés, mais la mesure dans laquelle ils se traduisent en des impacts sur les populations et les écosystèmes reste mal comprise [86, 127, 129].

Considérations générales

Des preuves considérables suggèrent que de nombreuses applications médicales des CEM attendent d'être développées [130–133]. Bien qu'une étude antérieure ait mis en garde contre le CEMP médical ("champ électromagnétique pulsé"), les appareils de CEMP sont maintenant utilisés avec succès, bien que leur mécanisme d'action n'ait été que partiellement élucidé [134–136]. Néanmoins, cela devrait être secondaire dans un contexte médical : si un agent ou un dispositif est efficace pour une condition médicale, par exemple un cancer ou une infection virale, et s'il n'y a pas d'effets secondaires graves, l'agent devrait être utilisé. Inversement, les agents ou les technologies qui produisent des effets indésirables graves ne devraient pas être utilisés. Même si les technologies sans fil actuelles sont généralement toxiques en

fonction de la dose, il devrait être possible d'améliorer considérablement leur biocompatibilité, à l'instar de ce qui a déjà été réalisé pour les écrans d'ordinateur et de télévision, par exemple en éliminant les impulsions à basse fréquence "biomimétiques" [132, 137–139]. Une expérience menée sur des cafards suggère que la présence simultanée de champs magnétiques statiques ou de CEM-BF et de CEM-HF est plus nocive que chacun d'entre eux séparément, comme cela avait été démontré précédemment pour les oiseaux et postulé théoriquement [140–142]. Jusqu'à présent, on ne sait pas si les CEM ont une toxicité synergique avec les pesticides, certaines études indiquant une toxicité synergique, d'autres non [143, 144].

La plupart des études incluses dans cette analyse et pouvant faire l'objet d'une méta-analyse proviennent d'un groupe très prolifique de scientifiques de l'université d'Athènes. Une étude récente réalisée en Italie confirme toutefois les mécanismes fondamentaux de toxicité décrits et proposés par Panagopoulos et al. selon lesquels les CEM-HF provoquent d'abord un stress oxydatif, entraînant un silençage défectueux des transposons, causant des aberrations chromosomiques et des dommages à l'ADN, ce qui entraîne finalement une réduction de la capacité de reproduction [139, 145].

À quelles intensités de champ les effets toxiques sont-ils susceptibles de se produire chez les insectes?

Si l'on se penche sur l'histoire des sciences, il semble que les effets néfastes aient souvent été signalés très tôt, mais qu'ils aient été le plus souvent ignorés - par exemple dans le cas de l'amiante, du plomb et de la cigarette. Il a généralement fallu des décennies pour comprendre les mécanismes de toxicité et pour que la position officielle évolue. L'Agence européenne pour l'environnement (AEE) a publié plusieurs rapports sur ce sujet sous le titre "Late lessons from early warnings" (leçons tardives tirées des alertes précoces) [146, 147].

36 des 55 études sur les CEM-HF mentionnées dans cette analyse ont utilisé des intensités de champ inférieures à 6 V/m (100 mW/m²), et 31 de ces 36 études (86%) ont néanmoins constaté des effets néfastes statistiquement significatifs, commençant à environ 2 V/m et culminant autour de 6 V/m. Ces valeurs sont inférieures aux seuils réglementaires établis par la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) (41 V/m, ou 61 V/m au-dessus de 2 GHz), et même inférieures aux limites d'installation particulièrement strictes que l'on ne trouve que dans une poignée de pays [94]. (La limite d'installation est mesurée là où les gens peuvent rester pendant de longues périodes, c'est-à-dire les maisons, les écoles, les lieux de travail et les terrains de jeu pour les enfants).

Panagopoulos et al. ont détecté une fenêtre bioactive à une distance de 20 à 30 cm des téléphones mobiles GSM, où la densité de puissance est égale à 100 mW/m² (6 V/m), et où des effets toxiques chez *Drosophila* sont déjà observés après une exposition d'une minute. Ces résultats ont été reproduits à plusieurs reprises [148–150]. Si cela est généralement vrai pour les insectes, la limite des effets toxiques serait 100 fois inférieure à la limite actuelle de l'ICNIRP (10 W/m² ou 61 V/m), qui ne protège que contre les effets thermiques (chez l'homme), et peut-être 1000 fois inférieure aux limites ac-

tuelles pour l'exposition chronique, c'est-à-dire 10 mW/m² ou 2 V/m (toutes les comparaisons sont basées sur les densités de puissance, c'est-à-dire sur l'énergie par unité de surface). [94]. Une étude récente a mis en évidence des effets significatifs sur la transcription des gènes et des anomalies chromosomiques en utilisant un signal WiFi de 4,8 mW/m² ou 1,35 V/m chez *Drosophila* exposée pendant 9 jours [145]. Ces découvertes d'effets biologiques chez les insectes à partir d'environ 2 V/m impliquent que les normes existantes devraient être révisées et rendues plus strictes, afin d'inclure la protection de la nature et de la vie sauvage.

Les densités de puissance ambiantes actuelles restent généralement inférieures à 10 ou 100 mW/m² (c'est-à-dire 2 ou 6 V/m). Une étude récente a mesuré des valeurs de 0,17–0,53 V/m sur le terrain (0,1–0,8 mW/m²) [101]. Des valeurs principalement comprises entre 0,5 et 1 V/m ont été relevées autour d'écoles en Crète [151]. Les mesures nationales de l'Observatoire national des champs électromagnétiques (NOEF) en Grèce ont révélé des valeurs moyennes supérieures à 1 V/m dans 55% des sites, et des valeurs supérieures à 2 V/m dans 20% des sites de mesure [152]. Une étude récente fait état de densités de puissance allant de 0,23 V/m dans les zones résidentielles suisses à 1,85 V/m dans un quartier universitaire australien [86]. Dans les points chauds urbains (Royaume-Uni), un maximum de 150 mW/m² (7,5 V/m) et une moyenne de 25 mW/m² (3,3 V/m) ont été mesurés (WiFi compris) [153]. L'Agence nationale des fréquences (ANFR) a relevé une moyenne de 1,17 V/m dans 1 300 stations de base 5G, et les auteurs s'attendent à une augmentation de 20% au cours des prochaines années [154]. En Belgique, en Italie, en Suisse, en Russie et en Chine, la limite d'installation est de 6 V/m (100 mW/m²) pour les stations de base de téléphonie mobile, alors que l'Allemagne, le Royaume-Uni, les États-Unis et de nombreux autres pays respectent les limites beaucoup plus élevées de l'ICNIRP [94, 155]. Les limites de l'ICNIRP ont récemment été remises en question, car elles sont basées sur des conclusions datant de plus de 20 ans, et leurs hypothèses se sont avérées fausses [156]. En outre, les limites de l'ICNIRP sont conçues pour protéger les êtres humains et n'ont pas été testées quant à leur adéquation à la protection de la faune et des insectes [157].

À l'avenir

Les mécanismes des effets biologiques, à l'exception du cryptochrome magnétosensible et des effets HF sur la reproduction, ne sont pas encore bien compris [65, 139, 145]. Les questions suivantes doivent être clarifiées:

- dans quelle mesure les processus biologiques déclenchés par les CEM-HF et LF sont comparables ;
- dans quelle mesure des effets d'interférence ou des synergies se produisent entre le champ magnétique statique de la Terre, les CEM-LF et les CEM-HF produits par l'homme ;
- dans quelle mesure les résultats obtenus en laboratoire avec les CEM-HF sont transférables aux tours de téléphonie cellulaire et aux nouvelles sources de CEM telles que la 5G à bande large ;
- quelles sont les densités de puissance dans l'environnement naturel (cartes CEM détaillées).

Par rapport à la plupart des animaux, les humains sont assez résilients en ce qui concerne la quantité de stress ou de toxines qu'ils peuvent supporter avant de développer des symptômes cliniques [158]. Par contre, de nombreux pesti-

cides initialement considérés comme inoffensifs pour l'homme se sont ensuite révélés nocifs, comme le DDT, les organophosphates et les pyréthrénoïdes [159]. Les insectes sont plus sensibles aux polluants, y compris aux CEM, que les humains [86, 120]. Les écosystèmes sains et l'agriculture durable ont besoin des insectes. Bien que les pratiques écologiques et l'agriculture biologique soient en hausse en Europe, des mesures importantes pour protéger les populations d'insectes, telles que l'interdiction des néonicotinoïdes et la réduction des monocultures, sont mises en oeuvre trop lentement [125, 160].

Selon Thielens, De Borre et al, la puissance des champs électromagnétiques absorbée par les corps des insectes (pour une même puissance émise de 1 V/m) augmente jusqu'à cent fois pour un changement de fréquence de 1 GHz (par exemple 4G et 5G "low-band") vers la 5G "high-band" à 26 GHz, il faut donc s'attendre à une augmentation des effets négatifs sur les insectes, puisque les effets de bas niveau (non thermiques) dépendent toujours de la puissance absorbée [100–102]. Comme les pertes de puissance deviennent plus importantes en raison de la diffusion, de la réflexion et de la force de pénétration plus faible des fréquences plus élevées, la puissance rayonnée des stations de base devra également augmenter pour assurer des connexions sans fil confortables dans les maisons et les véhicules. L'expansion de la 5G entraîne une augmentation significative des émissions de CEM, comme le suggèrent des mesures récentes [152, 154, 161]. Sur la base d'une évaluation de la situation globale de l'étude sur les insectes, nous devons mettre en garde contre un déploiement inconsidéré de nouvelles infrastructures de téléphonie mobile, car des effets nocifs sur les populations d'insectes seraient probables, en particulier si les interactions avec d'autres agents nocifs sont prises en compte (y compris les lignes électriques à haute tension et l'éclairage artificiel). Cela pourrait conduire à un nouveau déclin des populations de pollinisateurs, déjà en diminution, et entraînerait donc des coûts pour l'humanité. Il est également possible, et cela nécessiterait des éclaircissements supplémentaires (qui pourraient être obtenus par quelques études de terrain bien planifiées), que certaines populations d'insectes subissent déjà l'impact négatif de l'infrastructure actuelle.

Le déploiement en cours de la 5G devrait être surveillé de près et les tests toxicologiques pour l'évaluation des effets néfastes devraient commencer immédiatement, afin que des lignes directrices de protection puissent être promulguées. Les résultats expérimentaux doivent être communiqués de manière transparente et bénéficier de la présence politique nécessaire pour permettre une réaction rapide, car le débat scientifique a tendance à se polariser sur des positions extrêmes, ce qui reflète rarement la vérité et entraîne un gaspillage considérable de ressources. Les effets toxiques sur les insectes peuvent se produire à des niveaux de rayonnement qui sont considérés comme sûrs pour les humains, en particulier dans les bandes de fréquences supérieures. Nous nous référons au principe dit de précaution, détaillé dans l'article 191 du Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne. La conservation des pollinisateurs nécessite une application plus forte et plus large du principe de précaution tel qu'il est pratiqué actuellement. En outre, le principe de précaution de l'UE implique qu'une action législative devrait déjà être entreprise s'il existe une suspicion fondée d'effets négatifs.

Éthique de la recherche : non pertinent.

Consentement éclairé : non pertinent.

Contributions des auteurs : Les auteurs ont assumé la responsabilité de l'ensemble du contenu de ce manuscrit et ont approuvé sa soumission.

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

Financement de la recherche : L'auteur principal a été financé par l'organisation de protection de l'environnement et des consommateurs diagnose:funk.

Disponibilité des données : Les données brutes peuvent être obtenues sur demande auprès de l'auteur correspondant.

Annexe

Calculs

L'unité SI pour exprimer l'intensité d'un champ électromagnétique est le volt par mètre [V/m], et c'est également l'unité de mesure courante pour les champs électriques. Elle peut être utilisée pour calculer la densité de puissance moyenne (RMS) ou l'intensité du rayonnement en watts par mètre carré [W/m^2] dans le cas des champs électromagnétiques, ce qui est également utilisé dans la technologie des cellules solaires. Pour toutes les études sur les radiofréquences incluses ici, toutes les valeurs données de l'intensité du champ ont été converties en V/m si elles étaient décrites dans une unité différente. Les formules suivantes ont été utilisées [18, 162]:

$$S = E^2 / Z_0 \quad \text{ou aussi} \quad E = \sqrt{S \cdot Z_0}$$

où E est l'intensité du champ électrique [V/m], S la densité de puissance [W/m^2], l'impédance de l'onde [377 Ohm].

Pour les ondes électromagnétiques, l'intensité du champ électrique est liée à l'intensité du champ magnétique, selon : $B = E/c$ avec B le champ magnétique en Tesla, E le champ électrique en volts par mètre et c la vitesse de la lumière (3×10^8 m/s) (dérivée de la loi d'Ampère-Faraday, ou directement du vecteur de Poynting [162]).

Dans le champ proche, c'est-à-dire en dessous d'une longueur d'onde (par exemple 30 cm pour le GSM900), les champs électriques et magnétiques sont présents sous la forme d'un champ tourbillonnaire. Toutefois, si l'on fait la moyenne de nombreuses mesures, la proportionnalité de l'intensité des champs électriques et magnétiques est maintenue ici aussi.

La valeur SAR (abréviation de "Specific Absorption Rate") exprime la quantité d'énergie réellement absorbée par le tissu irradié et dépend donc du type de tissu (ou généralement du matériau) estimé ici selon [100–102].

Références

- Ollerton J, Winfree R, Tarrant S. How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*. 2011 Feb;120(3):321–6.
- Rodger JG, Bennett JM, Razanajatovo M, Knight TM, Kleunen M van, Ashman TL, et al. Widespread vulnerability of flowering plant seed production to pollinator declines. *Science Advances*. 2021 Oct;7(42):eabd3524.
- Klein AM, Vaissière BE, Cane JH, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, et al. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2006 Oct;274(1608):303–13.
- Schowalter TD, Noriega JA, Tscharrnke T. Insect effects on ecosystem services—introduction. *Basic and Applied Ecology*. 2018 Feb;26:1–7.
- Sluijs JP van der. Insect decline, an emerging global environmental risk. *Curr Opin Sust*. 2020 Oct;46:39–42.
- Kehoe R, Frago E, Sanders D. Cascading extinctions as a hidden driver of insect decline. *Ecol Entomol*. 2020 Nov;46(4):743–56.
- Smith MR, Singh GM, Mozaffarian D, Myers SS. Effects of decreases of animal pollinators on human nutrition and global health: A modelling analysis. *The Lancet*. 2015 Nov;386(10007):1964–72.
- Smith MR, Mueller ND, Springmann M, Sulser TB, Garibaldi LA, Gerber J, et al. Pollinator deficits, food consumption, and consequences for human health: A modeling study. *Environmental Health Perspectives*. 2022 Dec;130(12):127003.
- Hallmann CA, Sorg M, Jongejans E, Siepel H, Hofland N, Schwan H. More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS One*. 2017;12:0185809.
- Sánchez-Bayo F, Wyckhuys KAG. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biol Conserv*. 2019 Apr;232:8–27.
- Sánchez-Bayo F. Indirect effect of pesticides on insects and other arthropods. *Toxics*. 2021 Jul;9(8):177.
- Cardoso P, Barton PS, Birkhofer K, Chichorro F, Deacon C, Fartmann T, et al. Scientists warning to humanity on insect extinctions. *Biological Conservation*. 2020 Feb;242:108426.
- Sharma A, Kaur M, Katnoria JK, Nagpal AK. Heavy metal pollution: A global pollutant of rising concern: A global pollutant of rising concern. In: *Toxicity and waste management using bioremediation*. Hershey: IGI Global; 2016. p. 1–26.
- Rhind SM. Anthropogenic pollutants: A threat to ecosystem sustainability? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009;364(1534):3391–401.
- Bandara P, Carpenter DO. Planetary electromagnetic pollution: It is time to assess its impact. *The Lancet Planetary Health*. 2018 Dec;2(12):e512–4.
- Siviter H, Bailes EJ, Martin CD, Oliver TR, Koricheva J, Leadbeater E, et al. Agrochemicals interact synergistically to increase bee mortality. *Nature*. 2021 Aug;596(7872):389–92.
- Page MJ, Moher D, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021 Mar;372.
- Feynman C, Leighton RB, Sands M, Gottlieb MA, Pfeiffer R. The feynman lectures on physics, volume II [Internet]. Addison-Wesley Boston, MA, USA; 1965. Available from: https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_toc.html
- Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL. Polarization: A key difference between man-made and natural electromagnetic fields, in regard to biological activity. *Scientific reports* [Internet]. 2015;5:14914. Available from: <https://www.nature.com/articles/srep14914>
- International Telecommunication Union. Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications [Internet]. Recommendation ITU/RV. 2015. p. 431–8. Available from: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-8-201508-!!!PDF-E.pdf
- Chou CK, Guy AW, Galambos R. Auditory perception of radio-frequency electromagnetic fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1982;71(6):1321–34.
- Belyaev I. Biophysical mechanisms for nonthermal microwave effects. In: Markov MS, editor. *Electromagnetic Fields in Biology and Medicine*. Boca Raton: CRC Press; 2015. p. 66–85.
- Popov T, Szyszka P. Alpha oscillations govern interhemispheric spike timing coordination in the honey bee brain. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2020 Feb;287(1921):20200115.
- Gupta N, Singh SS, Stopfer M. Oscillatory integration windows in neurons. *Nature Communications*. 2016 Dec;7(1):13808.
- van Swinderen B, Greenspan RJ. Saliency modulates 20–30 hz brain activity in drosophila. *Nature Neuroscience*. 2003 Apr;6(6):579–86.
- Hinrikus H, Bachmann M, Lass J, Tomson R, Tuulik V. Effect of 7, 14 and 21 Hz modulated 450 MHz microwave radiation on human electroencephalographic rhythms. *Int J Radiat Biol*. 2008;84(1):69–79.
- Mohammed HS, Fahmy HM, Radwan NM, Elsayed AA. Non-thermal continuous and modulated electromagnetic radiation fields effects on sleep EEG of rats. *Journal of advanced research* [Internet]. 2013;4(2):181–7. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123212000343#f0020>
- Agnati LF, Marcoli M, Maura G, Woods A, Guidolin D. The brain as a “hyper-network”: The key role of neural networks as main producers of the integrated brain actions especially via the “broadcasted” neuroconnectomics. *J Neural Transm*. 2018 Feb;125(6):883–97.
- Martinez-Banaclocha M. Astroglial isopotentiality and calcium-associated biomagnetic field effects on cortical neuronal coupling. *Cells* [Internet]. 2020 Feb;9(2):439. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4409/9/2/439/pdf>
- Chiang CC, Shivacharan RS, Wei X, Gonzalez-Reyes LE, Durand DM. Slow periodic activity in the longitudinal hippocampal slice can self-propagate non-synaptically by a mechanism consistent with ephaptic coupling. *J Physiol*. 2018 Nov;597(1):249–69.
- Hales CG, Pockett S. The relationship between local field potentials (LFPs) and the electromagnetic fields that give rise to them. *Frontiers in systems neuroscience*. 2014;8:233.
- Weinberg SH. Ephaptic coupling rescues conduction failure in weakly coupled cardiac tissue with voltage-gated gap junctions. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2017 Sep;27(9):093908.
- Han KS, Guo C, Chen CH, Witter L, Osorno T, Regehr WG. Ephaptic coupling promotes synchronous firing of cerebellar Purkinje cells. *Neuron*. 2018 Nov;100(3):564–78.
- Zhang Y, Tsang TK, Bushong EA, Chu LA, Chiang AS, Ellisman MH, et al. Asymmetric ephaptic inhibition between compartmentalized olfactory receptor neurons. *Nature communications* [Internet]. 2019;10(1):1–16. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41467-019-09346-z>
- Bokil H, Laaris N, Blinder K, Ennis M, Keller A. Ephaptic interactions in the mammalian olfactory system. *J Neurosci*. 2001

- Oct;21(20):173–3.
36. Fogle KJ, Baik LS, Houl JH, Tran TT, Roberts L, Dahm NA, et al. Cryptochrome-mediated phototransduction by modulation of the potassium ion channel beta subunit redox sensor. *Proc Natl Acad Sci*. 2015 Feb;112(7):2245–50.
 37. Zheng Y, Xia P, Dong L, Tian L, Xiong C. Effects of modulation on sodium and potassium channel currents by extremely low frequency electromagnetic fields stimulation on hippocampal CA1 pyramidal cells. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2021 Feb;40(2):274–85.
 38. Cecchetto C, Maschietto M, Boccaccio P, Vassanelli S. Electromagnetic field affects the voltage-dependent potassium channel kv1.3. *Electromagn Biol Med*. 2020 Aug;39(4):316–22.
 39. Sun Z, Ge J, Guo B, Guo J, Hao M, Wu Y, et al. Extremely low frequency electromagnetic fields facilitate vesicle endocytosis by increasing presynaptic calcium channel expression at a central synapse. *Scientific reports* [Internet]. 2016;6(1):21774. Available from: <https://www.nature.com/articles/srep21774>
 40. Pilla AA. Electromagnetic fields instantaneously modulate nitric oxide signaling in challenged biological systems. *Biochemical and biophysical research communications*. 2012;426(3):330–3.
 41. Kim JH, Lee JK, Kim HG, Kim KB, Kim HR. Possible effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on central nerve system. *Biomolecules & therapeutics*. 2019;27(3):265.
 42. Atlas D. The voltage-gated calcium channel functions as the molecular switch of synaptic transmission. *Annual review of biochemistry*. 2013;82:607–35.
 43. Valko M, Leibfritz D, Moncol J, Cronin MTD, Mazur M, Telser J. Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *The international journal of biochemistry & cell biology*. 2007;39(1):44–84.
 44. Saliev T, Begimbetova D, Masoud AR, Matkarimov B. Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin. *Prog Biophys Mol Biol*. 2019 Jan;141:25–36.
 45. Krylov VV. Biological effects related to geomagnetic activity and possible mechanisms. *Bioelectromagnetics*. 2017 Jun;38(7):497–510.
 46. Tonelli BA, Youngflesh C, Tingley MW. Geomagnetic disturbance associated with increased vagrancy in migratory landbirds. *Scientific Reports*. 2023 Jan;13(1):414.
 47. Ferrari TE, Tautz J. Severe honey bee (*Apis mellifera*) losses correlate with geomagnetic and proton disturbances in Earth's atmosphere. *Journal of Astrobiology & Outreach*. 2015;03(03):1–6.
 48. Price C. ELF electromagnetic waves from lightning: The Schumann resonances. *Atmosphere* [Internet]. 2016;7(9):116. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4433/7/9/116/pdf>
 49. Price C, Williams E, Elhalel G, Sentman D. Natural ELF fields in the atmosphere and in living organisms. *Int J Biometeorol*. 2020 Feb;65(1):85–92.
 50. Cifra M, Apollonio F, Liberti M, García-Sánchez T, Mir LM. Possible molecular and cellular mechanisms at the basis of atmospheric electromagnetic field bioeffects. *Int J Biometeorol*. 2020 Apr;65(1):59–67.
 51. Elhalel G, Price C, Fixler D, Shainberg A. Cardioprotection from stress conditions by weak magnetic fields in the Schumann resonance band. *Sci Rep*. 2019 Feb;9(1):1645.
 52. Bertagna F, Lewis R, Silva SRP, McFadden J, Jeevaratnam K. Thapsigargin blocks electromagnetic field-elicited intracellular Ca²⁺ increase in HEK 293 cells. *Physiological Reports*. 2022 May;10(9):e15189.
 53. Panagopoulos DJ, Balmori A. On the biophysical mechanism of sensing atmospheric discharges by living organisms. *Sci Total Environ*. 2017;599–600:2026–34.
 54. Panagopoulos DJ, Balmori A, Chrousos GP. On the biophysical mechanism of sensing upcoming earthquakes by animals. *Science of The Total Environment*. 2020 May;717:136989.
 55. Bertagna F, Lewis R, Silva SRP, McFadden J, Jeevaratnam K. Effects of electromagnetic fields on neuronal ion channels: A systematic review. *Ann N Y Acad Sci*. 2021 May;1499(1):82–103.
 56. Panagopoulos DJ, Messini N, Karabarbounis A, Philippetis AL, Margaritis LH. A mechanism for action of oscillating electric fields on cells. *Biochem Biophys Res Commun*. 2000 Jun;272(3):634–40.
 57. Guerra PA, Gegear RJ, Reppert SM. A magnetic compass aids monarch butterfly migration. *Nature communications*. 2014;5(1):1–8.
 58. Gegear RJ, Casselman A, Waddell S, Reppert SM. Cryptochrome mediates light-dependent magnetosensitivity in *Drosophila*. *Nature*. 2008;454(7207):1014–8.
 59. de Oliveira JF, Wajnberg E, de Souza Esquivel DM, Weinkauff S, Winklhofer M, Hanzlik M. Antennae: Are they sites for magnetoreception? *J R Soc Interface*. 2010;7(42):143–52.
 60. Lambinet V, Hayden ME, Reid C, Gries G. Honey bees possess a polarity-sensitive magnetoreceptor. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol*. 2017;203(12):1029–36.
 61. Vácha M, Půzová T, Kvičalová M. Radio frequency magnetic fields disrupt magnetoreception in American cockroach. *J Exp Biol*. 2009 Nov;212(21):3473–7.
 62. Clites BL, Pierce JT. Identifying cellular and molecular mechanisms for magnetosensation. *Annual review of neuroscience*. 2017;40:231–50.
 63. Nordmann GC, Hochstoeger T, Keays DA. Unsolved mysteries: Magnetoreception—a sense without a receptor. *PLoS biology*. 2017;15(10):e2003234.
 64. Ishay JS, Pertsis V, Skutelsky E, Kalicharan D, Want H van der. Ontogenesis of peripheral electromagnetic receptors in hornets. *J Electron Microsc (Tokyo)*. 2004;53(3):281–91.
 65. Kyriacou CP, Rosato E. Genetic analysis of cryptochrome in insect magnetosensitivity. *Front Physiol*. 2022 Aug;13:928416.
 66. Solov'yov I, Schulten K. Cryptochrome and magnetic sensing [Internet]. 2014. Available from: <http://www.ks.uiuc.edu/Research/cryptochrome/>
 67. Fedele G, Edwards MD, Bhutani S, Hares JM, Murbach M, Green EW, et al. Genetic analysis of circadian responses to low frequency electromagnetic fields in *Drosophila melanogaster*. Taghert PH, editor. *PLoS Genet*. 2014;10(12):e1004804.
 68. Sherrard RM, Morellini N, Jourdan N, El-Esawi M, Arthaut LD, Niessner C, et al. Low-intensity electromagnetic fields induce human cryptochrome to modulate intracellular reactive oxygen species. Keays D, editor. *PLoS Biol*. 2018;16(10):e2006229.
 69. Netušil R, Tomanová K, Chodáková L, Chvalová D, Doležel D, Ritz T, et al. Cryptochrome-dependent magnetoreception in a heteropteran insect continues even after 24 h in darkness. *J Exp Biol*. 2021;224(19):jeb243000.
 70. Kelleher FC, Rao A, Maguire A. Circadian molecular clocks and cancer. *Cancer Letters*. 2014 Jan;342(1):9–18.
 71. Chun SK, Chung S, Kim HD, Lee JH, Jang J, Kim J, et al. A synthetic cryptochrome inhibitor induces anti-proliferative effects and increases chemosensitivity in human breast cancer cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2015 Nov;467(2):441–6.
 72. Olejárová S, Moravčík R, Herichová I. 2.4 GHz electromagnetic

- field influences the response of the circadian oscillator in the colorectal cancer cell line DLD1 to miR-34a-mediated regulation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022 Oct;23(21):13210.
73. Liang CH, Chuang CL, Jiang JA, Yang EC. Magnetic sensing through the abdomen of the honey bee. *Sci Rep*. 2016;6:23657–7.
 74. Shaw J, Boyd A, House M, Woodward R, Mathes F, Cowin G, et al. Magnetic particle-mediated magnetoreception. *J R Soc Interface*. 2015;12(110):20150499.
 75. Hsu CY, Ko FY, Li CW, Fann K, Lue JT. Magnetoreception system in honeybees (*Apis mellifera*). *PLoS One*. 2007;2(4):e395.
 76. Gao Y, Wen P, Cardé RT, Xu H, Huang Q. In addition to cryptochrome 2, magnetic particles with olfactory co-receptor are important for magnetic orientation in termites. *Commun Biol*. 2021;4(1):1121.
 77. Kong LJ, Crepaz H, Gecka A, Urbanek A, Dumke R, Paterek T. In-vivo biomagnetic characterisation of the American cockroach. *Scientific reports*. 2018;8(1):5140.
 78. Bazalova O, Kvalcova M, Valkova T, Slaby P, Bartos P, Netusil R, et al. Cryptochrome 2 mediates directional magnetoreception in cockroaches. *PNAS*. 2016;113(6):1660–5.
 79. Vacha M, Puzova T, Drstkova D. Ablation of antennae does not disrupt magnetoreceptive behavioural reaction of the American cockroach to periodically rotated geomagnetic field. *Neurosci Lett*. 2008;435(2):103–7.
 80. Cucurachi S, Tamis WL, Vijver MG, Peijnenburg WJ, Bolte JF, Snoo GR de. A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environ Int*. 2013;51:116–40.
 81. Balmori A. Electromagnetic radiation as an emerging driver factor for the decline of insects. *Sci Total Environ*. 2021 May;767:144913.
 82. Carpenter RL, Livstone EM. Evidence for nonthermal effects of microwave radiation: Abnormal development of irradiated insect pupae. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1971 Feb;19(2):173–8.
 83. 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(1):48–55.
 84. Panagopoulos DJ, Karabarbounis A, Margaritis LH. Effect of GSM 900 MHz mobile phone radiation on the reproductive capacity of *Drosophila melanogaster*. *Electromagn Biol Med*. 2004;23(1):29–43.
 85. Atli E, Unlü H. The effects of microwave frequency electromagnetic fields on the development of *Drosophila melanogaster*. *Int J Radiat Biol*. 2006;82(6):435–41.
 86. Levitt BB, Lai HC, Manville AM. Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, Part 2 impacts: How species interact with natural and man-made EMF. *Rev Environ Health*. 2021;
 87. Malkemper EP, Tscheulin T, Vanbergen AJ, Vian A, Balian E, Goudeseune L. The impacts of artificial electromagnetic radiation on wildlife (flora and fauna). *Current knowledge overview: A background document to the web conference. A report of the EKLIPSE project*. [Internet]. Elsevier; 2018. Available from: https://eklipse.eu/wp-content/uploads/2020/10/EMR-KnowledgeOverviewReport_FINAL_27042018-1.pdf
 88. Goudeseune L, Balian E, Ventocilla J. The impacts of artificial electromagnetic radiation on wildlife (flora and fauna) [Internet]. 2018. Available from: https://eklipse.eu/wp-content/uploads/2020/10/EMR-WebConferenceReport_FINAL_27042018-1.pdf
 89. 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.
 90. Wan GJ, Jiang SL, Zhao ZC, Xu JJ, Tao XR, Sword GA, et al. Bio-effects of near-zero magnetic fields on the growth, development and reproduction of small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* and brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *J Insect Physiol*. 2014;68:7–15.
 91. Sutton GP, Clarke D, Morley EL, Robert D. Mechanosensory hairs in bumblebees (*Bombus terrestris*) detect weak electric fields. *PNAS* [Internet]. 2016;113(26):7261–5. Available from: <http://www.pnas.org/content/pnas/113/26/7261.full.pdf>
 92. Bae JE, Bang S, Min S, Lee SH, Kwon SH, Lee Y, et al. Positive geotactic behaviors induced by geomagnetic field in *Drosophila*. *Mol Brain*. 2016;9(1):55–5.
 93. Driessen S. Information platform EMF-Portal of the RWTH Aachen University [Internet]. Institute for Occupational, Social and Environmental Medicine; 2022. Available from: <https://www.emf-portal.org/en>
 94. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys*. 2020 May;118(5):483–524.
 95. Bordage G, Caellegh AS, Steinecke A, Bland CJ, Crandall SJ, McGaghie WC, et al. Review criteria for research manuscripts. *Academic medicine: journal of the Association of American Medical Colleges*. 2001;76(9):897–978.
 96. ORSAA. ORSAA database on electromagnetic bioeffects [Internet]. Oceania Radiofrequency Scientific Advisory Association; 2022. Available from: <https://www.orsaa.org/orsaa-database.html>
 97. Friedrich JO, Adhikari NK, Beyene J. The ratio of means method as an alternative to mean differences for analyzing continuous outcome variables in meta-analysis: A simulation study. *BMC Medical Research Methodology*. 2008 May;8(1):1–15.
 98. Schwarzer G, Carpenter JR, Rücker G. *Meta-analysis with r*. Cham: Springer International Publishing; 2015.
 99. Röver C, Friede T. Using the bayesmeta r package for bayesian random-effects meta-regression. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2023 Feb;229:107303.
 100. Thielens A, Bell D, Mortimore DB, Greco MK, Martens L, Joseph W. Exposure of insects to radio-frequency electromagnetic fields from 2 to 120 ghz. *Scientific reports*. 2018;8(1):3924.
 101. Thielens A, Greco MK, Verloock L, Martens L, Joseph W. Radio-frequency electromagnetic field exposure of western honey bees. *Scientific reports*. 2020;10(1):461.
 102. De Borre E, Joseph W, Aminzadeh R, Müller P, Boone MN, Josipovic I, et al. Radio-frequency exposure of the yellow fever mosquito (*Aegypti*) from 2 to 240 GHz. Cai MB, editor. *PLOS Computational Biology*. 2021 Oct;17(10):e1009460.
 103. Anglemeyer A, Horvath HT, Bero L. Healthcare outcomes assessed with observational study designs compared with those assessed in randomized trials. *Cochrane Db Syst Rev*. 2014 Apr;2014(4).
 104. Balmori A. Evidence for a health risk by RF on humans living around mobile phone base stations: From radiofrequency sickness to cancer. *Environ Res*. 2022 Nov;214:113851.
 105. Balmori A. Effects of man-made and especially wireless communication electromagnetic fields on wildlife. In: *Electromagnetic fields of wireless communications: Biological and health effects*. Boca Raton: CRC Press; 2022. p. 393–446.
 106. Lazaro A, Chroni A, Tscheulin T, Devallez J, Matsoukas C, Petanidou T. Electromagnetic radiation of mobile telecommunication antennas affects the abundance and composition of wild

- pollinators. *J Insect Conserv.* 2016;20(2):315–24.
107. Adelaja OJ, Ande AT, Abdulaheem GD, Oluwakorode IA, Oladipo OA, Oluwajobi AO. Distribution, diversity and abundance of some insects around a telecommunication mast in Ilorin, Kwara State, Nigeria. *Bulletin of the National Research Centre.* 2021 Dec;45(1):1–7.
 108. Nyirenda VR, Namukonde N, Lungu EB, Mulwanda S, Kalezu K, Simwanda M, et al. Effects of phone mast-generated electromagnetic radiation gradient on the distribution of terrestrial birds and insects in a savanna protected area. *Biologia (Bratisl.)*. 2022 Jun;77:2237–49.
 109. Ozel HB, Cetin M, Sevik H, Varol T, Isik B, Yaman B. The effects of base station as an electromagnetic radiation source on flower and cone yield and germination percentage in *Pinus brutia* ten. *Biologia Futura.* 2021 Apr;72(3):359–65.
 110. Ford AT, Ågerstrand M, Brooks BW, Allen J, Bertram MG, Brodin T, et al. The role of behavioral ecotoxicology in environmental protection. *Environmental Science & Technology.* 2021 Apr;55(9):5620–8.
 111. Wellenstein G. [The influence of high-voltage power lines on honey bees] Der Einfluss von Hochspannungsleitungen auf Bienenvölker (*Apis mellifica* L.). *J Appl Entomol.* 1973;74(1-4):86–94.
 112. Greenberg B, Bindokas VP, Frazier MJ, Gauger JR. Response of honey bees, *Apis mellifera* L., to high-voltage transmission lines. *Environ Entomol.* 1981 Oct;10(5):600–10.
 113. Horn H. Bienen im elektrischen Feld. *Apidologie.* 1982;13(1):79–82.
 114. Bindokas V, Greenberg B. Biological effects of a 765-kV, 60-Hz transmission line on honey bees (*Apis mellifera* L.): Hemolymph as a possible stress indicator. *Bioelectromagnetics.* 1984;5(3):305–14.
 115. Korall H, Leucht T, Martin H. Bursts of magnetic fields induce jumps of misdirection in bees by a mechanism of magnetic resonance. *Journal of Comparative Physiology A.* 1988;162(3):279–84.
 116. Dufor T, Grehl S, Tang AD, Doulazmi M, Traoré M, Debray N, et al. Neural circuit repair by low-intensity magnetic stimulation requires cellular magnetoreceptors and specific stimulation patterns. *Sci Adv.* 2019 Oct;5(10):eaav9847.
 117. Lohof AM, Dufor T, Sherrard RM. Neural circuit repair by low-intensity rTMS. *The Cerebellum.* 2022 Jan;21(5):750–4.
 118. Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL. Evaluation of specific absorption rate as a dosimetric quantity for electromagnetic fields bioeffects. Cordes N, editor. *PLoS ONE.* 2013 Jun;8(6):e62663.
 119. Barnes F, Greenebaum B. Setting guidelines for electromagnetic exposures and research needs. *Bioelectromagnetics.* 2020 Apr;41(5):392–7.
 120. Mulot M, Kroeber T, Gossner M, Fröhlich J. Wirkung von nicht-ionisierender Strahlung (NIS) auf Arthropoden. Bericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) [Internet]. Neuenburg, Switzerland: Bundesamt für Umwelt; 2022. Available from: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/electrosmog/publications-studies/studies.html>
 121. Thielens A. Environmental impact of 5G : A literature review of effects of radio-frequency electromagnetic field exposure of non-human vertebrates, invertebrates and plants. Panel for the Future of Science and Technology (STOA) [Internet]. 2021; Available from: <https://data.europa.eu/doi/10.2861/318352>
 122. Halgamuge MN. Review: Weak radiofrequency radiation exposure from mobile phone radiation on plants. *Electromagn Biol Med.* 2016;36(2):213–35.
 123. Waldmann-Selsam C, Puente AB la, Breunig H, Balmori A. Radiofrequency radiation injures trees around mobile phone base stations. *Science of The Total Environment.* 2016 Dec;572:554–69.
 124. Miller AB, Sears ME, Morgan LL, Davis DL, Hardell L, Oremus M, et al. Risks to health and well-being from radio-frequency radiation emitted by cell phones and other wireless devices. *Front Public Health.* 2019 Aug;7:223.
 125. Drivdal L, Sluijs JP van der. Pollinator conservation requires a stronger and broader application of the precautionary principle. *Curr Opin Insect Sci.* 2021 Aug;46:95–105.
 126. Francis CD, Barber JR. A framework for understanding noise impacts on wildlife: An urgent conservation priority. *Front Ecol Environ.* 2013 Aug;11(6):305–13.
 127. Gaston KJ, Visser ME, Hölker F. The biological impacts of artificial light at night: The research challenge. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences.* 2015 May;370(1667):20140133.
 128. Kostoff RN, Heroux P, Aschner M, Tsatsakis A. Adverse health effects of 5G mobile networking technology under real-life conditions. *Toxicol Lett.* 2020 May;323:35–40.
 129. Sutherland WJ, Butchart SHM, Connor B, Culshaw C, Dicks LV, Dinsdale J, et al. A 2018 horizon scan of emerging issues for global conservation and biological diversity. *Trends Ecol Evol.* 2018;33(1):47–58.
 130. Coronado LM, Stoute JA, Nadovich CT, Cheng J, Correa R, Chaw K, et al. Microwaves can kill malaria parasites non-thermally. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology.* 2023 Feb;13:67.
 131. Markov MS. Expanding use of pulsed electromagnetic field therapies. *Electromagnetic biology and medicine.* 2007 Jan;26(3):257–74.
 132. Pilla AA. Nonthermal electromagnetic fields: From first messenger to therapeutic applications. *Electromagnetic biology and medicine.* 2013;32(2):123–36.
 133. Costantini E, Aielli L, Serra F, Dominicis LD, Falasca K, Giovanni PD, et al. Evaluation of cell migration and cytokines expression changes under the radiofrequency electromagnetic field on wound healing in vitro model. *Int J Mol Sci.* 2022 Feb;23(4):2205.
 134. Hug K, Rössli M. Therapeutic effects of whole-body devices applying pulsed electromagnetic fields (PEMF): A systematic literature review. *Bioelectromagnetics.* 2011 Sep;33(2):95–105.
 135. Gaynor JS, Hagberg S, Gurfein BT. Veterinary applications of pulsed electromagnetic field therapy. *Res Vet Sci.* 2018 Aug;119:1–8.
 136. Mattsson MO, Simkó M. Emerging medical applications based on non-ionizing electromagnetic fields from 0 hz to 10 thz. *Medical Devices: Evidence and Research.* 2019 Sep;Volume 12:347–68.
 137. Mert T, Yaman S. Pro-inflammatory or anti-inflammatory effects of pulsed magnetic field treatments in rats with experimental acute inflammation. *Environ Sci Pollut Res.* 2020 Jun;27(25):31543–54.
 138. Lai H. Interaction of microwaves and a temporally incoherent magnetic field on spatial learning in the rat. *Physiology & behavior.* 2004;82(5):785–9.
 139. Panagopoulos D, Karabarbounis A, Yakymenko I, Chrousos G. Human-made electromagnetic fields: Ion forced-oscillation and voltage-gated ion channel dysfunction, oxidative stress and DNA damage (review). *Int J Oncol.* 2021 Oct;59(5):1–16.
 140. Bartos P, Netušil R, Slaby P, Doležel D, Ritz T, Vacha M. Weak radiofrequency fields affect the insect circadian clock. *J R Soc Interface.* 2019;16(158):20190285.

141. Ritz T, Thalau P, Phillips JB, Wiltschko R, Wiltschko W. Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass. *Nature*. 2004;429(6988):177.
142. Warnke U. Die Auswirkungen elektromagnetischer Wellen auf Tiere [Internet]. Saarbrücken: Internetpublikation der Kompetenzinitiative e.V.; 2009. Available from: <https://kompetenzinitiative.com/die-auswirkungen-elektromagnetischer-felder-auf-tiere/>
143. Lupi D, Mesiano MP, Adani A, Benocci R, Giacchini R, Parenti P, et al. Combined effects of pesticides and electromagnetic-fields on honeybees: Multi-stress exposure. *Insects* [Internet]. 2021;12(8):716. Available from: <https://www.mdpi.com/2075-4450/12/8/716/pdf>
144. Shepherd S, Jackson CW, Sharkh SM, Aonuma H, Oliveira EE, Newland PL. Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields Entrain Locust Wingbeats. *Bioelectromagnetics*. 2021;42(4):296–308.
145. Cappucci U, Casale AM, Proietti M, Marinelli F, Giuliani L, Piacentini L. WiFi related radiofrequency electromagnetic fields promote transposable element dysregulation and genomic instability in *Drosophila melanogaster*. *Cells*. 2022 Dec;11(24):4036.
146. Gee D. Late lessons from early warnings: Towards realism and precaution with EMF? *Pathophysiology*. 2009 Aug;16(2-3):217–31.
147. European Environment Agency. Late lessons from early warnings: Science, precaution, innovation - summary. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2016.
148. Panagopoulos DJ, Margaritis LH. The identification of an intensity 'window' on the bioeffects of mobile telephony radiation. *Int J Radiat Biol*. 2010;86(5):358–66.
149. Margaritis LH, Manta AK, Kokkaliaris KD, Schiza D, Alimisis K, Barkas G, et al. *Drosophila* oogenesis as a bio-marker responding to EMF sources. *Electromagn Biol Med*. 2013 Aug;33(3):165–89.
150. Geronikou S, Zimeras S, Davos CH, Michalopoulos I, Tsimoneas S. Diverse radiofrequency sensitivity and radiofrequency effects of mobile or cordless phone near fields exposure in *Drosophila melanogaster*. *PLoS One*. 2014;9(11):e112139.
151. Kapetanakis TN, Ioannidou MP, Baklezos AT, Nikolopoulos CD, Sergaki ES, Konstantaras AJ, et al. Assessment of radiofrequency exposure in the vicinity of school environments in Crete island, South Greece. *Applied Sciences*. 2022 May;12(9):4701.
152. Karastergios I, Gialofas A, Karabetos E. National observatory of electromagnetic fields: National telemetric network for the measurement of high-frequency electromagnetic fields in Greece. *Radiat Prot Dosim*. 2020 Feb;188(4):413–23.
153. Ofcom. 5G exposure measurements [Internet]. 2020. Available from: https://www.ofcom.org.uk/_data/assets/pdf_file/0015/190005/emf-test-summary.pdf
154. ANFR. 5G exposure measurements [Internet]. 2021. Available from: <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expacement/20211214-exposition-5G.pdf>
155. funkstrahlung.ch. Grenzwerte [Internet]. 2017. Available from: <https://www.funkstrahlung.ch/index.php/politik/grenzwerte>
156. International Commission on the Biological Effects of Electromagnetic Fields (ICBE-EMF). Scientific evidence invalidates health assumptions underlying the FCC and ICNIRP exposure limit determinations for radiofrequency radiation: Implications for 5G. *Environ Health*. 2022 Oct;21(1):92.
157. Levitt BB, Lai HC, Manville AM. Low-level EMF effects on wildlife and plants: What research tells us about an ecosystem approach. *Frontiers in Public Health*. 2022 Nov;10:4654.
158. Scheffer M, Bolhuis JE, Borsboom D, Buchman TG, Gijzel SMW, Goulson D, et al. Quantifying resilience of humans and other animals. *Proc Natl Acad Sci*. 2018 Oct;115(47):11883–90.
159. Mostafalou S, Abdollahi M. Pesticides: An update of human exposure and toxicity. *Arch Toxicol*. 2016 Oct;91(2):549–99.
160. Chartres N, Sass JB, Gee D, Bălan SA, Birnbaum L, Coglianò VJ, et al. Conducting evaluations of evidence that are transparent, timely and can lead to health-protective actions. *Environmental Health*. 2022 Dec;21(1):123.
161. Chiaraviglio L, Cacciapuoti AS, Di Martino G, Fiore M, Montesano M, Trucchi D, et al. Planning 5G networks under emf constraints: State of the art and vision. *IEEE Access*. 2018;6:51021–37.
162. tutorialspoint.com. Poynting-vector [Internet]. 2021. Available from: https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_poynting_vector.htm

Matériel supplémentaire : cet article contient du matériel supplémentaire (<https://doi.org/10.1515/reveh-2023-0072>).

Traduction : Diagnose Funk e. V. Le texte original anglais fait foi.