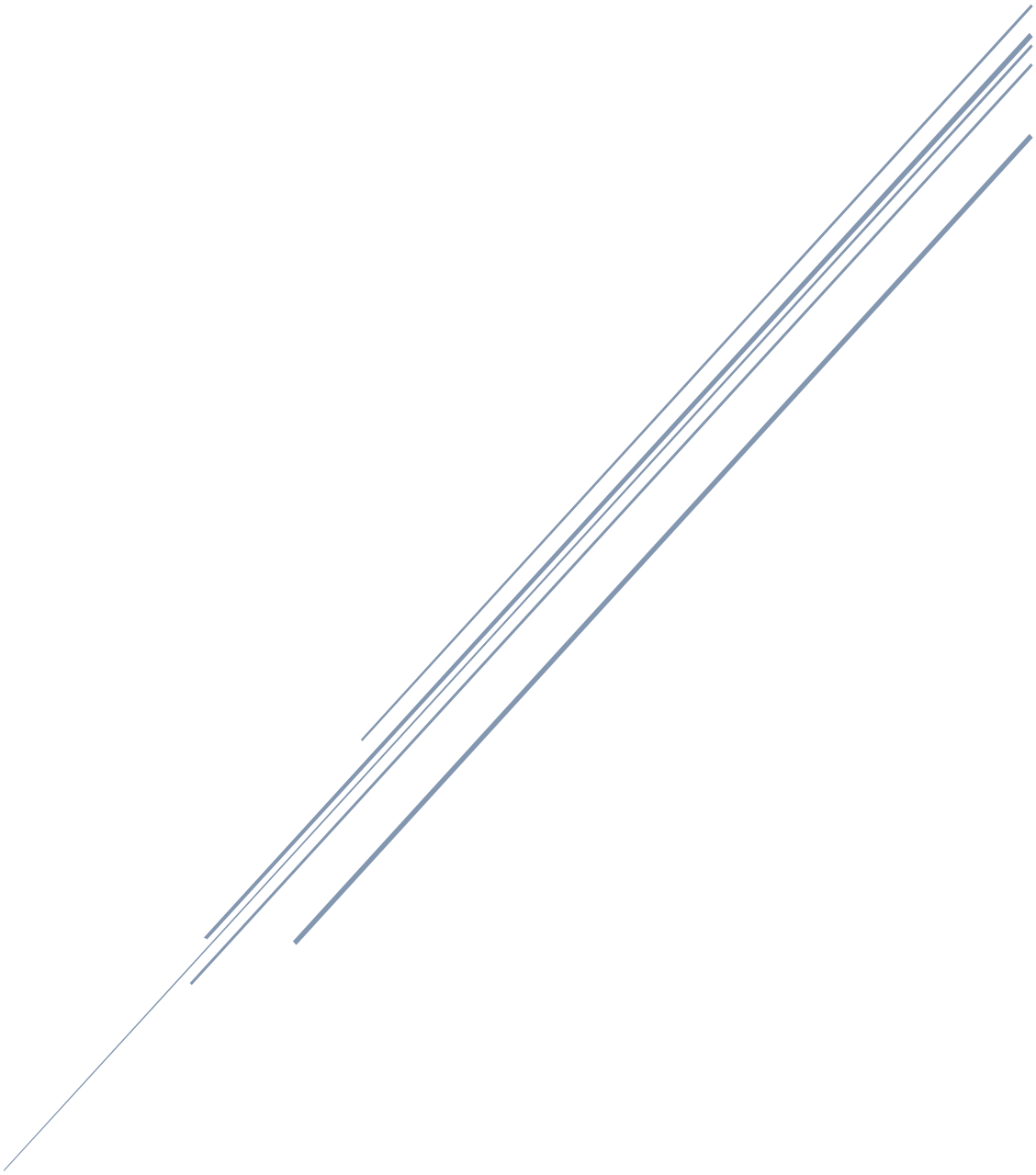
Effet des rayonnements non ionisants (RNI) sur les arthropodes

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

18/08/2022



Université de Neuchâtel

Impressum

Mandant : Office fédéral de l'environnement (OFEV), division Bruit et RNI, CH-3003 Berne

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire : Université de Neuchâtel

Auteurs et Rédaction : Matthieu Mulot, Thomas Kroeber, Martin Gossner, Jürg Fröhlich

Accompagnement OFEV : Maurane Riesen, Christopher Gerpe

Soutien/ financement : Le présent rapport a été commandé et financé par l'Office fédéral de l'environnement (division Bruit et RNI).

Remarque : cette étude/ce rapport a été réalisé(e) sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Le mandataire est seul responsable du contenu.

Citation proposée :

Mulot M, Kroeber T, Gossner M, Fröhlich J. (2022) Effet des rayonnements non ionisants (RNI) sur les arthropodes, rapport sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement OFEV, Neuchâtel, juillet 2022.

Droit de reproduction :

CC-BY-NC-ND

Table des matières

Résumé 3
Abréviations 4
Introduction 5
Méthodes 8
Formulation PECO (étape 1) 10
Définition des mots-clés et critères de recherche 11
Critères d'inclusion et d'exclusion (étape 2) 12
Extraction des données (étape 3) 12
Evaluation de la qualité des études sélectionnées (étape 4) 13
Estimation de la confiance dans l'ensemble des preuves (étape 5) 14
Résultats 15
Sélection des études, extraction des données et évaluation de la qualité 15
Effets sur les arthropodes 18
Survie et mortalité 21
Reproduction 22
Dégradation de l'ADN 24
Comportement 25
Rythme circadien 26
Capacité de vol 26
Recherche et accumulation de nourriture 27
Orientation 28
Effet sur les fonctions corporelles et le métabolisme général 28
Effet thermique 29
Vitesse 31
Stress cellulaire 32
Population 32
Echelle de l'écosystème 33

Synthèse des résultats 34
Discussion 36
Comparaison avec les revues existantes 36
Quels mécanismes d'action des RNI dans les perturbations comportementales ? 37
Difficulté d'avoir un design expérimental solide simulant une exposition environnementale réelle 38
Fiabilité de l'évaluation des effets des RNI et des dangers associés 39
Risque pour les populations d'arthropodes 39
Risque sur les écosystèmes 40
Eléments-clés 41
Remerciements 42
Financement 42
References 43
Annexes 55
1) Tables détaillées des effets du RNI 55
2) Grille d'évaluation de la qualité des études 84
3) Limites d'immissions légales des RNI définies par l'ORNI et l'ICNIRP 86
4) Evaluation de la qualité des études sélectionnées 87

Résumé

Les rayonnements non ionisants (RNI) sont décrits comme une série d'ondes composées de champs électriques et magnétiques oscillants se déplaçant à la vitesse de la lumière, et qui n'ôtent pas d'électrons des atomes et des molécules du matériau qu'ils traversent. Les RNI anthropiques sont présents dans un large éventail de conditions et sont produits par exemple par les lignes hautes tension, la téléphonie mobile, la radiodiffusion et le wifi. Le niveau d'émission des RNI est réglementé afin de protéger les humains contre les effets négatifs sur la santé. Cependant, leurs effets potentiels directs et indirects sur les arthropodes ne sont pas bien connus, y compris aux expositions autorisées par la réglementation. Dans cette revue de la littérature, nous avons évalué l'état de connaissances au sujet des effets létaux et sublétaux des RNI sur les arthropodes. Nous avons identifié 127 études évaluant un effet des RNI sur les arthropodes. Nous avons évalué la qualité des études pour estimer le niveau de preuve qu'elles apportaient et avons rassemblé leurs conclusions par catégories d'effets biologiques à différentes gammes de fréquences (0 - 100 kHz, 100 kHz – 6 GHz, 6 GHz - 300 GHz). Nous avons identifié des effets potentiels en termes de comportement, métabolisme, stress cellulaire, reproduction et dégradation de l'ADN pour les fréquences allant jusqu'à 6 GHz. Pour les fréquences supérieures à 6 GHz, le niveau de preuve est faible ou insuffisant en raison notamment du faible nombre d'études. Ces effets ont été identifiés notamment à des intensités d'expositions expérimentales inférieures aux valeurs limites d'immission (VLI), recommandées la commission internationale de protection contre le RNI (ICNIRP) pour protéger les humains contre les effets sanitaires négatifs du RNI. Cependant, la qualité générale des études n'est souvent pas suffisante pour établir des relations dose-effet solides, notamment du fait des dispositifs expérimentaux inadéquats ou biaisés. De plus, les études sont dans la très grande majorité des cas réalisées dans des cadres contraignant pour les arthropodes qui ne peuvent s'échapper, et les expositions expérimentales ne reflètent donc pas nécessairement les expositions environnementales.

Même si l'effet des RNI sur les arthropodes est établi au moins partiellement, il est très difficile d'estimer la portée de ces effets à de plus grandes échelles (population, écosystèmes, etc), et des études solides, reproductibles, et de grande ampleur sont nécessaires.

Abréviations

Dans ce rapport, nous avons choisi de garder les abréviations anglaises pour garantir une homogénéité entre les versions allemande et française d'une part, et pour être consistant avec la littérature qui est rédigée en langue anglaise

DAS. Dose d'Absorption Spécifique

EMF ElectroMagnetic Field : champ électromagnétique

EMR ElectroMagnetic Radiations : rayonnement électromagnétique

GMF GeoMagnetic Field. Champs magnétique terrestre

PFD Power Flux Density, calculé comme PFD = $(V/m)^2/377$, en W/m^2

RNI Rayonnement non ionisant

SMF Static Magnetic Field : champs magnétique statique (fréquence = 0 Hz)

Wifi (Wi-Fi) Wireless Fidelity : protocole de communication informatique entre 2.4 GHz et 5 GHz

Tableau 1 gammes de fréquences des RNI

Abréviation	Signification	Fréquence
TLF	tremendously low frequency	0 Hz à 3 Hz
ELF	extremely low frequency	3 Hz à 30 Hz
SLF	super low frequency	30 Hz à 300 Hz
ULF	ultra low frequency	300 Hz à 3 kHz
VLF	very low frequency	3 kHz à 30 kHz
LF	low frequency	30 kHz à 300 kHz
MF	medium frequency	300 kHz à 3 MHz
HF	high frequency	3 MHz à 30 MHz
VHF	very high frequency	30 MHz à 300 MHz
UHF	ultra high frequency	300 MHz à 3 GHz
SHF	super high frequency ou ondes centimétriques	3 GHz à 30 GHz
EHF	extremely high frequency ou ondes millimétriques	30 GHz à 300 GHz

Introduction

Les rayonnements non ionisants (RNI) sont décrits comme une série d'ondes énergétiques composées de champs électriques et magnétiques oscillants se déplaçant à la vitesse de la lumière. Si les rayonnements ionisants enlèvent des électrons aux atomes et aux molécules du matériau qu'ils traversent, ce n'est pas le cas des rayonnements non ionisants. Les RNI comprennent le spectre des ultraviolets (UV), de la lumière visible, des infrarouges (IR), des micro-ondes (MW), des radiofréquences (RF) et des fréquences extrêmement basses (ELF). Les RNI artificiels sont présents dans un large éventail de contextes et sont utilisés par exemple, dans le cadre des hautes fréquences, pour la téléphonie mobile, la radiodiffusion et le wifi. Les lignes électriques émettent des RNI à basse fréquence (50 Hz). En fonction des fréquences et intensités, les RNI peuvent avoir des effets différents sur l'humain. C'est pourquoi des limitations d'exposition au RNI sont réglementées dans le monde entier. En Suisse, les limitations du RNI émis à partir d'installations stationnaires (par exemple les stations émettrices pour la téléphonie mobile et les lignes à haute-tension) sont fixées par l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI 814.710). Ces limitations dépendent principalement de l'intensité du champ électrique et de sa fréquence, l'objectif étant de limiter la quantité d'énergie entrant dans les tissus humains[1]. Pour les appareils portatifs tels que les téléphones mobiles, l'exposition peut être caractérisée en débit d'absorption spécifique (DAS). Le DAS est exprimé en W/kg, indiquant la puissance de rayonnement (W) absorbé par le corps humain (kg). Le DAS est calculé pour le corps humain en tenant compte des propriétés physiques des tissus biologiques. À une intensité modérément élevée, les RNI dans la gamme RF (30 MHz à 300 GHz) peuvent provoquer un effet thermique, c'est-à-dire chauffer le tissu biologique.

Un grand nombre d'études ou de revues de la littératures se sont intéressées aux effets du RNI sur la santé humaine [1], mais leurs conséquences sur la faune, en particulier les insectes, sont encore mal connues. Certaines études de laboratoire ou de terrain ont montré que les RNI peuvent influencer le comportement ou la physiologie de certains arthropodes.

[1] L'ORNI définit deux types des valeurs limites. D'une part les valeurs limites d'immissions, basées sur les recommandations de la Commission internationale de protections contre le RNI (ICNIRP), qui doivent être respectées partout où des humains peuvent se trouver – même durant une courte durée. D'autre part, sur la base du principe de précaution décrit dans la loi sur la protection de l'environnement, le Conseil fédéral a instauré les valeurs limites de l'installation. Elles sont plus strictes que les valeurs limites d'immissions et doivent être respectées dans les lieux où des personnes séjournent régulièrement pendant une période prolongée (notamment les logements, les écoles, les hôpitaux, les bureaux).

Cependant, ces études ne sont souvent pas d'une qualité suffisante pour estimer l'impact de ces rayonnements sur la physiologie, l'écologie et la biodiversité des arthropodes en général.

Cela met en lumière le besoin important d'une évaluation de la qualité de la littérature actuelle concernant les impacts des RNI afin de déterminer l'état des connaissances et d'identifier les lacunes de la recherche.

Plusieurs interventions parlementaires ont été faites à ce sujet ces dernières années en Suisse : Interpellation (Ip) Wismer 19.4478 – « Disparition des insectes et rayonnements de la téléphonie mobile », Ip Friedli 19.3345 – « Incidences des champs électromagnétiques sur les animaux et les plantes. Nécessité de mener des recherches » et la Question Reimann 18.5323 – « Les champs électromagnétiques ont-ils une part de responsabilité croissante dans de la disparition des abeilles ? ». Ces questions s'inscrivent d'ailleurs dans un contexte politique plus large d'évaluation des facteurs de baisse de la biodiversité des arthropodes, illustré par exemple par la motion Guhl « Enrayer rapidement et résolument la mortalité dramatique des abeilles et autres insectes ».

Dans ses prises de position en réponse à ces interventions, le Conseil fédéral indique qu'il ne peut pas exclure avec certitude que le rayonnement des téléphones portables ait des effets négatifs sur les insectes. Toutefois, il mentionne que le Centre de recherche apicole de l'Agroscope et la communauté scientifique internationale considèrent que le RNI est une cause peu probable du déclin important des insectes [2]. En outre, le Conseil fédéral ajoute que les principales causes du déclin des insectes - perte des milieux naturels, polluants, agriculture intensive et pollution lumineuse - sont reconnues au niveau international [3] . Néanmoins, il est mentionné dans le récent rapport des Académies suisses des sciences sur l'état de la diversité des insectes en Suisse que les RNI pourraient être un des potentiels facteurs pouvant affecter les insectes, mais ne sont pas encore bien étudiés [4]. Cela souligne la nécessité de poursuivre les recherches afin d'estimer de manière fiable le rôle du RNI dans les changements de populations et de diversité des insectes. Encore récemment, la pollution lumineuse n'était pas considérée comme un facteur majeur de perturbation de la biodiversité. La recherche sur la pollution lumineuse n'en est qu'à ses débuts, notamment lorsqu'il s'agit de comprendre les effets sur l'écosystème. La recherche sur les RNI s'inscrit dans une démarche similaire.

Les gammes de fréquence des RNI utilisées pour la télécommunication évoluent dans le temps. Ainsi, la 5G est utilisée en Suisse actuellement à des gammes de fréquences précédemment utilisée pour la téléphonie mobile ou le wifi. Pour des applications futures ou dans certaines villes, la 5G est à l'essai dans des gammes de fréquences plus élevées, appelées ondes centimétriques ou supra-haute fréquence (SHF, fréquences entre env. 6 et

30 GHz) et les ondes millimétriques ou extrêmement hautes fréquences (EHF, fréquences entre 30 et 300 GHz). Le groupe consultatif d'expert·e·s sur les RNI, BERENIS, mandaté par l'Office fédéral de l'environnement, a conclu dans son bulletin d'information publié en juillet 2020, que dans le cadre de ces ondes millimétriques, une attention particulière doit être accordée aux impacts écologiques et qu'il existe encore des lacunes dans les connaissances dans ce domaine [5]

Bien qu'il existe quelques revues de la littérature sur ce sujet, il semble manquer une vue d'ensemble récente et de bonne qualité employant une méthode d'évaluation systématique des effets des RNI sur les arthropodes. Un article sur les effets écologiques plus larges (oiseaux, insectes, autres vertébrés, autres organismes et plantes) a été publié en 2013 [6]. Un article de 2018 rapporte les principaux éléments discutés lors d'une conférence en ligne du projet EKLIPSE (acronyme de Knowledge & Learning Mechanism on Biodiversity & Ecosystem Services) sur l'impact des rayonnements électromagnétiques sur la faune [7], [8]. En novembre 2019, le "Bundesamt für Strahlenschutz" (BfS) en Allemagne a organisé un workshop international sur les effets des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques sur la faune. Leurs conclusions générales sont qu'il n'y a actuellement aucune preuve scientifique solide d'effets négatifs graves sur la flore et la faune, mais qu'il existe des indications qui bénéficieraient d'une étude plus approfondie. Ils mentionnent que le développement de protocoles solides pour les expériences en laboratoire et sur le terrain est nécessaire. Enfin, ils considèrent que des études sont nécessaires sur les mécanismes d'action des effets des RNI sur la faune et la flore. La revue de Vanbergen et al. 2019 [7] et les conclusions du workshop du BfS fournissent quelques informations de base mais sont plutôt brèves concernant l'état des connaissances générales sur les arthropodes et les implications. En outre, il s'agit davantage d'une compilation de la littérature que d'une revue systématique.

Plus récemment, le Parlement Européen a publié une revue de la littérature axée spécifiquement sur les insectes [9]. Cette dernière, bien que fournissant une vue d'ensemble de la littérature existante sur ce sujet, présente des lacunes méthodologiques et analytiques et la publication n'a pas été publiée dans une revue à comité de relecture.

Une revue scientifique solide et systématique de la littérature, se concentrant sur l'effet des RNI sur les arthropodes (en particulier les insectes) est nécessaire pour avoir une vue d'ensemble scientifiquement fondée et une discussion argumentée sur l'implication de cette recherche en relation avec d'autres facteurs environnementaux.

L'objectif général est d'évaluer les effets potentiels des RNI sur les arthropodes, en particulier à des fréquences élevées. Plus précisément, nous voulons tirer des conclusions sur

l'association entre l'exposition aux RNI et les effets sur la santé des arthropodes en intégrant les données des études animales et en tenant compte des résultats d'études plus théoriques. Nous souhaitons également évaluer et prévoir les risques identifiés à des échelles plus larges, à savoir au niveau des populations d'arthropodes, de l'écosystème et du paysage.

Le présent rapport a donc pour objectif de répondre à ces questions

1. Quels sont les risques à court et moyen terme de potentiels effets mis en lumière sur la biodiversité et l'environnement ?
2. Est-ce que l'utilisation généralisée d'ondes centimétriques/millimétriques pour la téléphonie mobile représente un danger supplémentaire considérable ?
3. Quelles sont les futures études qui devraient être effectuées à ce sujet en priorité ?

De plus, le rapport devra inclure des informations au sujet des éléments suivants : les effets qui ont été identifiés par des recherches scientifiques, les types d'expositions utilisés (gammes de fréquences, intensités, modulation) et la qualité des conditions expérimentales. Il pourra aussi mettre en lumière s'il y a des effets consistants retrouvés dans plusieurs études de qualité jugée bonne ou moyenne, et si des études, même lacunaires identifient des effets dont le potentiel de dégât est considérable d'un point de vue écologique.

Méthodes

Cette revue systématique est adaptée de l'approche OHAT pour la revue systématique et l'intégration des preuves [10]. En particulier, les procédures d'évaluation de la qualité des études et de la confiance dans l'ensemble des preuves (étapes 4 et 5) ont été modifiées pour répondre aux spécificités des études écologiques. Ces modifications sont détaillées dans les sections subséquentes. Cette approche décrit une procédure en 7 étapes :

1. Formulation du problème et développement du protocole
2. Recherche et sélection des études à inclure
3. Extraction des données des études
4. Évaluation de la qualité des études individuelles
5. Évaluation de la confiance dans l'ensemble des preuves
6. Traduction des niveaux de confiance en niveaux de preuves de l'effet sur la santé des organismes
7. Intégration les preuves pour élaborer des conclusions sur l'identification des dangers[2]

[2] Les points 6 et 7 sont adressés dans la discussion

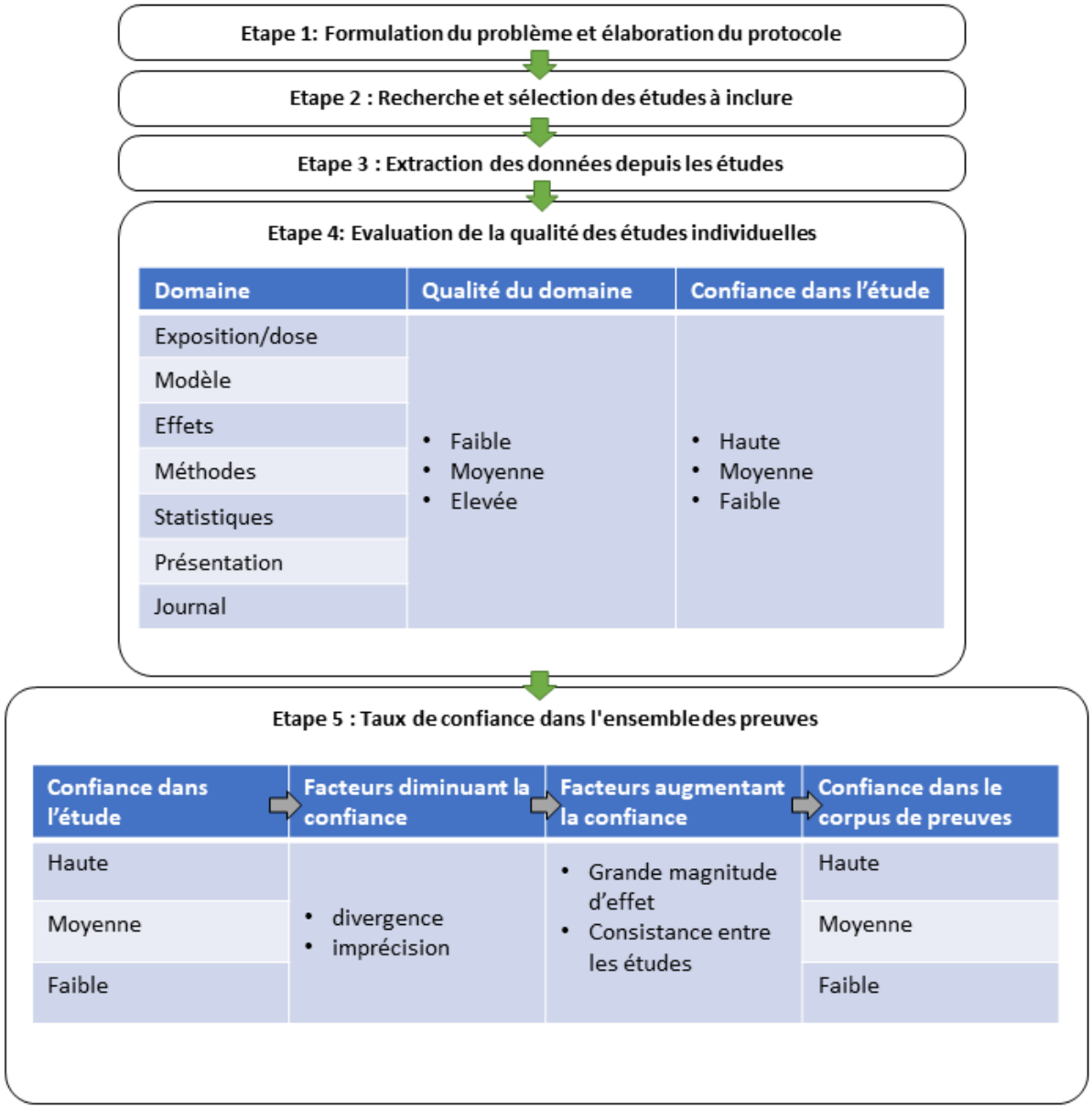


Figure 1 Méthodologie pour la stratégie de recherche, la sélection des études, l'évaluation de la qualité des études et l'évaluation du corpus de preuves, adaptée depuis Rooney et al. 2014 [10]

Formulation PECO (étape 1)

La formulation PECO cadre la recherche et la revue systématique. Nous l'avons défini ainsi :

- Population : Nous avons parcouru toute la littérature évaluant les effets du RNI sur n'importe quel arthropode. Nous avons considéré les études portant sur des effets au niveau cellulaire, au niveau des organismes, au niveau des population d'arthropodes ou des écosystèmes.
- Exposition : Nous avons couvert toutes les gammes de fréquences des RNI, depuis les fréquences extrêmement basses (ELF) jusqu'à 300 GHz.
- Comparateurs : Nous avons inclus les études où l'effet était comparé à un groupe non exposé ou à un groupe avec une exposition plus faible.
- Critères d'évaluation (Outcomes):
    - Survie et Mortalité (à tous les stades de vie)
    - Effet sublétaux
        - Taux de reproduction
        - Orientation
        - Recherche et accumulation de nourriture
        - Capacité de vol
        - Métabolisme et fonctions corporelles
        - Effets thermiques
        - Vitesse de déplacement
        - Rythme circadien
        - Dégradation/altération de l'ADN
        - Canaux calciques
        - Stress cellulaire
    - Echelle de la population
        - Effet sur l'abondance, la structure des populations, et le sex ratio.
    - Echelle de l'écosystème
        - Effet sur le fonctionnement des sols et les réseaux trophiques associés
        - Effet sur la pollinisation
        - Effets différentiels sur différents groupes fonctionnels (quel groupe est plus sensible que les autres)

La formulation PECO pour cette étude est résumée dans le tableau ci-après.

Participants	Arthropodes
Exposition	Exposition aux RNI, expérimental ou observationnel
Comparateurs	Groupe contrôle ou dose-réponse
Critères d'évaluation (**O**utcome)	Mortalité, taux de reproduction, orientation, assimilation de ressource, capacité de vol, vitesse de déplacement, cycle circadien, effets thermiques, dégradation ADN, canaux calciques, stress cellulaire,

Définition des mots-clés et critères de recherche

Sur la base de la formulation PECO, nous avons défini les mots-clés suivants :

Mots-clés RNI: EMF, EMD, EMR, Magnetic Field, electromagnetic, radiofrequencies, wireless, 3G, 4G, 5G, UMTS, LTE, wifi, WLAN, radiation

Mots-clés relatifs organismes: arthropods, insects

Mots clés relatifs aux effets: reproduction, lifecycle, orientation, foraging, assimilation, flight, behavior, cycle, DNA, chromosome, stress, nerve, thermal, CCD, abundance, structure

Nous avons effectué cette requête sur Scopus et Pubmed le 02 juin 2021, en recherche multichamps.

(EMF OR EMD OR EMR OR Magnetic Field OR electromagnetic OR radiofrequencies OR wireless OR 3G OR 4G OR 5G OR UMTS OR LTE OR wifi OR WLAN OR radiation) AND (arthropods OR insects) AND (reproduction OR lifecycle OR orientation OR foraging OR assimilation OR flight OR behavior OR cycle OR DNA OR chromosome OR stress OR nerve OR thermal OR CCD OR abundance OR structure)

Pour élargir la portée des résultats de la recherche, nous avons récupéré les articles citant les articles obtenus lors de la recherche, ainsi que les articles cités par les articles obtenus lors de la recherche.

Critères d’inclusion et d’exclusion (étape 2)

Nous avons inclus toute étude examinant un effet des RNI sur les arthropodes au niveau de l'individu, de la population ou de l'écosystème. Seules les études expérimentales ou observationnelles testant l'effet des RNI sur les arthropodes ont été considérées pour cette revue systématique. Les chapitres de livres, les rapports, les revues systématiques ont été pris en compte pour la discussion mais n'ont pas été inclus dans le corps de cette revue systématique, comme c'est l’usage dans les revues systématiques, car il y aurait une redondance dans la littérature examinée. Les articles de physique (modèles d'absorption) étudiant les processus théoriques des RNI sur des tissus biologiques ont été pris en compte pour la discussion mais n'ont pas été inclus dans le corps de la revue systématique car ils n'étudient pas ou ne testent pas directement un effet.

Les résultats de la recherche ont été importés dans le logiciel de curation Rayyan afin de supprimer les doublons et de sélectionner les études pertinentes. Chaque curateur (3 curateurs au total) était aveugle aux choix des autres. Une fois l'aveugle levé, les divergences ont été résolues par discussion entre les curateurs.

Même si nous n’avions *a priori* pas défini d’intensité d’exposition limite dans les critères d’inclusion, nous avons choisi, pendant le processus de sélection, d’exclure un groupe d’études investiguant l’utilisation des RNI comme moyen de chauffage diélectrique des arthropodes pour la stérilisation des stocks alimentaires. Ces études n’étaient pas pertinentes pour la problématique adressée dans ce rapport, du fait des niveaux d’exposition très élevés qui sont très éloignés du niveau d’exposition environnemental auquel les arthropodes peuvent être soumis. Cet aspect est discuté davantage dans la partie **Résultats**.

Extraction des données (étape 3)

Pour chaque étude sélectionnée, nous avons extrait :

- L’organisme cible
- Le rang de fréquence RNI
- L’intensité d’exposition aux RNI
- L’effet mesuré et le stade de vie concerné
- Les limitations de l’étude

Evaluation de la qualité des études sélectionnées (étape 4)

Pour estimer la fiabilité des articles sélectionnés, nous avons procédé à une évaluation de leur qualité. En raison de la nature des études, il était impossible d'utiliser les outils classiques disponibles pour l'évaluation du risque de biais, même ceux conçus pour les études animales comme SYRCLE [11]. En effet, ces outils sont principalement conçus pour les mammifères ou les vertébrés, pour lesquels la réglementation concernant les études médicales ou écotoxicologiques est stricte. Les études réalisées sur les arthropodes ne suivent pas de telles règles et protocoles, notamment en termes d'allocation aléatoire, d'aveuglement, d'élevage des organismes, etc. Si nous avions dû suivre un tel outil d'évaluation du risque de biais, toutes les études sélectionnées auraient été marquées comme biaisées ou fortement biaisées. Par conséquent, nous avons défini un système de classement basé de la grille d'évaluation de la qualité des études utilisée par le groupe consultatif d'expert·e·s en matière de RNI, le BERENIS (voir annexe 2). Au lieu d'une évaluation stricte du biais, nous avons utilisé une notation de la qualité qui prend en compte la conception générale de l'étude, en termes de biais, de statistiques, et de design expérimental. Nous avons donc utilisé un schéma hybride entre l'analyse de biais et l'évaluation de la qualité pour définir un score de confiance à chaque étude, lequel est directement utilisé dans l'estimation de la confiance dans l'ensemble des preuves (étape 5).

Nous avons défini 3 domaines d'évaluation décrits ci-après : exposition/dose, méthodes, statistiques. L'*exposition/dose* est liée à la définition, la mesure et la pertinence de l'exposition au RNI. Le domaine *méthodes* est lié à la conception expérimentale globale et cherche à évaluer si le design expérimental global de l'étude permet de répondre à la question posée. Le domaine *statistique* permet de vérifier si les statistiques utilisées dans l'étude sont pertinentes et correctes.

Pour chacun de ces trois domaines d'évaluation, une liste de questions est définie, pour lesquelles une réponse positive apporte 1 point au domaine, et une réponse négative apporte 0 point. Sur la base du nombre de points obtenus, la qualité de chacun de ces domaines peut être notée "faible", "moyenne" ou "élevée", à l'exception du domaine " statistiques" qui peut uniquement prendre les valeurs "faibles" ou " élevées". Le système de notation complet figure à l'annexe 2.

Sur la base de la qualité de chacun de ces 3 domaines, un indice de confiance est attribué à chaque étude individuelle. La confiance globale accordée à une étude est équivalente à la moins bonne qualité d'un des 3 domaines évalués.

Dans ce contexte, la confiance d'une étude donnée reflète la probabilité que les effets rapportés par l'étude soient proches de l'effet réel que l'étude cherche à évaluer.

Estimation de la confiance dans l'ensemble des preuves (étape 5)

Vue l'hétérogénéité des expositions, des organismes, et des critères d'évaluation des différentes études, il n'était pas possible d'effectuer une méta-analyse. Nous avons donc synthétisé les résultats de façon narrative, comme recommandé par l'OHAT. Le but de cette étape est de répondre à la question type : « Dans la gamme de fréquence allant de X Hz à Y Hz, quel est le niveau de preuve d'un effet du RNI sur le résultat Z ?». Ce résultat Z fait référence à un des outcomes définis dans le PECO : survie, comportement, etc.

Nous avons défini 3 catégories de fréquences des RNI : 0 – 100kHZ, 100 kHz – 6 GHz, 6 GHz – 300 GHz. Nous avons évalué la confiance des résultats rapportés par les études pour chacune de ces catégories en estimant la qualité de l'ensemble des preuves comme décrit dans Rooney et al. (2014) [10]. Pour chaque critère d'évaluation (outcome) défini à l'étape 1, la confiance dans l'ensemble des preuves est évaluée en considérant les forces et les faiblesses d'une collection d'études. La méthodologie employée et présentée ci-après est inspirée par la méthode GRADE mais a été adaptée pour tenir compte des spécificités des études considérées, qui n'ont pas les caractéristiques nécessaires à l'emploi de GRADE. Pour chaque résultat et catégorie de RNI, les études reçoivent un indice de confiance initial comme expliqué à l'étape 4. Ensuite, une confiance globale pour chaque critère d'évaluation dans chaque gamme de RNI est attribuée en fonction de la confiance des études traitant du résultat dans la gamme donnée. La confiance initiale est définie comme la note la plus élevée d'au moins 2 études. S'il y a moins de 2 études, on définit la confiance comme juste inférieure à la confiance maximale de l'étude incluse. Le rationnel est qu'une étude seule présente un niveau de preuve moindre qu'une collection d'études arrivant à des conclusions similaires. Cette note peut ensuite être augmentée ou diminuée. On utilise un système de points pour augmenter ou diminuer la note. Si 5 études par au moins 2 groupes de recherche différents concluent dans la même direction, on attribue 1 point. Si au moins deux études montrent une relation dose-effet, on ajoute 1 point. Si 2 études montrent des effets strictement contradictoires, on attribue -1 point. Si plus de 2 études sont non concluantes, on attribue -1 point. Si le score global est positif, le niveau de confiance final est défini en augmentant le niveau de confiance initial. Si le score global est négatif, le niveau de confiance final est défini en abaissant le niveau de confiance initial.

Résultats

Sélection des études, extraction des données et évaluation de la qualité

La recherche initiale a renvoyé 4409 références, dont 422 étaient des doublons. Parmi les articles restants, 3 658 ont été identifié comme hors-sujet sur la base du titre et du résumé sur la plate-forme Rayyan. Quelques exemple d'étude hors sujet sont par exemple une étude qui décrit un robot reproduisant un insecte [12] ou une étude évaluant des pesticides [13]. Parmi les 329 articles restants, 127 répondaient pleinement aux critères d'inclusion et ont été considérés pour examen. Parmi les 201 articles exclus, environ la moitié étaient des revues, des chapitres de livre, ou des études ne testant pas l'effet du RNI sur les arthropodes (par exemple des études sur des vertébrés). L'autre moitié étaient des études sur l'utilisation des micro-ondes comme source de chaleur pour éradiquer les insectes et les parasites du stockage des céréales [14], [15]. Bien que nous n'ayons pas fixé a priori d'exposition limite, nous avons choisi d'exclure ces études lors du processus de sélection, comme précisé dans la section **Méthodes**.

Ces études utilisant les RF comme moyen de lutte contre les parasites dans les entrepôts alimentaires visent à élever la température des arthropodes rapidement, généralement au-dessus de 60°C, pendant quelques minutes, pour désinfecter les cultures ou les fruits. [16], [17]. Dans ces conditions, ces études mesurent uniquement l'augmentation de la température provoquée par une exposition aux RF de forte intensité et la problématique de ces études consiste à trouver la température et le temps de chauffage optimal des arthropodes pour les tuer de manière efficace. Certaines études ont même testé cet effet en plaçant des larves dans un four à micro-ondes [18]. Quelques études ont fait état des expositions utilisées, et les expositions qui y sont décrites sont loin d'être proches des valeurs d'exposition que l'on peut trouver dans un l'environnement normal. Par exemple, des expositions telles que 300 kV/m à 47,5 MHz ont été rapportées comme tuant 90% d'un échantillon de charançon des grains en 60 secondes [19] alors que les seuils d'immissions définis par l'ORNI sont de 26 V/m à ces fréquences, soit 10 000 fois moins.

127 études observationnelles ou expérimentales évaluant un effet ont été conservées.

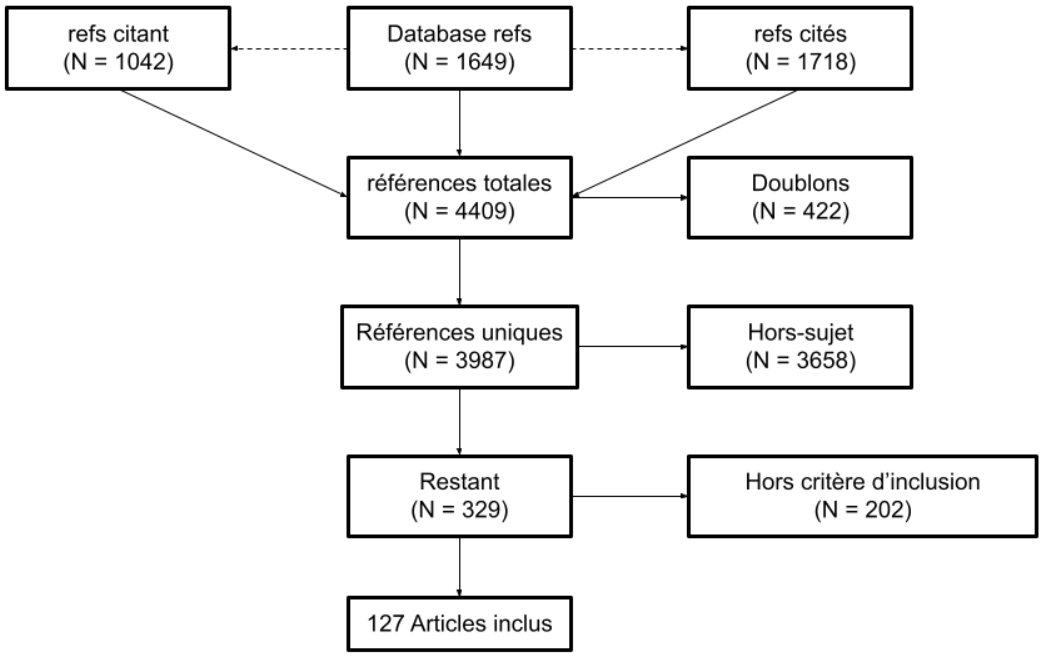


Figure 2 Recherche et sélection des études

La qualité des 127 articles sélectionnés a été évaluée à l'aide de notre échelle d'évaluation de la qualité décrite dans la section ***Méthodes***. Bien que la plupart des articles soient de qualité suffisante d'un point de vue méthodologique et statistique, une définition et/ou une mesure correcte de l'exposition fait souvent défaut. Par conséquent, il est difficile d'estimer la fiabilité de la dose/exposition à laquelle les organismes modèles ont été soumis. Ainsi, dans les études rapportant des réponses aux doses, il est possible d'évaluer la direction d'un effet, mais il est difficile de comparer l'exposition brute entre les études.

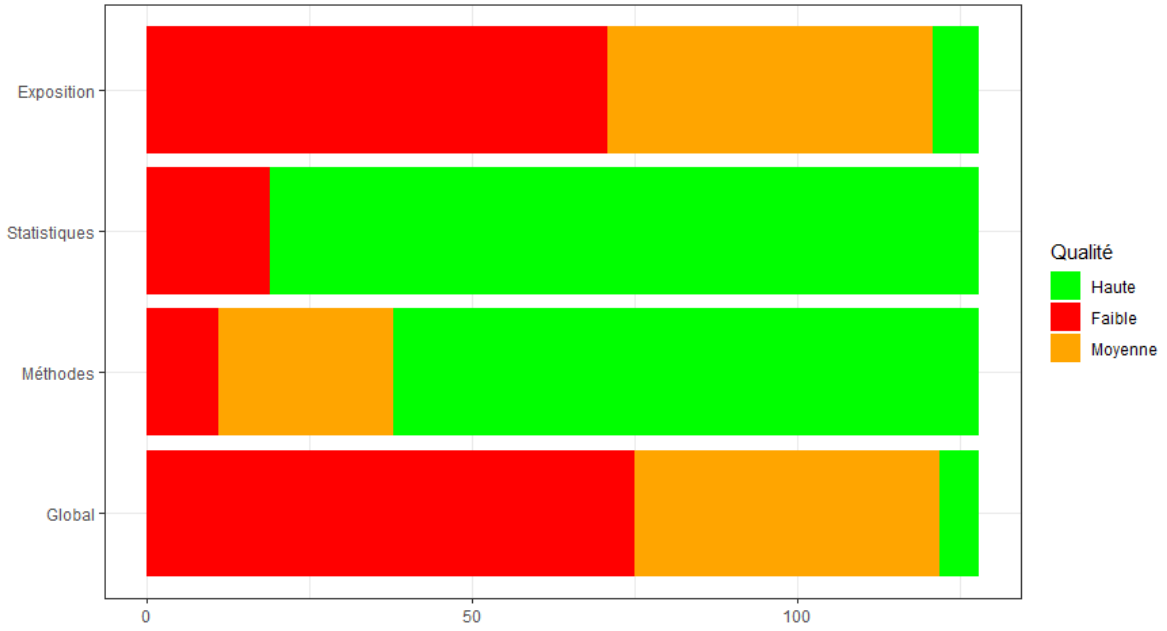


Figure 3 Distribution de la qualité des domaines de chaque étude. Les barres indiquent la répartition de la qualité des domaines selon les études. Environ 60% des études ont un design expérimental imparfait menant à une qualité faible du domaine « exposition ».

Dans l'ensemble, la plupart des études (75/127) ont été classées dans la catégorie de confiance "faible". 47 ont une qualité moyenne, et six une qualité haute. Seule une étude de qualité suffisante (non notées « faible ») a rapporté des effets sur des fréquences supérieures à 6 GHz. [20]

Tableau 2 Nombre d'études par gamme de fréquences et classement par qualité. La somme globale est supérieure au nombre total d'études car certaines études couvrent plus d'une gamme de fréquences.

	Indice de confiance globale			
Fréquence	Faible	Moyen	Haut	**Total**
0 Hz - 100 kHz	43	28	5	**76**
100 kHz – 6 GHz	26	20	1	**47**
6 GHz – 300 GHz	8	1	0	**9**
Total	77	49	6	**132**

Effets sur les arthropodes

Les 127 études sélectionnées portent sur plus d'une quarantaine d'espèces. Le nombre exact est indéterminée car certaines études ne rapportent que des données vagues type « Honey bee », ou « wild pollinators ». L'ordre le plus étudié est les diptères, du fait de l'utilisation de *Drosophila melanogaster* comme animal modèle. Les Hyménoptères sont le deuxième groupe le plus étudié du fait de nombreuses études sur les abeilles et polinisateurs.

Tableau 3 Nombre d'études par type d'arthropode et par gamme de fréquence de RNI

Classe	Ordre	Famille	Organisme	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	0 Hz - 100 kHz	Subtotaux
Malacostraca	Amphipoda	Pontogeneiidae	*Gondogeneia antarctica*	1	0	0	
		total		**1**	**0**	**0**	**1**
	Isopoda	Porcellionidae	*Porcellio laevis*	0	0	1	
		total		**0**	**0**	**1**	**1**
	total			**1**	**0**	**1**	**2**
Arachnida	Amblypygi	Phrynidae	*Paraphrynus laevifrons*	1	0	0	
		total		**1**	**0**	**0**	**1**
	Araneae	Araneidae	*Araneus diadematus*	0	1	0	
		total		**0**	**1**	**0**	**1**
	total			**0**	**2**	**0**	**2**
Collembola	Poduromorpha	Isotomidae	*Folsomia candida*	1	0	0	
		total		**1**	**0**	**0**	**1**
	total			**1**	**0**	**0**	**1**
Insecta	Blattodea	Blaberidae	*Blaptica dubia*	0	0	1	
		Ectobiidae	*Blattella germanica*	0	0	1	
		Blattidae	*Periplaneta americana*	1	0	4	
		Rhinotermitidae	*Coptotermes formosanus*	1	0	0	
			Heterotermes indicola	0	0	1	
		total		**10**	**4**	**10**	**24**
	Coleoptera	Cerambycidae	*Morimus funereus*	0	0	4	
		Chrysomelidae	*Caryedon gonagra*	1	0	0	
		Tenebrionidae	*Tenebrio sp.*	0	0	1	
			Tenebrio molitor	1	1	2	
		total		**2**	**1**	**7**	**10**
	Diptera	Calliphoridae	*Calliphora sp.*	0	0	1	
		Culicidae	*Aedes aegypti*	1	1	0	
		Drosophilidae	*Drosophila melanogaster*	19	4	13	

Classe	Ordre	Famille	Organisme	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	0 Hz - 100 kHz	Subtotaux
			Drosophila melanogaster (Strain Oregon-R)	0	1	2	
			Drosophila sp.	3	0	3	
			Drosophila subobscura	0	0	3	
			Drosophila virilis	1	0	0	
		Muscidae	*Musca domestica*	0	0	2	
		total		**24**	**6**	**24**	**54**
	Hemiptera	Anthocoridae	*Orius laevigatus*	1	0	0	
		Aphididae	*Sitobion avenae*	0	0	1	
		Cicadellidae	*Nephotettix virescens*	0	0	1	
		Delphacidae	*Nilaparvata lugens*	0	0	1	
		Pyrrhocoridae	*Pyrrhocoris apterus*	1	0	0	
		total		**2**	**0**	**3**	**5**
	Hymenoptera	Apidae	*Apis mellifera*	6	0	8	
			Apis mellifica carnica	0	0	1	
			bee	1	0	2	
			honey bee queen	1	0	0	
		Braconidae	*Asobara japonica*	1	0	0	
		Formicidae	*Formicidae sp.*	2	0	0	
			Ectatomma brunneum	0	0	1	
			Myrmica sabuleti	2	0	0	
			Pachycondyla villosa subsp. inversa	0	0	1	
			Pheidole sp.	0	0	1	
			Solenopsis sp.	0	0	1	
		Vespidae	*Vespa orientalis*	0	0	2	
		total		**13**	**0**	**17**	**30**
	Ixodida	Ixodidae	*Dermacentor reticulatus*	1	0	0	
			Ixodes ricinus	0	1	0	
		total		**1**	**1**	**0**	**2**
	Lepidoptera	Erebidae	*Lymantria dispar*	0	0	2	
		Noctuidae	*Helicoverpa armigera*	1	0	0	
			Spodoptera litura	0	0	1	
			Trichoplusia ni	0	0	1	
		Pyralidae	*Ephestia kuehniella*	0	0	1	
		total		**1**	**0**	**5**	**6**
	Orthoptera	Acrididae	*Schistocerca gregaria*	0	0	2	

Classe	Ordre	Famille	Organisme	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	0 Hz - 100 kHz	Subtotaux
		total		**0**	**0**	**2**	**2**
	Phasmida	Phasmatidae	*Medauroidea extradentata*	0	0	1	
		total		**0**	**0**	**1**	**1**
	NA	NA	Insecta sp.	0	0	2	
	NA	NA	Insecta sp. (stream dwelling)	0	0	1	
	NA	NA	Insecta sp. (wild pollinators)	1	0	0	
	total			**53**	**12**	**69**	**134**

Les études sélectionnées ont étudié des effets dans 13 catégories :

- Survie et mortalité (14 études)
- Reproduction (35)
- Dégradation de l'ADN (17)
- Comportement (33)
- Cycle circadien (2)
- Capacité de vol (5)
- Recherche et accumulation de nourriture (6)
- Orientation (11)
- Effet sur les fonctions corporelles et le métabolisme général (10)
- Effet thermique (2)
- Vitesse (13)
- Stress cellulaire (14)
- Population (4)

La plupart des articles rapportent des effets sur le taux de reproduction et sur le comportement général. Moins d'études sont réalisées au niveau cellulaire, excepté pour les études évaluant la dégradation de l'ADN ou les biomarqueurs de stress. Pour chacune des études, nous avons indiqué si l'exposition expérimentale était supérieure ou inférieure aux limites d'immissions (limites de l'ICNIRP reprises par l'ORNI comme valeurs limites d'immissions).

Dans la section suivante, les résultats sont résumés dans des tableaux dont les en-têtes sont les suivants :

- Ref : référence de l'étude
- Gamme RNI : la gamme de RNI prise en compte dans l'étude
- Dose : l'intensité de l'exposition telle que rapportée par l'étude, soit en termes de champ électrique ou magnétique, soit en termes de DAS, selon ce qui a été rapporté.

- Exposition : si l'exposition utilisée dans l'étude est supérieure ou inférieure valeurs limites. Pour le DAS, le seuil est de 0,4 W/kg pour une exposition du corps entier et de 2 W/kg pour une exposition locale. [21].
- Organisme : le ou les arthropode(s) étudiés
- Effet : l'effet des RNI rapporté par l'étude
- Direction : direction de l'effet (neg : negatif, pos : positif, incl : non concluant). Les termes "négatif" et "positif" font toujours référence à "potentiellement nocif" ou "non nocif" pour l'arthropode. Un effet négatif signalé pour des stress cellulaires signifie donc une augmentation des marqueurs de stress cellulaires, ce qui est potentiellement nocif. Une étude non concluante est une étude pour laquelle le design expérimental n'a pas pu mettre en avant un effet de façon statistique. Cela ne signifie pas forcément que l'effet n'existe pas, mais aussi que la taille d'effet est potentiellement trop faible pour être identifiée avec le design expérimental de l'étude.
- Gamme étendue : la gamme de RNI que couvre l'étude (0 – 100kHZ, 100 kHz – 6 GHz, 6 GHz – 300 GHz)
- Confiance : La confiance dans l'étude, telle que décrit à l'étape 4
- Confiance globale : la confiance pour un effet d'une exposition à la gamme RNI donnée pour le résultat (outcome) considéré.

Survie et mortalité

14 études ont rapporté des effets sur la survie ou la mortalité. Neuf études rapportent des effets négatifs, deux des effets positifs et deux sont non concluantes. La plupart des études portent sur *Drosophila melanogaster*.

Tableau 4 - Effet des RNI sur la survie et la mortalité des arthropodes. Nombre d'études par espèce étudiée et par gamme de fréquence.

Organisme	0 Hz - 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	Total général
Apis mellifera	1	1		2
Apis mellifica carnica	1			1
Drosophila melanogaster	4	2	2	8
Musca domestica	1			1
Tenebrio molitor	1			1
Total général	**8**	**3**	**2**	**13**

Dans la gamme 0 kHz - 100 kHz, la confiance dans l'ensemble des preuves est modérée car il existe des divergences entre les études, certaines (4) montrant un impact négatif de l'exposition RNI sur la survie (augmentation de la mortalité ou diminution de la durée de vie) d'autres (2) montrant un effet positif (augmentation de la durée de vie) [22], [23] et deux étant

non concluantes en raison de résultats incohérents ou non significatifs [24], [25]. De plus, dans cette gamme de fréquence, deux études n'avaient pas défini d'exposition appropriée et une avait une intensité de 7-35 kV/m à 50/60 Hz, ce qui est au-dessus des limites règlementaires en Suisse. Dans cette gamme de fréquence, Ramirez (1983) rapporte une surmortalité relative des larves et pupes de *D. melanogaster* d'environ 20-30% par rapport au groupe contrôle, pour des expositions de plusieurs jours. Un mécanisme possible avancé par l'auteur est la disruption des glycosaminoglycanes par les RNI [26], [27].

De 100 kHz à 300 GHz, il existe des preuves faibles d'un effet négatif de l'exposition au RNI sur la survie (augmentation de la mortalité ou diminution de la durée de vie), rapporté par six études [28]–[33], deux avec des conditions d'exposition supérieures au seuil règlementaire [30], [33] et une avec une exposition non clairement définie [31]. Sudaryadi (2020) [28] rapporte chez *D. melanogaster* une diminution relative de la survie d'environ 30% après 6h d'exposition à de la 4G (exposition mal définie dans l'étude). Darney (2016) rapporte une mortalité d'*Apis mellifera* passant de 7% dans le groupe contrôle à 15% suite à 8h d'exposition pulsée à des fréquences de 13.56 MHz et 868 MHz. Néanmoins dans cette étude l'effet thermique n'est pas pris en compte. Aucun mécanisme n'est avancé pour expliquer cette surmortalité dans ces deux études.

A 35 GHz, Shckorbatov (2007) [32] met en évidence qu'une réduction relative du taux d'éclosion d'environ 20% chez *D. melanogaster* est liée à une augmentation du nombre de mutations létales chez la drosophile. Le nombre de mutation augmente avec l'intensité d'exposition, passant de 10% à 25% entre 0 mW/cm² et 265 mW/cm². Shakina (2011) met en évidence dans un étude de qualité moyenne qu'une réduction relative du taux d'éclosion est liée à une augmentation du nombre de mutations létales chez la drosophile [20]. Voir la table 14 pour plus de détails.

Reproduction

35 études ont rapporté un effet sur la reproduction, de 0 Hz à 36 GHz. 28études rapportent des effets négatifs, deux des effet positifs et cinq sont non concluantes. La majorité des études porte sur *Drosophila melanogaster*. Le détail complet des stades de développement étudiés est indiqué dans la table 15.

Tableau 5 Effet des RNI sur la reproduction des arthropodes. Nombre d'études par espèce étudiée et par gamme de fréquences.

Organisme	0 Hz - 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	Total général
Apis mellifera		2		2
Blaptica dubia	1			1
Droso Oregon-R	1			1
Drosophila melanogaster	5	13	2	20
Drosophila virili		1		1
Drosophila oregon			1	1
Drosophila sp.	1	1		2
Asobara japonica		1		1
Orius laevigatus,		1		1
Folsomia candida		1		1
Heterotermes indicola	1			1
honey bee queen		1		1
Rhyzopertha dominica	1			1
Spodoptera litura	1			1
Tenebrio molitor			2	2
Trichoplusia ni	1			1
Total général	**12**	**21**	**5**	**38**

Deux études ont rapporté un effet positif sur la reproduction. Sheiman (2003) [34] a rapporté que de faibles EMF (36 GHz, 100 µW/cm²) ont stimulé la pupaison et la mue de *Tenebrio molitor*, mais nous n'avons aucune information sur la viabilité des individus matures. De plus, cette étude est de qualité faible et les tailles d'effet ne sont pas rapportés. Weisbrot (2003) [35] a rapporté une augmentation relative d'environ 20% de la progéniture de *D. melanogaster* exposé sous 900-1900 MHz, 20-63 V/m, mais comme cette augmentation est associée à une augmentation des marqueurs de stress cellulaire (HSP70, etc.), nous ne pouvons pas exclure que cette augmentation de la progéniture soit une conséquence du stress cellulaire et non un effet bénéfique de l'exposition au RNI. Les auteurs suggèrent d'ailleurs que l'augmentation est probablement due à une augmentation de l'oviposition et pas à une augmentation du succès d'éclosion, mais ces données ne sont pas rapportées dans l'étude.

De 0 à 6 GHz, 14 études avec une confiance moyenne ont rapporté des effets négatifs, principalement une diminution du ratio d'éclosion des œufs et une diminution de la masse corporelle des nymphes (pupes). Odemer (2019) rapporte ainsi une réduction relative de 44% du taux d'éclosion des futures reines d'*Apis mellifera* suite à une exposition des œufs à 900 MHz, 0.005–5 V/m [36]. Ces effets sont parfois associés à une dégradation de l'ADN [37]–[39]. Une diminution de 18% de la taille des ovaires a été ainsi rapportée chez des spécimen de *Drosophila melanogaster* dont les œufs avaient été exposés à 900 MHz, 17 V/m, conjointement à une augmentation de la dégradation d'ADN [38]. Sur la base de ces résultats,

les auteurs suggèrent que l'exposition au RNI dans leur dispositif expérimental induit une dégradation de l'ADN dans les œufs, qui prétérite le succès reproductif. L'effet du RNI sur la reproduction est établi de façon assez clair, avec un haut degré de confiance du fait de la concordance de nombreuses études, et semble associé à une dégradation de l'ADN et à une augmentation des processus apoptotiques [40]. Un mécanisme avancé par Lee (2008) est la perturbation de la mitose par le biais de la voie MAPK dont l'activation suite à une exposition à 835 MHZ (SAR 4.0 W/kg) a été mise en avant [30]. Cette perturbation de la mitose se traduit aussi par la dégradation du cytosquelette d'actine [37]. Il est à noter que la plupart des études de cette gamme de fréquence (16/30) ont testé des expositions inférieures aux seuils règlementaires.

La confiance modérée pour un effet au-dessus de 6 GHz est principalement due au manque d'études disponibles de bonne qualité. Voir la table 3 pour les références et les détails des expositions et effets.

Dégradation de l'ADN

17 études ont examiné la dégradation de l'ADN associée à l'exposition aux RNI, de 0 Hz à 36,6 GHz. 13 rapportent des effets négatifs et quatre sont non concluantes, alors qu'elles testaient une exposition supérieure au seuil règlementaire actuel [41]–[44]. L'organisme le plus étudié est encore une fois *Drosophila melanogaster.*

Tableau 6 Effet des RNI sur la dégradation de l'ADN chez les arthropodes. Nombre d'études par espèce étudiée et par gamme de fréquences.

Organisme	0 Hz - 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	Total général
Apis mellifera		1		1
Drosophila melanogaster	3	6	3	12
Drosophila sp.		2		2
Ephestia kuehniella	1			1
Trichoplusia ni	1			1
Total général	**5**	**9**	**3**	**17**

Ici, la "dégradation de l'ADN" fait référence à tout dommage signalé sur l'ADN. Les preuves sont modérées pour les fréquences inférieures à 100 kHz, avec quatre articles sur cinq testant une exposition supérieure aux limites règlementaires. La confiance dans les preuves est haute entre 100 kHZ et 6 GHz. Deux articles anciens, bien menés [42], [43] ne sont pas concluants en ce qui concerne les dommages à l'ADN causés par le RNI entre 27 MHz et 3 GHz, bien qu'ils aient testé une exposition bien supérieure aux limites règlementaires (SAR > 100 W/kg). Cependant, deux études [20], [32] ont signalé une augmentation de la mutabilité sous une exposition autour de 35 GHz. Voir la table 16 pour les références et les détails.

Comportement

33 études ont rapporté un effet des RNI sur le comportement des arthropodes. 28 études rapportent un effet négatif, aucune des effet positifs et cinq sont non concluantes. Les abeilles et les frelons sont étudiés dans huit études sur 33, suivis par *Drosophila melanogaster* qui est toujours un organisme modèle.

Tableau 7 Effet des RNI sur le comportement des arthropodes. Nombre d'études par espèce étudiée et par gamme de fréquences.

Organisme	0 Hz - 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	Total général
Acromyrmex octospinosus	1			1
Aedes Aegypti		1	1	2
Apis mellifera	3	3		6
Apis mellifera carnica	1			1
Araneus diadematus			1	1
Caryedon gonagra		1		1
Pyrrhocoris apterus		1		1
Coptotermes formosanus		1		1
Dermacentor reticulatus		1		1
Drosophila melanogaster	2	1		3
Drosophila oregon	1			1
Drosophila sp., Calliphora sp.	1			1
Ixodes ricinus		1		1
Morimus funereus	1			1
Musca domestica	1			
Myrmica sabuleti		3		3
Ophiogomphus colubrinus	1			1
Periplaneta americana	1			1
Schistocerca gregaria	1			1
Spodoptera litura	1			1
Tenebrio	1			1
Trichoplusia ni	1			1
Vespa orientalis	2			2
Total général	**19**	**13**	**2**	**34**

Principalement, on observe une réduction de la vitesse de déplacement et une perte d'orientation qui peuvent probablement être attribuées à une perturbation de la boussole interne des arthropodes par le RNI. Dans certaines études, les individus s'échappent de la zone irradiée, en raison de la chaleur induite par le RNI [45], [46]. Inversement, l'attraction des tiques par les zones exposées au RNI est également rapportée par deux études de confiance faible [47], [48]. Parfois, le changement de comportement est associé à des biomarqueurs de stress [49].

La confiance dans les preuves d'un effet négatif du RNI sur le comportement, principalement l'orientation et la vitesse, est globalement modérée, sauf au-dessus de 6 GHz où l'on manque d'études de qualité. Dans cette gamme, seules trois études ont été trouvées, dont deux sans exposition définie de façon appropriée [31], [50] et une avec une exposition supérieure aux limites règlementaires (jusqu'à 10 mW/cm²) [51]. Les effets comportementaux peuvent être préjudiciables en termes de recherche de nourriture et donc de maintien de la population. Par exemple, une étude a rapporté que le rythme de la danse des abeilles était modifié par l'exposition au RNI [23], sans toutefois préciser les valeurs d'exposition. Etant donné que les abeilles utilisent la danse pour signaler leur source de nourriture, les conséquences en cascade d'un tel effet peuvent être importantes. Voir la table 17 pour les références et les détails.

Rythme circadien

Seules deux études [52], [53] ont rapporté un effet du RNI sur le rythme circadien, à chaque fois négatif, mais la configuration de l'exposition n'est pas clairement définie dans ces études, et semble dépasser les limites règlementaires dans Bartos 2019 [52]. L'exposition est simplement désignée comme "RF large bande" sans autre indication dans Bartos et comme SMF dans Fedele (2014) [53], sans indication d'exposition. Le niveau de preuve d'un tel effet est donc faible. Fedele (2014) a en réalité étudié l'effet du SMF sur la géotaxie de la drosophile en mesurant l'expression du cryptochrome. Il indique que le cryptochrome est un élément essentiel de l'horloge circadienne et soutient que son étude indique un effet du SMF sur l'horloge circadienne. Ces études portent respectivement sur *Blatella germanica* et sur une espèce de drosophile indéterminée.

Capacité de vol

Seules cinq études ont rapporté un effet du RNI sur la capacité de vol des arthropodes, et pour aucune d'entre elles, la fréquence d'exposition était supérieure à 100 kHz. Une étude [54] a rapporté que *Schistocerca gregaria* a tendance à synchroniser la vitesse de ses ailes avec le RNI émis, autour de 50 Hz. Sur les 5 études, une seule, de confiance moyenne, présentait une exposition inférieure aux limites règlementaires [55], mais testait en fait l'absence de champ géomagnétique. A une fréquence plus élevée, il n'y a pas de preuve, en raison du manque de publication, d'un quelconque effet du RNI sur la capacité de vol des arthropodes. Voir la table 18 pour les références et les détails. La confiance globale pour ce corpus de preuve de dans la gamme 0 – 100 kHz est moyenne.

Tableau 8 Effet des RNI sur la capacité de vol des arthropodes. Nombre d'études par espèce étudiée et par gamme de fréquences.

Organisme	0 Hz - 100 kHz	Total général
Apis mellifera	1	1
Drosophila melanogaster	1	1
insects	1	1
Nephotettix virescens	1	1
Schistocerca gregaria	1	1
Total général	**5**	**5**

Recherche et accumulation de nourriture

Six études ont rapporté un effet du RNI sur la prise alimentaire des arthropodes. Toutes rapportent un effet négatif.

Tableau 9 Effet des RNI sur la recherche et l'accumulation de nourriture des arthropodes. Nombre d'études par espèce étudiée et par gamme de fréquences.

Organisme	0 Hz - 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	Total général
Apis mellifera	2	2	4
Pheidole sp.	1		1
Neoponera inversa	1		1
Ectatomma brunneum	1		1
Myrmica sabuleti		1	1
Total général	**5**	**3**	**8**

Une des études a montré qu'un champ magnétique statique (60 µT) réduit la capacité de recherche de nourriture des fourmis [56]**.** Néanmoins, les auteurs précisent qu'ils ne peuvent pas exclure que les fourmis soient stressées par le dispositif expérimental lui-même plutôt que par le champ généré. Cette hypothèse n'a pas été correctement testée dans leur étude. La deuxième étude [57] a rapporté que les fourmis exposées à 925 MHz-960 MHz étaient incapables de retourner à la source de nourriture. Le troisième article [58] rapporte un effet inhibiteur de l'émission de 2,4 GHz (routeur wifi) sur l'excitabilité alimentaire d'A*pis mellifera*, mais l'article souffre de lacunes (exposition peu claire, effectifs faibles dans le plan d'expérimentation) et la confiance associée est modérée. Une quatrième étude [59] rapporte une absence de production de miel dans des conditions d'exposition, mais l'étude souffre de problèmes méthodologiques majeurs (les auteurs ont placé deux téléphones portables dans une ruche, pas de mesure de l'exposition). La cinquième étude [60] a montré que plus une source de nourriture est exposée, moins elle est atteinte par les abeilles. La dernière étude montre une altération de la mobilité associée à la prise de nourriture chez les abeilles [61]. La

preuve d'un quelconque impact du RNI sur l'accumulation de nourriture ou le butinage est modérée et nécessite des études supplémentaires.

Orientation

11 études ont rapporté un effet du RNI sur l'orientation des arthropodes, aucune d'entre elles au-dessus de 6 GHz. 10 rapportent un effet négatif, et une étude n'est pas concluante à ce sujet [62].

Tableau 10 Effet des RNI sur l'orientation des arthropodes. Nombre d'études par espèce étudiée et par gamme de fréquences.

Organisme	0 Hz - 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	Total général
Apis mellifera	3	1	4
Drosophila melanogaster	1		1
Gondogeneia antarctica		1	1
Myrmica sabuleti		2	2
Nilaparvata lugens	1		1
Paraphrynus laevifrons		1	1
Pieridae	1		1
Solenopsis sp.	1		1
Total général	**7**	**5**	**12**

L'effet du RNI sur l'orientation a été partiellement discuté dans la section "comportement", qui est plus large. Cette section recouvre la *capacité* à s'orienter des arthropodes. De 0 à 100 kHz, six études ont examiné la réponse de l'orientation à une perturbation ou une absence du champ géomagnétique [63]–[68], mettant en lumière la magnétoréception des arthropodes. Concrètement, le RNI perturbe la magnétoréception chez les arthropodes et par ce truchement perturbe leur capacité à s'orienter, ce qui peut par ailleurs avoir un impact sur la recherche de nourriture, comme mentionné dans la section appropriée. Le niveau de preuve d'un impact du RNI jusqu'à une fréquence de 6 GHz est élevé. En particulier, sept des neuf études ont testé une exposition inférieure aux limites légales, et deux n'ont pas fourni suffisamment d'informations sur l'exposition. Par exemple, une étude, de confiance moyenne, a signalé que l'exposition à 925 MHz jusqu'à 1,5 V/m était associée à l'incapacité des fourmis à retourner à la fourmilière [69]. En comparaison, les limites règlementaires d'intensité pour cette fréquence sont de 42 V/m. Voir la table 19 pour les références et les détails.

Effet sur les fonctions corporelles et le métabolisme général

Dix études ont rapporté un effet du RNI sur le métabolisme des arthropodes, en dehors du stress oxydatif et des biomarqueurs de stress qui sont traités séparément. Sept études ont rapporté un effet négatif, deux un effet positif, et une est non concluante. Neuf études

concernent la gamme 0 – 100 kHz, une étude la gamme 100 kHz – 6 GHz. Aucune étude n'a été trouvée au-dessus de 6 GHz.

Tableau 11 Effet des RNI sur le métabolisme général des arthropodes. Nombre d'études par espèce étudiée et par gamme de fréquences.

Étiquettes de lignes	0 Hz - 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	Total général
Apis mellifera	1		1
Drosophila melanogaster		1	1
Drosophila mel oregon	1		1
Isopoda Porcellio laevis	1		1
Lymantria dispar	2		2
Morimus funereus	1		1
Paravespula vulgaris	1		1
Periplaneta americana	1		1
Sitobion avenae	1		1
Total général	**9**	**1**	**10**

Les effets sont variés, allant d'une diminution du taux métabolique [70], à une réduction de l'efficacité du venin de scorpion chez des cafards (*P. americana*) exposés à 50 Hz [71]. Cependant, l'étude de Luo rapporte une exposition de 4-kV/cm avec un champ électrostatique, ce qui est bien supérieur à ce que l'on trouve dans l'environnement. En fait, trois études ont rapporté des effets (réduction du taux métabolique [70], réduction de la consommation d'O_2 [72], réduction de la théhalase lymphatique [73]) suite à une exposition à un champ magnétique statique et, bien que les champs magnétiques statiques ne soient pas vraiment des rayonnements, ils représentent pour partie quand même la composante magnétique des champs électromagnétiques, bien que non oscillante, et nous les avons inclus. Bien que des effets sur le métabolisme sont rapportés par plusieurs études de qualité moyenne, les effets exacts et les conditions d'expositions impliquées ne sont pas toujours clairs. Voir la table 20 pour les références et les détails.

Effet thermique

L'effet thermique du RNI sur les insectes a été étudié dans le cadre de la recherche agricole, comme moyen de chauffage pour désinfecter des aliments stockés, notamment les céréales et les fruits. Les expositions utilisées dans ces contextes sont équivalentes au chauffage des aliments dans un four à micro-ondes à 27 MHz à une puissance de 1 kW et ciblent un chauffage sélectif pour tuer les insectes (voir [74] par exemple) ou pour chasser les insectes [45] sans cuire les aliment stockés. Voir Yadav (2014) [75] pour une revue sur ce sujet. Nous avons choisi d'exclure ces études du corps de cette revue systématique comme expliqué dans la partie **Méthodes**.

Deux études ont rapporté un effet thermique sur les arthropodes [76], [77]. Cependant, elles utilisent une exposition supérieure aux limites légales, les paramètres d'exposition étant respectivement de 135-314 V/m pour les fréquences comprises entre 915 MHz et 2450 MHz, et un DAS de 13-208 W/kg à 5,95 GHz

Cet effet thermique est très étudié dans le contexte de lutte contre les ravageurs. L'effet thermique est une conséquence du chauffage diélectrique qui est dû au mouvement des ions sous RF et par la rotation dipolaire, qui est la rotation des molécules polaires sous RF [78]. Cet échauffement diélectrique dépend des propriétés physiques des éléments exposés, ici les arthropodes et les aliments stockés [79]–[81]. L'échauffement est directement lié au DAS, dont l'intensité est proportionnelle à la conductivité et à la densité du tissu exposé [82], [83]. En se basant sur les différentes propriétés des aliments stockés et des arthropodes, les chercheurs cherchent à optimiser le chauffage différentiel, ou chauffage sélectif, c'est-à-dire l'utilisation de RF à une fréquence et une intensité données qui chaufferont les arthropodes mais pas les aliments stockés. Par conséquent, certaines études ont tenté de modéliser les propriétés diélectriques des arthropodes [15], [84]–[86].

Une étude de modélisation indique qu'une augmentation relativement faible de 10 % de la densité de puissance incidente à des fréquences allant de moins de 3 GHz à des fréquences plus élevées entraînera une augmentation relative de la puissance absorbée d'un facteur supérieur à 3 [84], mais les résultats sont préliminaires. Cela signifie que pour l'utilisation des futures fréquences de la 5G (>6 GHz), il serait nécessaire d'évaluer les seuils d'effet thermique pour les arthropodes, qui pourraient être inférieurs à ceux définis pour les humains et les mammifères. Une autre étude de modélisation, appuyée par des expérimentations, a déterminé que 6 secondes d'exposition à 10,2 GHz pour un PFD de 0,37-0,38 mW/cm² était suffisant pour tuer les insectes au stade larvaire et diminuer le ration d’émergence de pupes [87].

Dans de nombreuses études sélectionnées dans cette revue, la température n'est pas contrôlée ou n'est pas mesurée, et on ne sait souvent pas si les effets du RNI de haute fréquence observés sur le comportement, les fonctions corporelles, le stress cellulaire, etc. sont dus à l'échauffement diélectrique ou non. Ainsi, les études prétendant étudier les effets non thermiques des RNI-HF doivent être prudentes et contrôler et analyser l'augmentation de la température comme facteur confondant. Les études dans lesquelles un téléphone mobile est placé très près des arthropodes doivent prendre en compte le fait qu'un téléphone mobile actif n'est pas seulement une source de RNI-HF mais aussi un corps chaud du fait de la batterie et que dans les conditions de contrôle, le dispositif mobile ou le mannequin doit avoir la même température.

Par exemple, une étude a examiné la réponse aux RNI en contrôlant l'augmentation de température dans le groupe témoin [49]. Cette étude a montré que des expositions à des basses fréquences (50 Hz, 7mT, au-dessus des seuils réglementaires suisses) ont provoqué une augmentation de la synthèse des Heat Shock Proteins (Hsp) - une réaction physiologique de stress thermique - chez les criquets. Dans ce dispositif expérimental, l'effet de la température a été ajusté dans le groupe témoin pour concorder avec l'augmentation de température dans le groupe exposé, et la fréquence des RNI (50 Hz) est considérée comme bien inférieure au niveau considéré comme ayant un effet thermique (100 kHz). Cela indique un possible effet thermique au niveau cellulaire, suffisant pour induire des réponses métaboliques, mais cela demeure très hypothétique. Cependant, le protocole expérimental utilisé dans cette étude ne permet pas de dire à 100% que la Hsp70 exprimée reflète un stress thermique, car cette protéine intervient dans d'autres réponses également.

Vitesse

13 études ont rapporté un effet du RNI sur la vitesse de déplacement des arthropodes. Neuf études rapportent un effet négatif, deux des effets positifs et deux sont non concluantes. Dix ont rapporté un effet dans la gamme 0-100 kHz, et trois entre 100 kHz et 6 GHz. Aucune étude n'a rapporté d'effet au-dessus de 6 GHz.

Tableau 12 Effet des RNI sur la vitesse des arthropodes. Nombre d'études par espèce étudiée et par gamme de fréquences.

Organisme	0 Hz - 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	Total général
Apis mellifera	1		1
Apis mellifera carnica	1		1
Blaptica dubia	1		1
Drosophila melanogaster		1	1
Drosophila subobscura	2		2
Morimus funereus	2		2
Myrmica sabuleti		1	1
Periplaneta americana	2	1	3
Schistocerca gregaria	1		1
Total général	**10**	**3**	**13**

Dans l'ensemble, les études font état d'une diminution de l'activité motrice avec l'exposition. Le degré de confiance de l'ensemble des preuves de cet effet est élevé jusqu'à 6 GHz et nul au-delà. Vácha (2009) [88] indique que la réduction de la locomotion est probablement due à la perturbation de la magnétoréception induite par les RNI. Voir la table 21 pour les références et les détails.

Stress cellulaire

14 études ont rapporté que le RNI induit un stress cellulaire. Ce stress est mesuré par exemple en ciblant la signalisation MAPK [30], les activités superoxyde dismutase ou catalase [89]. La confiance dans un tel effet est haute jusqu'à 100 kHz, et faible entre 100 kHz et 6 GHz. Il n'y a pas de preuve au-dessus de 6 GHz. L'effet est très clair jusqu'à 100 kHz puisque cinq études d'assez bonne qualité ont présenté des effets survenant à des expositions inférieures aux limites légales actuelles [89]–[92].

Tableau 13 Effet des RNI sur le stress cellulaire des arthropodes. Nombre d'études par espèce étudiée et par gamme de fréquences.

Étiquettes de lignes	0 Hz - 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	Total général
Apis mellifera	2		2
Baculum extradentatum	1		1
bee	1	1	2
Drosophila melanogaster	3	1	4
Drosophila sp.	1		1
Drosophila subobscura	1		1
Nilaparvata lugens	1		1
Periplaneta americana	1		1
Schistocerca gregaria	1		1
Total général	**12**	**2**	**14**

D'autres biomarqueurs de stress sont rapportés jusqu'à 100 KHz, tels que Hsp70/Hsp26 [49], [90], mais il est difficile d'évaluer quelle partie de cette réponse est due au stress thermique plutôt qu'aux RNI. Par exemple, une élévation de température et une exposition à 50 Hz semblent produire une réponse Hsp synergique dans Zhang et al [90]. Ceci est cohérent avec les observations de Michel (1999) [91]. Il est intéressant de noter que le même schéma synergique sur l'expression des biomarqueurs est décrit dans l'exposition conjointe aux pesticides et au RNI [92]. Voir la table 22 pour les références et les détails.

Population

Quatre articles ont étudié l'effet du RNI sur les populations d'arthropodes du sol. Une rapporte des effets négatifs, et trois sont non concluantes. On considère ici le terme « population » au sens écologique du terme, c'est-à-dire l'ensemble des individus d'une espèce qui habitent un même milieu, un même endroit. Une étude a examiné les effets à long terme (plusieurs années) des ELF sur les populations d'arthropodes du sol [93] dans un contexte environnemental réel et n'a pu mettre en évidence aucun effet. La seconde étude s'est concentrée sur l'effet du RNI sur une plage de fréquences allant de 800 MHz à 2600 MHz sur

la population d'abeilles mais a trouvé des résultats contrastés selon les espèces : augmentation de la population chez les abeilles domestiques, diminution de la population chez les scarabées, aucun changement chez les abeilles sauvages [94]. Les deux dernières études souffrent de lacunes méthodologiques au niveau des conditions d'exposition [59], [95]. Globalement, Il y a un niveau de preuve faible d'une absence d'effet des RNI de 0 Hz à 100 kHz sur les populations, et une d'un effet négatif des RNI de 100 kHz à 6 Ghz.

Echelle de l'écosystème

Nous n'avons pas identifié de publications investiguant les conséquences de l'effet des RNI sur les arthropodes sur les écosystèmes. Ces conséquences sont traitées dans la discussion.

Synthèse des résultats

Globalement, de nombreuses études ont été menées pour évaluer les effets du RNI sur les arthropodes (76 de 0 Hz à 100 kHz, 47 de 100 kHz à 6 GHz), mais seules quelques études (neuf) sont disponibles pour les fréquences au-dessus de 6 GHz. Au-dessus de 6 GHz, il y a peu de preuves d'un quelconque effet en raison du manque d'études de qualité dans cet intervalle de fréquences. Lorsque cela est testé, la magnitude de l'effet augmente avec l'intensité de l'exposition, par exemple dans Panagopoulos 2007 [96] .

Les informations récapitulatives sont présentées dans la figure 4. Les niveaux de confiance reflètent la fiabilité de l'observation, peu importe que l'effet soit négatif, positif, ou qu'il n'y ait pas d'effet. Une confiance haute dans une absence d'effet signifiera donc qu'il est très probable que cette absence d'effet soit réelle. Dans la pratique, tous les effets rapportés ici sont négatifs, à l'exception de l'effet des RNI entre 0-100 kHz sur les populations, ou la confiance est attribuée à une absence d'effet. La signification des niveaux de confiance est la suivante :

- Haute: Confiance élevée dans l'association entre l'exposition au RNI et le résultat. Il est très probable que l'effet observé par les études soit le reflet de l'effet réel.
- Moyenne: Confiance moyenne dans l'association entre l'exposition au RNI et le résultat observé. L'effet observé est peut-être le reflet de l'effet réel.
- Faible: Faible confiance dans l'association entre l'exposition au RNI et le résultat. Les études ne permettent pas de dire si l'effet observé correspond à l'effet réel.

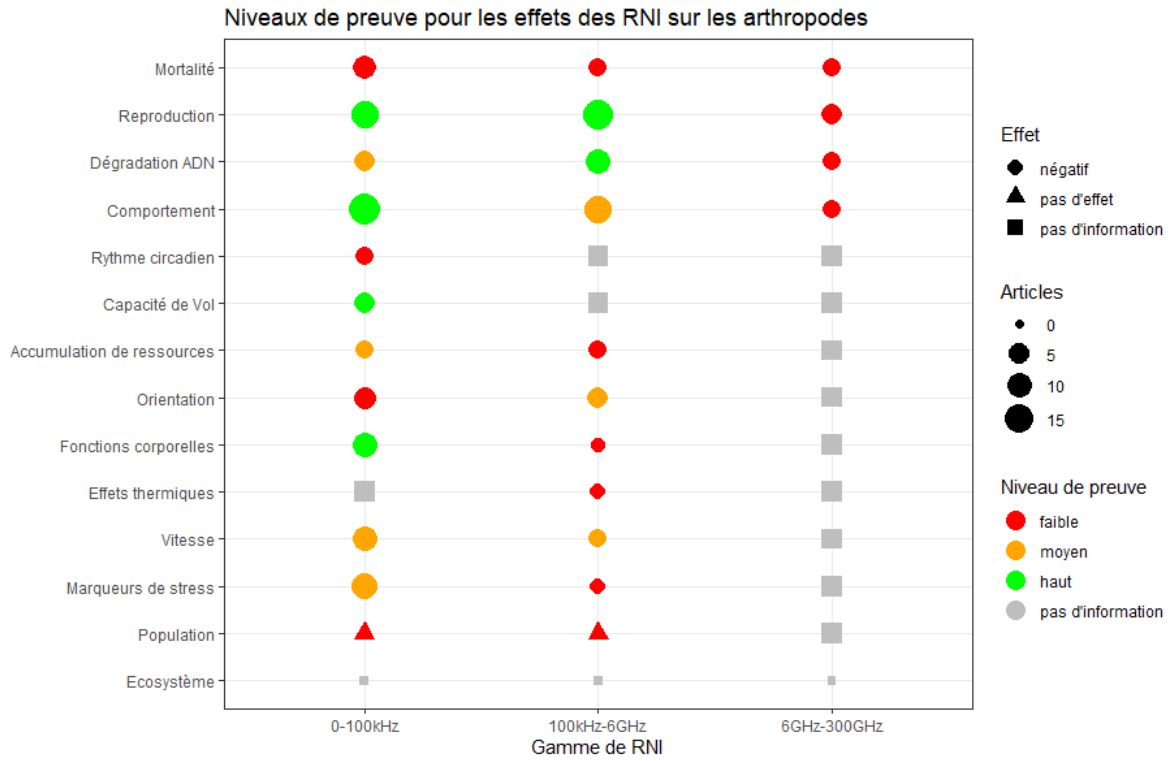


Figure 4 Niveau de confiance dans le corpus de preuve des effets des RNI à différentes gammes de fréquences. Tous les effets rapportés sont négatifs, à l'exception de l'effet des RNI entre 0 et 100kHz pour la population. Cet effet est marqué par un triangle.

Les effets du RNI ont été identifiés avec un niveau de confiance acceptable (au moins moyenne) pour la locomotion, la reproduction, la recherche de nourriture, l'orientation, la dégradation de l'ADN, les stress cellulaires, le comportement et diverses fonctions corporelles pour les fréquences allant jusqu'à 6 GHz. De 0 à 100 kHz, il y a un haut niveau de preuve pour un effet négatif des RNI sur la reproduction, les fonctions corporelles, le comportement et la capacité de vol. de 100 kHz à 6 GHz, il y a un haut niveau de preuve pour un effet négatif des RNI sur la reproduction et la dégradation de l'ADN. Il n'y a aucun niveau de preuve haute pour un effet du RNI sur les arthropodes au-dessus de 6 GHz. Le faible niveau de preuve pour un effet et une gamme de fréquence donnée est associé à un manque d'études de bonne qualité disponible. Cela signifie que, même s'il n'y a pas de preuve actuelle d'un certain effet à une certaine fréquence, cela ne constitue pas une preuve d'absence de cet effet. Au-dessus de 6 GHz, les études sont rares et il est presque impossible de tirer une quelconque conclusion concernant les effets du RNI à cette gamme de fréquences.

Un aspect important des résultats présentés ici est que tous les effets qui ont été identifiés avec un niveau de confiance approprié (moyen ou haut) ont été parfois également observés à des niveaux d'exposition inférieurs aux seuils règlementaires, bien que les expositions utilisées dans les différentes études ne reflètent pas nécessairement les conditions d'expositions environnementales réelles (voir ci-dessous).

Discussion

Comparaison avec les revues existantes

La revue la plus récente et la plus exhaustive sur l'effet de la 5G et plus généralement du RNI sur les organismes vivants (vertébrés non humains, invertébrés et plantes) a été publiée en 2021 pour le service de recherche du Parlement européen [9]**.** Cette revue est exhaustive mais manque d'une évaluation de la qualité des études. Elle rapporte un effet thermique des RNI sur les arthropodes, mais nous avons vu que ces études ne permettent pas de conclure sur un effet thermique aux expositions environnementales actuelles du fait de la différence d'ordre de grandeur entre les expositions expérimentales dans ces études et les expositions environnementales réelles. L'effet du chauffage diélectrique des RF sur les invertébrés à des fréquences < 6 GHz qui est rapporté dans le rapport du Parlement Européen est appuyé par des études visant le contrôle des nuisibles, avec des niveaux d'exposition élevés, qui utilisent le chauffage sélectif comme expliqué dans la section consacrée à l'effet thermique. Pour les fréquences supérieures à 6 GHz, la conclusion de cette revue est que les preuves sont faibles en raison du manque d'études sur les niveaux d'exposition environnementale.

Une revue dans laquelle une évaluation de la qualité des études a été réalisée a été publiée à la suite du projet EKLIPSE [7]**.** Cette étude se concentre sur les pollinisateurs et, bien que le processus d'évaluation de la qualité ne soit pas clair, les preuves des effets du RNI sur les pollinisateurs sont faibles, en raison d'un manque d'études disponibles. La conclusion générale de la revue du projet EKLIPSE est qu'il n'y a pas d'effet bien établi d'une quelconque gamme de fréquences pour les pollinisateurs. Comme notre rapport actuel englobe tous les arthropodes, notre corpus d'articles est un peu plus large et la qualité des preuves légèrement meilleure du fait d'un plus grand corpus.

Notre revue met en évidence que l'effet du RNI sur les arthropodes a été démontré jusqu'à 6 GHz avec un bon degré de confiance sur la reproduction, la locomotion, le comportement, la recherche de nourriture et la dégradation de l'ADN. Il est important de noter que la plupart de ces effets ont été mesurés et observés à des intensités inférieures aux seuils règlementaires définis par l'ICNIRP. Même si la qualité des études individuelles n'est souvent pas suffisante pour tirer des conclusions solides sur un effet particulier, le fait d'avoir des résultats concordants venant de différentes études provenant de différents groupes de recherche avec différents protocoles permet d'avoir une vraisemblance élevée sur la réalité de tels effets. Cela devrait inciter à conduire d'autres études pour clarifier les effets du RNI. En particulier, il est important de créer des designs expérimentaux où les facteurs confondants sont contrôlés de

manière fine afin de pouvoir précisément mesurer l'effet du RNI sur le critère d'évaluation étudié.

Quels mécanismes d'action des RNI dans les perturbations comportementales ?

Les mécanismes d'action des RNI sur les perturbations comportementales sont peu claires, et les différentes études proposent rarement d'explications physiologiques. Les effets comportementaux observés concernaient le rythme circadien, l'orientation, la vitesse de déplacement, la capacité de vol et la recherche et accumulation de nourriture. L'effet des RNI sur l'orientation très vraisemblablement dû à d'une perturbation du sens géomagnétique impliquée dans l'orientation.

Une autre piste (facteur ou paramètre) biologiquement pertinente pourrait être une perturbation des canaux calciques dépendants du voltage (CCDV) ou d'autres ions. Ces canaux sont impliqués dans de très nombreux processus physiologiques [97], surtout au niveau neuronal. L'effet du RNI sur ces canaux n'est pas bien étudié chez les arthropodes mais quelques études sont disponibles chez des vertébrés, et la structure des canaux calciques diffèrent peu entre ces groupes taxonomiques [98].

Quelques travaux existent, dont trois revues systématiques ciblant des études *in vitro* et *in vivo* investiguant l'effet des basses fréquences sur les canaux calciques [99]–[101] . Ces revues systématiques sont divergentes dans leurs conclusions. Wood and Karipidis (2020) [100] arguent qu'une exposition aigüe nécessite des intensités supérieures de plusieurs ordre de grandeurs aux seuils règlementaires pour affecter les canaux calciques, mais montrent qu'une exposition chronique à des intensités plus faible est liée à une perturbation des canaux calciques. Même si la littérature est peu abondante à ce sujet concernant les arthropodes, l'hypothèse des canaux calciques est évoquée parfois dans les études sélectionnées pour ce rapport. Par exemple, Jankowska (2015) pose l'hypothèse que la baisse d'efficacité du venin de scorpion sur le système nerveux des arthropodes exposés à du RNI basse fréquence est due à une perturbation de l'homéostasie calcique qui perturbe les canaux potassiques dépendant du calcium [71], [102], [103].

L'avancée la plus récente dans ce domaine a été réalisée par Bertagna et al. (2022) qui ont pu identifier un transporteur de Ca^{2+} sensible aux NIR dans une culture cellulaire in vitro HEK 293 impliquée dans l'homéostasie calcique [99]. Les effets NIR sur le l'homéostasie calcique sont aussi utilisée pour des fin thérapeutiques [104]. Nous pensons donc que l'hypothèse des canaux calciques (et possiblement d'autres canaux ioniques) et de l'homéostasie calcique est

une voie pertinente à suivre dans la compréhension des réactions physiologiques induites par l'exposition au RNI, pas seulement pour les vertébrés mais aussi pour les arthropodes.

Difficulté d'avoir un design expérimental solide simulant une exposition environnementale réelle

Le faible niveau de preuve associé à l'effet du RNI dans les différentes catégories est principalement dû à de mauvaises installations expérimentales, à des résultats contradictoires ou à l'absence d'études. Dans un chapitre de livre Panagopoulos et Margaritis expliquent que les incohérences et les discordances entre les expériences en laboratoire sont probablement dues à la pollution électromagnétique au sein de chaque laboratoire, en raison de la présence d'appareils et de fils électriques [105]. Ils soulignent la nécessité d'une méthodologie robuste. Certaines études protègent leur dispositif expérimental avec une cage de Faraday, mais parfois cette cage est ouverte d'un côté (ex [29]). De plus, les facteurs confondants sont rarement pris en compte et il est souvent impossible d'exclure que les effets observés soient dus à la température, à la manipulation, etc. La température, par exemple, n'est pas toujours mesurée et, lorsqu'elle l'est, son effet n'est évalué que dans peu d'études. Vanbergen [7] est arrivé à la même conclusion en écrivant : « Il est important que la qualité scientifique globale des études s'améliore si nous voulons obtenir une image réaliste du niveau de risque [106]. Les études futures doivent être fondées sur des hypothèses, sur un cadre théorique solide qui permette de prédire de manière vérifiable les résultats des expériences ou des études. Une bonne conception de l'étude est évidemment essentielle, mais semble être négligée dans de nombreux cas. » [7].

La plupart des études sont réalisées en laboratoire et les conditions d'exposition testées sont souvent différentes des conditions environnementales. En laboratoire, l'exposition est constante, de durée fixe et d'intensité plutôt élevée. Dans une configuration réaliste, l'exposition est variable en intensité et en durée à cause de la nature fluctuante des émissions de RNI anthropiques [107], [108] et du comportement des arthropodes. Les arthropodes volants rencontreront différents niveaux d'exposition au cours d'un vol et éviteront peut-être les sources de RNI fortes (par exemple [109]). Pour les arthropodes du sol, la situation est encore plus complexe car l'effet de protection du sol n'est pas clair. Cependant, il existe des preuves que le sol atténue les signaux électromagnétiques en fonction de sa structure et de sa teneur en eau [110]–[112].

Enfin, il faut noter que les espèces étudiées présentent un biais de sélection conséquent : les espèces modèles en laboratoires ont été sélectionnées au fil du temps pour leur facilité d'élevage et leur relative robustesse. Il est donc possible que les effets du RNI soient

davantage marqués chez des arthropodes vulnérables, qui sont par nature non étudiés en laboratoire car trop difficile à élever.

Fiabilité de l'évaluation des effets des RNI et des dangers associés

En raison des différences entre l'exposition en laboratoire et l'exposition sur le terrain, même si certains effets sont évalués dans cette revue avec un niveau de confiance correct (c'est-à-dire au minimum moyen), il est difficile de tirer des conclusions sur l'occurrence et la sévérité de ces effets en milieu naturel. Les conséquences d'une possible future utilisation de nouvelles bandes de fréquences pour la téléphonie mobile , en particulier dans les gammes d'ondes millimétriques, sont encore plus compliquées à anticiper : en fonction de la densité du réseau, les niveaux d'exposition peuvent éventuellement être inférieurs aux niveaux actuels, même si la littérature est encore rare à ce sujet [113]–[115]**.** De plus, les RNI lorsqu'ils sont émis subissent une diffraction dont l'intensité dépend de la longueur d'onde [116]. Du fait de ce mécanisme, plus la longueur d'onde est faible, moins les ondes voyagent loin. Ainsi, les effets potentiels des ondes millimétriques sont davantage à attendre autour des émetteurs, avec un impact possiblement mineur sur la faune plus éloignée.

Il est clair qu'il existe des effets à différents niveaux qui peuvent être observés et mesurés chez les arthropodes tant au niveau de l'organisme qu'au niveau cellulaire. Ces effets devraient entraîner des conséquences sur les populations d'arthropodes, mais les quelques études *in situ* ne montre pas d'effets du RNI sur les populations. Rappelons ici que l'absence de preuve d'un effet n'équivaut pas à la preuve d'une absence d'effet, et que d'autres études de terrain devraient être menées.

Cependant, un aspect important est que les marqueurs cellulaires de stress sont plus présents lorsque l'exposition aux RNI est combinée à un autre facteur de stress. Le stress thermique est ainsi amplifié par les RNI à basse fréquence [117], et c'est un élément que nous devrions prendre en compte dans les scénarios du GIEC [118], où le réchauffement climatique en cours ajoute progressivement une source de stress thermique [119], [120].

Risque pour les populations d'arthropodes

Le RNI anthropique représente une menace potentielle pour les populations d'arthropodes car il affecte la valeur sélective (fitness), la reproduction et le comportement des individus. Bien qu'il soit très improbable que le RNI entraîne l'extinction d'une espèce au niveau régional, le RNI pourrait affecter l'abondance des espèces et donc la taille des populations, les rendant

plus vulnérables à l'extinction. D'autant plus que des interactions ou effets synergétiques avec d'autres facteurs comme les pesticides et fragmentation des habitats sont possibles [117], et pourraient conduire des populations déjà menacées à s'éteindre localement.

Les 4 études sur la population ne permettent pour l'heure pas de conclure à un effet du RNI sur les populations. Deux scénarios sont possibles : 1) les valeurs d'exposition environnementales actuelles ne causent pas d'effet suffisamment important pour impacter les populations 2) les quelques études existantes n'ont pas une conception (exposition, etc.) permettant d'identifier les effets sur les populations. Il est vraisemblable que nous soyons dans une combinaison de ces deux scénarii, avec d'une part des effets réels faibles sur la population, et d'autre part des études ne permettant pas de mettre en évidence ces effets. Il est donc important de concevoir et de mener des études de bonne qualité pour investiguer l'impact du RNI sur les populations d'arthropodes.

Cependant, dans l'hypothèse où les expositions environnementales aux RNI ont un certain effet néfaste sur la réduction de la taille des populations d'espèces d'arthropodes, le risque d'extinction locale augmente et les RNI pourraient donc contribuer au déclin actuel de l'abondance et de la biomasse des insectes, en combinaison avec d'autres facteurs, tels que l'intensification de l'agriculture (dépôts d'azote, pesticides), la fragmentation de l'habitat et le changement climatique (voir par exemple [121]–[130]). A l'heure actuelle cependant, ces effets n'ont pu être mis en évidence.

Au sein des populations, tous les individus ne sont pas forcément affectés de la même manière. Il a été démontré que les RNI affectent les individus en fonction de leur stade de développement, de leur sensibilité écologique (liée aux préférences en matière d'habitat) et de leur sexe, en laboratoire (cf la partie ***Résultats***). On peut donc s'attendre à des changements dans la structure des populations (démographie, sex-ratio) et des communautés si de tels effets existent de manière constante dans les conditions d'exposition environnementale. Ce risque n'est pas clair, en raison du manque de preuves et de connaissances sur l'effet des RNI sur les arthropodes, notamment en termes de dose/exposition et de mécanismes d'action.

Risque sur les écosystèmes

Les changements induits par les RNI au niveau des individus et des populations se traduisent probablement par des modifications de la structure des communautés, des interactions entre espèces et des réseaux trophiques. Ces changements peuvent à leur tour modifier le fonctionnement des écosystèmes. Par exemple, les effets non aléatoires sur les pollinisateurs du RNI anthropique ont été rapportés (ce qui correspond à nos résultats), avec des effets

probables sur l'abondance et la diversité, mais aussi sur la pollinisation en tant que processus important de l'écosystème [7], y compris aux basses fréquences. En outre, il a été démontré que le déclin des insectes est un facteur important du déclin des oiseaux insectivores [131], [132]. Là encore, les preuves et les connaissances limitées des effets du RNI sur les populations ne permettent pas d'évaluer la menace que représente le RNI pour les écosystèmes.

Eléments-clés

- Globalement, à l'heure actuelle, il n'y a pas encore de réponses formelles et précises aux questions abordées dans cette revue. Il existe un certain degré de preuves pour des effets spécifiques, qui montre une nécessité d'approfondir l'investigation des effets possibles des RNI sur les insectes et les arthropodes. En particulier, il y a un manque de littérature dans la gamme au-dessus de 6 GHz. En outre, l'impact des effets potentiels du RNI sur la biodiversité et les écosystèmes dans leur ensemble doit être examiné plus avant afin d'évaluer la pertinence globale des effets observés à différents niveaux, c'est-à-dire au niveau cellulaire, des individus et des populations dans différents environnements et régions.
- Il est nécessaire de développer un cadre expérimental solide avec des conditions d'exposition fiables. Ensuite, il est crucial de prendre en compte les facteurs de confusion, afin de notamment distinguer les effets thermiques des effets non thermiques. Il est important également de mener des études pour évaluer l'effet des ondes millimétriques sur les arthropodes. Quelques études rigoureuses sur le plan expérimental permettraient de lever assez rapidement le doute sur la nature et la magnitude de ces effets.
- Les effets sur la mortalité, la vitesse, la reproduction, l'orientation, la recherche de nourriture, la capacité de vol, la dégradation de l'ADN, l'horloge circadienne, les stress cellulaires, les fonctions corporelles et le comportement ont été documentés (avec une confiance variable) jusqu'à 6 GHz. Les conditions d'exposition pour que de tels effets apparaissent ne sont pas claires mais des effets ont été observés en dessous des limites légales d'immissions telles que définies par l'ORNI. Les effets à plus large échelle (population, écosystème), sont inconnus. La plupart des études ont été réalisées sur des diptères, qui ne représentent pas l'entièreté des arthropodes. Il est donc nécessaire de mener sur d'autres espèces, potentiellement plus vulnérable ou dont la la disparition induirait de forts désordres écologiques (keystone species) [133]. En plus de la fréquence et de l'intensité du RNI, l'effet devrait être investigué en fonction de l'espèce.

- Si les impacts des RNI devaient s’avérer importants et généralisés, nous pourrions nous attendre à une perte de biodiversité et à une perturbation des écosystèmes. Cependant, le niveau de preuve et de connaissance de l'effet des RNI nous empêche de conclure davantage. Les RNI ont clairement des effets sublétaux sur les arthropodes, que ce soit au niveau cellulaire ou au niveau des organismes, mais il est difficile de traduire ces effets en termes de menaces pour la biodiversité ou pour les écosystèmes, car les arthropodes peuvent avoir des mécanismes d'adaptation comportementale, qui pourraient contrebalancer l’effet de l’expositions au RNI en conditions réelles.
- On ignore si l'utilisation des ondes millimétriques représente une menace supplémentaire pour les arthropodes du fait du manque trop peu d'études à cette gamme de fréquences (> 6 GHz). Néanmoins, une étude montre que l’énergie absorbée par les arthropodes dépend de la fréquence du RNI, et que cette absorption est plus importante dans les hautes fréquences (10 GHz) [84], [87]. Ainsi, même si les études expérimentales disponibles sont insuffisantes pour conclure à un impact accru des ondes millimétriques, cette hypothèse n’est pas exclue et doit être évaluée par des études expérimentales, d’absorption et de dosimétrie.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Thibault Fiolet pour son aide et ses conseils concernant les recommandations de l'OHAT, Mathieu Rebeaud et Anthony Guilhur pour leur aide concernant les stress cellulaires, et Claire Le Bayon pour ses conseils concernant les arthropodes du sol

Financement

Ce projet est financé par l’Ofev, contrat 19.0094.PJ / 628D05CDE.

References

[1] T. Saliev, D. Begimbetova, A.-R. Masoud, et B. Matkarimov, « Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin », *Prog. Biophys. Mol. Biol.*, vol. 141, p. 25-36, janv. 2019, doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2018.07.009.

[2] Académie Suisse des Sciences, « Disparition des insectes en Suisse et conséquences éventuelles pour la société et l'économie ». 2019.

[3] F. Sánchez-Bayo et K. A. G. Wyckhuys, « Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers », *Biol. Conserv.*, vol. 232, p. 8-27, avr. 2019, doi: 10.1016/j.biocon.2019.01.020.

[4] Widmer, Ivo *et al.*, « Insektenvielfalt in der Schweiz: Bedeutung, Trends, Handlungsoptionen », Zenodo, sept. 2021. doi: 10.5281/ZENODO.5144739.

[5] BERENIS, « Nouvelles directives ICNIRP dans le domaine des hautes fréquences (ICNIRP 2020) ».

[6] S. Cucurachi, W. L. M. Tamis, M. G. Vijver, W. J. G. M. Peijnenburg, J. F. B. Bolte, et G. R. de Snoo, « A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF) », *Environ. Int.*, vol. 51, p. 116-140, janv. 2013, doi: 10.1016/j.envint.2012.10.009.

[7] A. J. Vanbergen, S. G. Potts, A. Vian, E. P. Malkemper, J. Young, et T. Tscheulin, « Risk to pollinators from anthropogenic electro-magnetic radiation (EMR): Evidence and knowledge gaps », *Sci. Total Environ.*, vol. 695, p. 133833, déc. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133833.

[8] E. P. Malkemper, T. Tscheulin, A. J. Vanbergen, A. Vian, E. Balian, et L. Goudeseune, « The impacts of artificial Electromagnetic Radiation on wildlife (flora and fauna). Current knowledge overview: a background document to the web conference », 2018.

[9] European Parliament. Directorate General for Parliamentary Research Services., *Environmental impact of 5G: a literature review of effects of radio frequency electromagnetic field exposure of non human vertebrates, invertebrates and plan.* LU: Publications Office, 2021. Consulté le: 29 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://data.europa.eu/doi/10.2861/318352

[10] A. A. Rooney, A. L. Boyles, M. S. Wolfe, J. R. Bucher, et K. A. Thayer, « Systematic Review and Evidence Integration for Literature-Based Environmental Health Science Assessments », *Environ. Health Perspect.*, vol. 122, nº 7, p. 711-718, juill. 2014, doi: 10.1289/ehp.1307972.

[11] C. R. Hooijmans, M. M. Rovers, R. B. de Vries, M. Leenaars, M. Ritskes-Hoitinga, et M. W. Langendam, « SYRCLE's risk of bias tool for animal studies », *BMC Med. Res. Methodol.*, vol. 14, nº 1, p. 43, déc. 2014, doi: 10.1186/1471-2288-14-43.

[12] C. Wang, W. Zhang, Y. Zou, R. Meng, J. Zhao, et M. Wei, « A Sub-100 mg Electromagnetically Driven Insect-inspired Flapping-wing Micro Robot Capable of Liftoff and Control Torques Modulation », *J. Bionic Eng.*, vol. 17, nº 6, p. 1085-1095, nov. 2020, doi: 10.1007/s42235-020-0103-7.

[13] Y. Zhou, W. Wei, L. Zhu, Y. Li, et Z. Li, « Synthesis and insecticidal activity study of novel anthranilic diamides analogs containing a diacylhydrazine bridge as effective Ca^{2+} modulators », *Chem. Biol. Drug Des.*, vol. 92, nº 5, p. 1914-1919, nov. 2018, doi: 10.1111/cbdd.13349.

[14] C. García-Mosqueda, A. Cerón garcía, M. D. Salas Araiza, et M. E. Sosa morales, « Radiofrequency heating as an effective alternative for postharvest disinfestation: A review for dry foods », *Vitae*, vol. 23, p. S46-S50, 2016.

[15] R. J. Macana et O. D. Baik, « Disinfestation of insect pests in stored agricultural materials using microwave and radio frequency heating: A review », *Food Rev. Int.*, vol. 34, nº 5, p. 483-510, août 2017, doi: 10.1080/87559129.2017.1359840.

[16] X. Song, B. Ma, X. Kou, R. Li, et S. Wang, « Developing radio frequency heating treatments to control insects in mung beans », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 88, p. 101651, sept. 2020, doi: 10.1016/j.jspr.2020.101651.
[17] S. Wang, J. Tang, T. Sun, E. J. Mitcham, T. Koral, et S. L. Birla, « Considerations in design of commercial radio frequency treatments for postharvest pest control in in-shell walnuts », *J. Food Eng.*, vol. 77, nº 2, p. 304-312, nov. 2006, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.06.037.
[18] R. Sadeghi, R. M. Moghaddam, et E. Seyedabadi, « Microwave Use in the Control of Ephestia kuehniella (Lepidoptera: Pyralidae) in Dried Fig and Raisin and Effects on Fruit Sensory Characteristics », *J. Econ. Entomol.*, vol. 111, nº 3, p. 1177--1179, 2018.
[19] I. A. Ponomaryova, L. N. De Rivera Y Oyarzabal, et E. R. Sánchez, « Interaction of radio-frequency, high-strength electric fieldswith harmful insects », *J. Microw. Power Electromagn. Energy*, vol. 43, nº 4, p. 43417-43427, 2009.
[20] L. Shakina, V. Pasiuga, O. Dumin, r, et Y. Shckorbatov, « Effects of microwaves on the puffing pattern of D. melanogaster », *Open Life Sci.*, vol. 6, nº 4, p. 524--530, 2011.
[21] ICNIRP, « Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz) », *Health Phys.*, vol. 118, nº 5, p. 483-524, mai 2020, doi: 10.1097/HP.0000000000001210.
[22] V. Stanojević, Z. Prolić, T. Savić, D. Todorović, et B. Janać, « Effects of Extremely Low Frequency (50 Hz) Magnetic Field on Development Dynamics of the Housefly (*Musca domestica* L.) », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 24, nº 2, p. 99-107, janv. 2005, doi: 10.1080/15368370500205464.
[23] H. Martin, H. Korall, et B. Forster, « Magnetic field effects on activity and ageing in honeybees », *J. Comp. Physiol. A*, vol. 164, nº 4, p. 423-431, 1989, doi: 10.1007/bf00610436.
[24] D. Todorović *et al.*, « The influence of static magnetic field (50 mT) on development and motor behaviour of *Tenebrio* (Insecta, Coleoptera) », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 89, nº 1, p. 44-50, janv. 2013, doi: 10.3109/09553002.2012.715786.
[25] H. Kawasaki, H. Okano, T. Nedachi, Y. Nakagawa-Yagi, A. Hara, et N. Ishida, « Effects of a 50-Hz electric field on sleep quality and life span mediated by ultraviolet ({UV})-A/blue light photoreceptor {CRYPTOCHROME} in Drosophila melanogaster », 2020, Consulté le: 1 janvier 9apr. J.-C. [En ligne]. Disponible sur: https://doi.org/10.1101%2F2020.09.23.310862
[26] E. Ramirez, J. L. Monteagudo, M. Garcia-Gracia, et J. M. R. Delgado, « Oviposition and development of Drosophila modified by magnetic fields », *Bioelectromagnetics*, vol. 4, nº 4, p. 315-326, 1983.
[27] J. M. Delgado, J. Leal, J. L. Monteagudo, et M. G. Gracia, « Embryological changes induced by weak, extremely low frequency electromagnetic fields. », *J. Anat.*, vol. 134, nº Pt 3, p. 533-551, mai 1982.
[28] I. Sudaryadi, A. N. Rahmawati, et M. Rizqiyah, « Effect of handphone EMF radiation on survival rate and morphological reproductive organ changes of fruit fly (Drosophila melanogaster Meigen, 1830) », 2020. doi: 10.1063/5.0015846.
[29] K. Darney *et al.*, « Effect of high-frequency radiations on survival of the honeybee (Apis mellifera L.) », *Apidologie*, vol. 47, nº 5, p. 703-710, déc. 2015, doi: 10.1007/s13592-015-0421-7.
[30] K.-S. Lee, J.-S. Choi, S.-Y. Hong, T.-H. Son, et K. Yu, « Mobile phone electromagnetic radiation activates {MAPK} signaling and regulates viability {inDrosophila} », *Bioelectromagnetics*, vol. 29, nº 5, p. 371--379, 2008.
[31] S. E. El Kholy et E. M. El Husseiny, « Effect of 60 minutes exposure to electromagnetic field on fecundity, learning and memory, speed of movement and whole body protein of the fruit fly Drosophila melanogaster. », *J. Egypt. Soc. Parasitol.*, vol. 42, nº 3, p. 639-648, 2012.
[32] Y. Shckorbatov *et al.*, « Drosophila melanogaster viability and mutability under the influence of low energy microwave monochromatic and ultra wideband impulse field -

2007 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques », 2007, Consulté le: 1 janvier 9apr. J.-C. [En ligne]. Disponible sur: https://doi.org/10.1109%2Ficatt.2007.4425188

[33] A. Yanagawa, K. Kashimura, T. Mitani, N. Shinohara, et T. Yoshimura, « Influence of Powerful Microwaves on the Termite Coptotermes Formosanus-Impact of Powerful Microwaves on Insects », in *Processing and Properties of Advanced Ceramics and Composites VI: Ceramic Transactions*, vol. 249, Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Uji, 611-0011, Japan, 2014, p. 367-374. [En ligne]. Disponible sur: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84927798148&doi=10.1002%2f9781118995433.ch36&partnerID=40&md5=494916cd67222f551684bc40c01da238

[34] I. M. Sheiman et M. F. Shkutin, « Effect of weak electromagnetic radiation on larval development and metamorphosis of the yellow mealworm beetle Tenebrio molitor », *Biophysics*, vol. 48, nº 1, p. 99-104, 2003.

[35] D. Weisbrot, H. Lin, L. Ye, M. Blank, et R. Goodman, « Effects of mobile phone radiation on reproduction and development in Drosophila melanogaster », *J. Cell. Biochem.*, vol. 89, nº 1, p. 48-55, mai 2003, doi: 10.1002/jcb.10480.

[36] R. Odemer et F. Odemer, « Effects of radiofrequency electromagnetic radiation (RF-EMF) on honey bee queen development and mating success », *Sci. Total Environ.*, vol. 661, p. 553-562, avr. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.154.

[37] E. D. Chavdoula, D. J. Panagopoulos, et L. H. Margaritis, « Comparison of biological effects between continuous and intermittent exposure to GSM-900-MHz mobile phone radiation: Detection of apoptotic cell-death features », *Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen.*, vol. 700, nº 1-2, p. 51-61, juill. 2010, doi: 10.1016/j.mrgentox.2010.05.008.

[38] D. J. Panagopoulos, « Effect of Microwave Exposure on the Ovarian Development of Drosophila melanogaster », *Cell Biochem. Biophys.*, vol. 63, nº 2, p. 121-132, févr. 2012, doi: 10.1007/s12013-012-9347-0.

[39] D. J. Panagopoulos, E. D. Chavdoula, I. P. Nezis, et L. H. Margaritis, « Cell death induced by GSM 900-MHz and DCS 1800-MHz mobile telephony radiation », *Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen.*, vol. 626, nº 1-2, p. 69-78, janv. 2007, doi: 10.1016/j.mrgentox.2006.08.008.

[40] J. A. Valadez-Lira *et al.*, « Alterations of Immune Parameters on Trichoplusia ni (Lepidoptera: Noctuidae) Larvae Exposed to Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields », *Environ. Entomol.*, vol. 46, nº 2, p. 376--382, 2017.

[41] J. R. Diebolt, « The influence of electrostatic and magnetic fields on mutation in Drosophila melanogaster spermatozoa », *Mutat. Res. Mol. Mech. Mutagen.*, vol. 57, nº 2, p. 169-174, janv. 1978, doi: 10.1016/0027-5107(78)90264-6.

[42] Y. Hamnerius, Å. Rasmuson, et B. Rasmuson, « Biological effects of high-frequency electromagnetic fields onSalmonella typhimurium andDrosophila melanogaster », *Bioelectromagnetics*, vol. 6, nº 4, p. 405-414, 1985, doi: 10.1002/bem.2250060407.

[43] Y. Hamnerius, H. Olofsson, Å. Rasmuson, et B. Rasmuson, « A negative test for mutagenic action of microwave radiation in Drosophila melanogaster », *Mutat. Res. Toxicol.*, vol. 68, nº 3, p. 217-223, nov. 1979, doi: 10.1016/0165-1218(79)90153-8.

[44] P. G. Kale et J. W. Baum, « Genetic effects of strong magnetic fields in Drosophila melanogaster », *Mutat. Res. Lett.*, vol. 105, nº 1-2, p. 79-83, août 1982, doi: 10.1016/0165-7992(82)90211-1.

[45] M. C. Rosi *et al.*, « Emigration Effects Induced by Radio Frequency Treatment to Dates Infested by Carpophilus hemipterus », *Insects*, vol. 10, nº 9, p. 273, août 2019, doi: 10.3390/insects10090273.

[46] J. ONDRÁČEK, J. ŽDÁREK, V. LANDA, et J. DATLOV, « Importance of antennae for orientation of insects in a non-uniform microwave electromagnetic field », *Nature*, vol. 260, nº 5551, p. 522-523, avr. 1976, doi: 10.1038/260522a0.

[47] M. Frątczak *et al.*, « Infected Ixodes ricinus ticks are attracted by electromagnetic radiation of 900 MHz », *Ticks Tick-Borne Dis.*, vol. 11, nº 4, p. 101416, juill. 2020, doi: 10.1016/j.ttbdis.2020.101416.
[48] B. Vargová *et al.*, « Electromagnetic radiation and behavioural response of ticks: an experimental test », *Exp. Appl. Acarol.*, vol. 75, nº 1, p. 85-95, mai 2018, doi: 10.1007/s10493-018-0253-z.
[49] J. Wyszkowska, S. Shepherd, S. Sharkh, C. W. Jackson, et P. L. Newland, « Exposure to extremely low frequency electromagnetic fields alters the behaviour, physiology and stress protein levels of desert locusts », *Sci. Rep.*, vol. 6, nº 1, nov. 2016, doi: 10.1038/srep36413.
[50] A. H. Poh *et al.*, « Effects of low-powered RF sweep between 0.01-20 GHz on female Aedes Aegypti mosquitoes: A collective behaviour analysis », *PLOS ONE*, vol. 12, nº 6, p. e0178766, juin 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0178766.
[51] C. G. Liddle *et al.*, « Effect of 9.6-{GHz} pulsed microwaves on the orb web spinning ability of the cross spider (Araneus diadematus) », *Bioelectromagnetics*, vol. 7, nº 1, p. 101--105, 1986.
[52] P. Bartos, R. Netusil, P. Slaby, D. Dolezel, T. Ritz, et M. Vacha, « Weak radiofrequency fields affect the insect circadian clock », *J. R. Soc. Interface*, vol. 16, nº 158, p. 20190285, sept. 2019, doi: 10.1098/rsif.2019.0285.
[53] G. Fedele, E. W. Green, E. Rosato, et C. P. Kyriacou, « An electromagnetic field disrupts negative geotaxis in Drosophila via a {CRY}-dependent pathway », *Nat. Commun.*, vol. 5, nº 1, 2014, Consulté le: 1 janvier 7apr. J.-C. [En ligne]. Disponible sur: https://doi.org/10.1038%2Fncomms5391
[54] S. Shepherd, C. W. Jackson, S. M. Sharkh, H. Aonuma, E. E. Oliveira, et P. L. Newland, « Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields Entrain Locust Wingbeats », *Bioelectromagnetics*, vol. 42, nº 4, p. 296-308, avr. 2021, doi: 10.1002/bem.22336.
[55] C. Wan, A. Yao, et L. Van Gool, « Direction matters: hand pose estimation from local surface normals », avr. 2016, Consulté le: 19 avril 2019. [En ligne]. Disponible sur: https://arxiv.org/abs/1604.02657v1
[56] M. C. Pereira, I. de C. Guimarães, D. Acosta-Avalos, et W. F. A. Junior, « Can altered magnetic field affect the foraging behaviour of ants? », *PLOS ONE*, vol. 14, nº 11, p. e0225507, nov. 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0225507.
[57] M.-C. Cammaerts, Z. Rachidi, F. Bellens, et P. D. Doncker, « Food collection and response to pheromones in an ant species exposed to electromagnetic radiation », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 32, nº 3, p. 315-332, janv. 2013, doi: 10.3109/15368378.2012.712877.
[58] N. G. Lopatina, T. G. Zachepilo, N. G. Kamyshev, N. A. Dyuzhikova, et I. N. Serov, « Effect of Non-Ionizing Electromagnetic Radiation on Behavior of the Honeybee, Apis mellifera L. (Hymenoptera, Apidae) », *Entomol. Rev.*, vol. 99, nº 1, p. 24--29, 2019.
[59] V. P. Sharma et N. R. Kumar, « Changes in honeybee behaviour and biology under the influence of cellphone radiations », *Curr. Sci.*, vol. 98, nº 10, p. 1376-1378, 2010.
[60] Y. Erdoğan et M. M. Cengiz, « Effect of Electromagnetic Field (EMF) and Electric Field (EF) on Some Behavior of Honeybees (Apis mellifera L.) », avr. 2019, doi: 10.1101/608182.
[61] V. P. Bindokas, J. R. Gauger, et B. Greenberg, « Laboratory investigations of the electrical characteristics of honey bees and their exposure to intense electric fields », *Bioelectromagnetics*, vol. 10, nº 1, p. 1--12, 1989.
[62] D. D. Wiegmann, P. Casto, E. A. Hebets, et V. P. Bingman, « Distortion of the local magnetic field appears to neither disrupt nocturnal navigation nor cue shelter recognition in the amblypygidParaphrynus laevifrons », *Ethology*, vol. 126, nº 4, p. 403-412, déc. 2019, doi: 10.1111/eth.12985.
[63] G. Wan *et al.*, « Geomagnetic field intensity as a cue for the regulation of insect migration », 2019, Consulté le: 1 janvier 8apr. J.-C. [En ligne]. Disponible sur: https://doi.org/10.1101%2F733782

[64] T. E. Ferrari, « Magnets, magnetic field fluctuations and geomagnetic disturbances impair the homing ability of honey bees (Apis mellifera) », *J. Apic. Res.*, vol. 53, nº 4, p. 452-465, janv. 2014, doi: 10.3896/ibra.1.53.4.15.
[65] R. Wehner et Th. Labhart, « Perception of the geomagnetic field in the {flyDrosophila} melanogaster », *Experientia*, vol. 26, nº 9, p. 967--968, 1970.
[66] D. Acosta-Avalos, A. Pinho, ra Tourinho, J. de Souza Barbosa, et N. Belova, « Alternating Magnetic Fields of 60~Hz Affect Magnetic Orientation and Magnetosensitivity of Fire Ants », *J. Insect Behav.*, vol. 28, nº 6, p. 664--673, 2015.
[67] R. B. Srygley, R. Dudley, E. Oliveira, ro G., et A. J. Riveros, « Experimental evidence for a magnetic sense in Neotropical migrating butterflies (Lepidoptera: Pieridae) », *Anim. Behav.*, vol. 71, nº 1, p. 183--191, 2006.
[68] H. Schiff, « Modulation of spike frequencies by varying the ambient magnetic field and magnetite candidates in bees (Tapis mellifera) », *Comp. Biochem. Physiol. A Physiol.*, vol. 100, nº 4, p. 975--985, 1991.
[69] M.-C. Cammaerts, V, G. A. E. enbosch, et V. Volski, « Effect of Short-Term {GSM} Radiation at Representative Levels in Society on a Biological Model: The Ant Myrmica sabuleti », *J. Insect Behav.*, vol. 27, nº 4, p. 514--526, 2014.
[70] K. Luo *et al.*, « High-voltage electrostatic field-induced oxidative stress: Characterization of the physiological effects in Sitobion avenae (Hemiptera: Aphididae) across multiple generations », *Bioelectromagnetics*, vol. 40, nº 1, p. 52--61, 2018.
[71] M. Jankowska, A. Pawlowska-Mainville, M. Stankiewicz, J. Rogalska, et J. Wyszkowska, « Exposure to 50 Hz electromagnetic field changes the efficiency of the scorpion alpha toxin », *J. Venom. Anim. Toxins Trop. Dis.*, vol. 21, nº 1, sept. 2015, doi: 10.1186/s40409-015-0040-9.
[72] M. R. Martel et M. A. Alikhan, « The effect of magnetic field intensities on the oxygen consumption {inPorcellio} {laevisLatre} (Oniscoidea, Isopoda) », *Arch. Int. Physiol. Biochim.*, vol. 90, nº 2, p. 111--122, 1982.
[73] J. Kefuss, K. M{\textquotesingle}Diaye, M. Bounias, J. Vanpoucke, et J. Ecochard, « Biochemical effects of high intensity constant magnetic fields on worker honey bees », *Bioelectromagnetics*, vol. 20, nº 2, p. 117--122, 1999.
[74] D. Yu, B. Shrestha, et O.-D. Baik, « Thermal death kinetics of adult red flour beetle Tribolium castaneum (Herbst) in canola seeds during radio frequency heating », *Int. J. Food Prop.*, vol. 20, nº 12, p. 3064-3075, avr. 2017, doi: 10.1080/10942912.2016.1272609.
[75] D. N. Yadav, T. Anand, M. Sharma, et R. K. Gupta, « Microwave technology for disinfestation of cereals and pulses: An overview », *J. Food Sci. Technol.*, vol. 51, nº 12, p. 3568-3576, déc. 2014, doi: 10.1007/s13197-012-0912-8.
[76] S. V. Gaikwad et A. N. Gaikwad, « RF and microwave low power dielectric heating using parallel plate applicator to control insect pests on tomato plant », *Prog. Electromagn. Res. M*, vol. 49, p. 81-89, 2016.
[77] R. G. Olsen, « Constant-dose microwave irradiation of insect pupae », *Radio Sci.*, vol. 17, nº 5S, p. 145S-148S, sept. 1982, doi: 10.1029/rs017i05sp0145s.
[78] P. Piyasena, C. Dussault, T. Koutchma, H. S. Ramaswamy, et G. B. Awuah, « Radio Frequency Heating of Foods: Principles, Applications and Related Properties—A Review », *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 43, nº 6, p. 587-606, oct. 2003, doi: 10.1080/10408690390251129.
[79] S. Wang *et al.*, « Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as related to Radio Frequency and Microwave Treatments », *Biosyst. Eng.*, vol. 85, nº 2, p. 201-212, juin 2003, doi: 10.1016/S1537-5110(03)00042-4.
[80] M. R. Hossan et P. Dutta, « Effects of temperature dependent properties in electromagnetic heating », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 55, nº 13-14, p. 3412-3422, juin 2012, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.072.
[81] R. Torrealba-Meléndez, M. E. Sosa-Morales, J. L. Olvera-Cervantes, et A. Corona-Chávez, « Dielectric properties of cereals at frequencies useful for processes with

microwave heating », *J. Food Sci. Technol.*, vol. 52, nº 12, p. 8403-8409, déc. 2015, doi: 10.1007/s13197-015-1948-3.
[82] S. Kodera et A. Hirata, « Comparison of Thermal Response for RF Exposure in Human and Rat Models », *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 15, nº 10, p. 2320, oct. 2018, doi: 10.3390/ijerph15102320.
[83] A. Hirata, S. Kodera, J. Wang, et O. Fujiwara, « Dominant factors influencing whole-body average {SAR} due to far-field exposure in whole-body resonance frequency and {GHz} regions », *Bioelectromagnetics*, vol. 28, nº 6, p. 484--487, 2007.
[84] A. Thielens, M. K. Greco, L. Verloock, L. Martens, et W. Joseph, « Radio-Frequency Electromagnetic Field Exposure of Western Honey Bees », *Sci. Rep.*, vol. 10, nº 1, janv. 2020, doi: 10.1038/s41598-019-56948-0.
[85] Z. Huang, L. Chen, et S. Wang, « Computer simulation of radio frequency selective heating of insects in soybeans », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 90, p. 406-417, nov. 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.071.
[86] S. Wang, J. Tang, R. P. Cavalieri, et D. C. Davis, « DIFFERENTIAL HEATING OF INSECTS IN DRIED NUTS AND FRUITS ASSOCIATED WITH RADIO FREQUENCY AND MICROWAVE TREATMENTS », *Trans. ASAE*, vol. 46, nº 4, 2003, doi: 10.13031/2013.13941.
[87] L. Mykhaylova, A. Ryd, P. Potapski, N. Kosulina, et A. Cherenkov, « Determining the electromagnetic field parameters to kill flies at livestock facilities », *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, vol. 4, nº 5 (94), p. 53-60, juill. 2018, doi: 10.15587/1729-4061.2018.137600.
[88] M. Vácha, T. Půžová, et M. Kvíčalová, « Radio frequency magnetic fields disrupt magnetoreception in American cockroach », *J. Exp. Biol.*, vol. 212, nº 21, p. 3473-3477, 2009.
[89] D. Todorović *et al.*, « Effect of magnetic fields on antioxidative defense and fitness-related traits of Baculum extradentatum (insecta, phasmatodea) », *Bioelectromagnetics*, vol. 33, nº 3, p. 265-273, avr. 2012, doi: 10.1002/bem.20709.
[90] Z.-Y. Zhang *et al.*, « Coupling Mechanism of Electromagnetic Field and Thermal Stress on Drosophila melanogaster », *PLOS ONE*, vol. 11, nº 9, p. e0162675, sept. 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0162675.
[91] A. Michel et H. O. Gutzeit, « Electromagnetic Fields in Combination with Elevated Temperatures Affect Embryogenesis of Drosophila », *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, vol. 265, nº 1, p. 73--78, 1999.
[92] D. Lupi *et al.*, « Effects of Pesticides and Electromagnetic Fields on Honeybees: A Field Study Using Biomarkers », *Int. J. Environ. Res.*, vol. 14, nº 1, p. 107--122, 2020.
[93] B. Greenberg et N. Ash, « Extreme Low Frequency Electromagnetic Fields of Project Sanguine/Seafarer: Effect of Long-term Exposure on Soil Arthropods in Nature », *Environ. Entomol.*, vol. 5, nº 6, p. 1033-1039, déc. 1976, doi: 10.1093/ee/5.6.1033.
[94] A. Lázaro, A. Chroni, T. Tscheulin, J. Devalez, C. Matsoukas, et T. Petanidou, « Electromagnetic radiation of mobile telecommunication antennas affects the abundance and composition of wild pollinators », *J. Insect Conserv.*, vol. 20, nº 2, p. 315-324, avr. 2016, doi: 10.1007/s10841-016-9868-8.
[95] R. J. Stout et M. P. Rondinelli, « Stream-dwelling insects and extremely low frequency electromagnetic fields: a ten-year study », *Hydrobiologia*, vol. 302, nº 3, p. 197-213, avr. 1995, doi: 10.1007/bf00032110.
[96] D. J. Panagopoulos, E. D. Chavdoula, A. Karabarbounis, et L. H. Margaritis, « Comparison of Bioactivity Between GSM 900 MHz and DCS 1800 MHz Mobile Telephony Radiation », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 26, nº 1, p. 33-44, janv. 2007, doi: 10.1080/15368370701205644.
[97] Md. S. Islam, « Calcium Signaling: From Basic to Bedside », in *Calcium Signaling*, vol. 1131, Md. S. Islam, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 1-6. doi: 10.1007/978-3-030-12457-1_1.

[98] Y. Moran, M. G. Barzilai, B. J. Liebeskind, et H. H. Zakon, « Evolution of voltage-gated ion channels at the emergence of Metazoa », *J. Exp. Biol.*, vol. 218, nº 4, p. 515-525, févr. 2015, doi: 10.1242/jeb.110270.
[99] F. Bertagna, R. Lewis, S. R. P. Silva, J. McFadden, et K. Jeevaratnam, « Effects of electromagnetic fields on neuronal ion channels: a systematic review », *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 1499, nº 1, p. 82-103, sept. 2021, doi: 10.1111/nyas.14597.
[100] A. Wood et K. Karipidis, « Radiofrequency Fields and Calcium Movements Into and Out of Cells », *Radiat. Res.*, vol. 195, nº 1, nov. 2020, doi: 10.1667/RADE-20-00101.1.
[101] L. A. Golbach *et al.*, « Calcium homeostasis and low-frequency magnetic and electric field exposure: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies », *Environ. Int.*, vol. 92-93, p. 695-706, juill. 2016, doi: 10.1016/j.envint.2016.01.014.
[102] M. K. Moghadam, M. Firoozabadi, et M. Janahmadi, « Effects of weak environmental magnetic fields on the spontaneous bioelectrical activity of snail neurons », *J. Membr. Biol.*, vol. 240, nº 2, p. 63-71, mars 2011, doi: 10.1007/s00232-011-9344-z.
[103] I. Marchionni *et al.*, « Comparison between low-level 50 Hz and 900 MHz electromagnetic stimulation on single channel ionic currents and on firing frequency in dorsal root ganglion isolated neurons », *Biochim. Biophys. Acta BBA - Biomembr.*, vol. 1758, nº 5, p. 597-605, mai 2006, doi: 10.1016/j.bbamem.2006.03.014.
[104] W. N. Ross, « Understanding calcium waves and sparks in central neurons », *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 13, nº 3, p. 157-168, mars 2012, doi: 10.1038/nrn3168.
[105] D. J. Panagopoulos et L. H. Margaritis, « Mobile telephony radiation effects on living organisms », in *Radiation Exposure in Medicine and the Environment: Risks and Protective Strategies*, Department of Cell Biology and Biophysics, Faculty of Biology, University of Athens, Panepistimiopolis, 15784, Athens, Greece, 2011, p. 185-228. [En ligne]. Disponible sur: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84892009543&partnerID=40&md5=86dbe1e156c8b8a06f8aa529137e09c9
[106] L. Makinistian, D. J. Muehsam, F. Bersani, et I. Belyaev, « Some recommendations for experimental work in magnetobiology, revisited: Recommendations for Magnetobiology Research », *Bioelectromagnetics*, vol. 39, nº 7, p. 556-564, oct. 2018, doi: 10.1002/bem.22144.
[107] W. Joseph, L. Verloock, F. Goeminne, G. Vermeeren, et L. Martens, « Assessment of {RF} Exposures from Emerging Wireless Communication Technologies in Different Environments », *Health Phys.*, vol. 102, nº 2, p. 161--172, 2012.
[108] D. Colombi, B. Thors, et C. Tornevik, « Implications of {EMF} Exposure Limits on Output Power Levels for 5G Devices Above 6~{GHz} », *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, p. 1247--1249, 2015.
[109] C. W. Jackson, E. Hunt, S. Sharkh, et P. L. Newland, « Static electric fields modify the locomotory behaviour of cockroaches », *J. Exp. Biol.*, vol. 214, nº 12, p. 2020-2026, juin 2011, doi: 10.1242/jeb.053470.
[110] L. Li, M. C. Vuran, et I. F. Akyildiz, « Akyildiz, Characteristics of underground channel for wireless underground sensor networks », 2007.
[111] R. L. van Dam, B. Borchers, et J. M. H. Hendrickx, « Methods for prediction of soil dielectric properties: a review », Orlando, Florida, USA, juin 2005, p. 188. doi: 10.1117/12.602868.
[112] X. Yu, P. Wu, Z. Zhang, N. Wang, et W. Han, « ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION IN SOIL FOR WIRELESS UNDERGROUND SENSOR NETWORKS », *Prog. Electromagn. Res. M*, vol. 30, p. 11-23, 2013, doi: 10.2528/PIERM12110609.
[113] P. Joshi, F. Ghasemifard, D. Colombi, et C. Tornevik, « Actual Output Power Levels of User Equipment in 5G Commercial Networks and Implications on Realistic RF EMF Exposure Assessment », *IEEE Access*, vol. 8, p. 204068-204075, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3036977.

[114] B. Selmaoui, P. Mazet, P. Petit, K. Kim, D. Choi, et R. Seze, « Exposure of South Korean Population to 5G Mobile Phone Networks (3.4–3.8 GHz) », *Bioelectromagnetics*, vol. 42, nº 5, p. 407-414, juill. 2021, doi: 10.1002/bem.22345.
[115] S. Aerts *et al.*, « In Situ Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure in a Commercial Network in Bern, Switzerland », *Appl. Sci.*, vol. 11, nº 8, p. 3592, avr. 2021, doi: 10.3390/app11083592.
[116] G. Vorobyov, L. Vietzorreck, I. Barsuk, et A. Rybalko, *The Diffraction of Electromagnetic Waves on the Periodic Heterogeneities and Its Use for Realization of Practical Technical and Electronic Devices of Millimeter and Submillimeter Wavelength Range*. IntechOpen, 2012. doi: 10.5772/50694.
[117] D. Lupi *et al.*, « Combined Effects of Pesticides and Electromagnetic-Fields on Honeybees: Multi-Stress Exposure », *Insects*, vol. 12, nº 8, p. 716, août 2021, doi: 10.3390/insects12080716.
[118] P. Arias *et al.*, « Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group14 I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Technical Summary », 2021.
[119] D. González-Tokman, A. Córdoba-Aguilar, W. Dáttilo, A. Lira-Noriega, R. A. Sánchez-Guillén, et F. Villalobos, « Insect responses to heat: physiological mechanisms, evolution and ecological implications in a warming world », *Biol. Rev.*, vol. 95, nº 3, p. 802-821, juin 2020, doi: 10.1111/brv.12588.
[120] J. G. Kingsolver, S. E. Diamond, et L. B. Buckley, « Heat stress and the fitness consequences of climate change for terrestrial ectotherms », *Funct. Ecol.*, vol. 27, nº 6, p. 1415-1423, déc. 2013, doi: 10.1111/1365-2435.12145.
[121] J. Krauss *et al.*, « Habitat fragmentation causes immediate and time-delayed biodiversity loss at different trophic levels: Immediate and time-delayed biodiversity loss », *Ecol. Lett.*, vol. 13, nº 5, p. 597-605, avr. 2010, doi: 10.1111/j.1461-0248.2010.01457.x.
[122] S. Seibold *et al.*, « Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers », *Nature*, vol. 574, nº 7780, p. 671-674, oct. 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1684-3.
[123] C. A. Hallmann, A. Ssymank, M. Sorg, H. de Kroon, et E. Jongejans, « Insect biomass decline scaled to species diversity: General patterns derived from a hoverfly community », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 118, nº 2, p. e2002554117, janv. 2021, doi: 10.1073/pnas.2002554117.
[124] C. A. Hallmann *et al.*, « More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas », *PLOS ONE*, vol. 12, nº 10, p. e0185809, oct. 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0185809.
[125] A. C. S. Owens, P. Cochard, J. Durrant, B. Farnworth, E. K. Perkin, et B. Seymoure, « Light pollution is a driver of insect declines », *Biol. Conserv.*, vol. 241, p. 108259, janv. 2020, doi: 10.1016/j.biocon.2019.108259.
[126] P. Soroye, T. Newbold, et J. Kerr, « Climate change contributes to widespread declines among bumble bees across continents », *Science*, vol. 367, nº 6478, p. 685-688, févr. 2020, doi: 10.1126/science.aax8591.
[127] R. van Klink, D. E. Bowler, K. B. Gongalsky, A. B. Swengel, A. Gentile, et J. M. Chase, « Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances », *Science*, vol. 368, nº 6489, p. 417-420, avr. 2020, doi: 10.1126/science.aax9931.
[128] C. A. Halsch *et al.*, « Insects and recent climate change », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 118, nº 2, p. e2002543117, janv. 2021, doi: 10.1073/pnas.2002543117.
[129] P. H. Raven et D. L. Wagner, « Agricultural intensification and climate change are rapidly decreasing insect biodiversity », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 118, nº 2, p. e2002548117, janv. 2021, doi: 10.1073/pnas.2002548117.

[130] J. C. Habel, A. Segerer, W. Ulrich, O. Torchyk, W. W. Weisser, et T. Schmitt, « Butterfly community shifts over two centuries: Shifts in Butterfly Communities », *Conserv. Biol.*, vol. 30, nº 4, p. 754-762, août 2016, doi: 10.1111/cobi.12656.
[131] D. E. Bowler, H. Heldbjerg, A. D. Fox, M. Jong, et K. Böhning-Gaese, « Long-term declines of European insectivorous bird populations and potential causes », *Conserv. Biol.*, vol. 33, nº 5, p. 1120-1130, oct. 2019, doi: 10.1111/cobi.13307.
[132] J. Kamp *et al.*, « Population trends of common breeding birds in Germany 1990–2018 », *J. Ornithol.*, vol. 162, nº 1, p. 1-15, janv. 2021, doi: 10.1007/s10336-020-01830-4.
[133] Z. Benedek, F. Jordán, et A. Báldi, « Topological keystone species complexes in ecological interaction networks », *Community Ecol.*, vol. 8, nº 1, p. 1-7, déc. 2007, doi: 10.1556/ComEc.8.2007.1.1.
[134] V. I. Makarov et I. Khmelinskii, « External control of {theDrosophila} melanogasteregg to imago development period by specific combinations of 3D low-frequency electric and magnetic fields », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 35, nº 1, p. 15--29, 2014.
[135] V. P. Bindokas, J. R. Gauger, et B. Greenberg, « Mechanism of biological effects observed in honey bees (apis mellifera, L.) hived under extra-high-voltage transmission lines: Implications derived from bee exposure to simulated intense electric fields and shocks », *Bioelectromagnetics*, vol. 9, nº 3, p. 285--301, 1988.
[136] D. J. Panagopoulos, A. Karabarbounis, et C. Lioliousis, « ELF Alternating Magnetic Field Decreases Reproduction by DNA Damage Induction », *Cell Biochem. Biophys.*, vol. 67, nº 2, p. 703-716, mars 2013, doi: 10.1007/s12013-013-9560-5.
[137] T. Kikuchi, M. Ogawa, Y. Otaka, et M. Furuta, « Multigeneration exposure test of Drosophila melanogaster to ELF magnetic fields », *Bioelectromagnetics*, vol. 19, nº 6, p. 335-340, 1998, doi: 10.1002/(sici)1521-186x(1998)19:6<335::aid-bem1>3.0.co;2-2.
[138] K.-S. Chae, « An extremely low frequency magnetic field increases unconditioned larval movement of the common cutworm,Spodoptera litura: A novel model for a magnetoreceptive neurobehavioral study », *Entomol. Res.*, vol. 38, nº 4, p. 299-302, déc. 2008, doi: 10.1111/j.1748-5967.2008.00190.x.
[139] D. Todorović *et al.*, « The impact of chronic exposure to a magnetic field on energy metabolism and locomotion of *Blaptica dubia* », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 96, nº 8, p. 1076-1083, août 2020, doi: 10.1080/09553002.2020.1770360.
[140] M. Stamenković-Radak, I. Kitanović, Z. Prolić, I. Tomisić, B. Stojković, et M. Andjelkovic, « Effect of a permanent magnetic field on wing size parameters in Drosophila melanogaster », *Bioelectromagnetics*, vol. 22, nº 5, p. 365-369, juill. 2001, doi: 10.1002/bem.63.
[141] J. H. Graham, D. Fletcher, J. Tigue, et M. McDonald, « Growth and developmental stability {ofDrosophila} melanogaster in low frequency magnetic fields », *Bioelectromagnetics*, vol. 21, nº 6, p. 465--472, 2000.
[142] T.-H. Ma et K.-C. Chu, « Effect of the extremely low frequency (ELF) electromagnetic field (EMF) on developing embryos of the fruit fly (Drosophila melanogaster L.) », *Mutat. Res. Lett.*, vol. 303, nº 1, p. 35-39, sept. 1993, doi: 10.1016/0165-7992(93)90006-H.
[143] G. Becker, « Reaction of termites to weak alternating magnetic fields », *Naturwissenschaften*, vol. 63, nº 4, p. 201--202, 1976.
[144] S. Geronikolou, S. Zimeras, C. H. Davos, I. Michalopoulos, et S. Tsitomeneas, « Diverse Radiofrequency Sensitivity and Radiofrequency Effects of Mobile or Cordless Phone near Fields Exposure in Drosophila melanogaster », *PLoS ONE*, vol. 9, nº 11, p. e112139, nov. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0112139.
[145] L. H. Margaritis *et al.*, « Drosophila oogenesis as a bio-marker responding to EMF sources », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 33, nº 3, p. 165-189, sept. 2014, doi: 10.3109/15368378.2013.800102.
[146] D. J. Panagopoulos et L. H. Margaritis, « The effect of exposure duration on the biological activity of mobile telephony radiation », *Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen.*, vol. 699, nº 1-2, p. 17-22, juin 2010, doi: 10.1016/j.mrgentox.2010.04.010.

[147] D. J. Panagopoulos et L. H. Margaritis, « The identification of an intensity `window' on the bioeffects of mobile telephony radiation », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 86, nº 5, p. 358-366, avr. 2010, doi: 10.3109/09553000903567979.
[148] D. J. Panagopoulos, A. Karabarbounis, et L. H. Margaritis, « Effect of GSM 900-MHz mobile phone radiation on the reproductive capacity of Drosophila melanogaster », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 23, nº 1, p. 29-43, 2004.
[149] N. E. Sagioglou, A. K. Manta, I. K. Giannarakis, A. S. Skouroliakou, et L. H. Margaritis, « Apoptotic cell death {duringDrosophilaoogenesis} is differentially increased by electromagnetic radiation depending on modulation, intensity and duration of exposure », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 35, nº 1, p. 40--53, 2014.
[150] M. Vilić *et al.*, « Effects of short-term exposure to mobile phone radiofrequency (900 MHz) on the oxidative response and genotoxicity in honey bee larvae », *J. Apic. Res.*, vol. 56, nº 4, p. 430-438, août 2017, doi: 10.1080/00218839.2017.1329798.
[151] M. G. Vijver *et al.*, « Investigating short-term exposure to electromagnetic fields on reproductive capacity of invertebrates in the field situation », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 33, nº 1, p. 21--28, 2013.
[152] E. Atli et H. Ünlü, « The effects of microwave frequency electromagnetic fields on the development of Drosophila melanogaster », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 82, nº 6, p. 435-441, janv. 2006, doi: 10.1080/09553000600798849.
[153] E. Atli et H. Ünlü, « The effects of microwave frequency electromagnetic fields on the fecundity of Drosophila melanogaster », *Turk. J. Biol.*, vol. 31, nº 1, p. 1-5, 2007.
[154] D. Pandir et R. Sahingoz, « Magnetic field-induced oxidative stress and DNA damage in Mediterranean flour moth Ephestia kuehniella Zeller (Lepidoptera: Pyralidae) larvae », *J. Pest Sci.*, vol. 87, nº 1, p. 79-87, sept. 2013, doi: 10.1007/s10340-013-0521-y.
[155] T. R. Tegenkamp, *Mutagenic Effects of Magnetic Fields on Drosophila Melanogaster - Biological Effects of Magnetic Fields*. Springer {US}, 1969. [En ligne]. Disponible sur: https://doi.org/10.1007%2F978-1-4684-8352-9_13
[156] A. Yanagawa *et al.*, « Impact of 2.45 GHz Microwave Irradiation on the Fruit Fly, Drosophila melanogaster », *Insects*, vol. 11, nº 9, p. 598, sept. 2020, doi: 10.3390/insects11090598.
[157] S. Mittler, « Failure of chronic exposure to nonthermal {FM} radio waves to mutate Drosophila », *J. Hered.*, vol. 68, nº 4, p. 257--258, 1977.
[158] D. J. Panagopoulos, « Comparing DNA damage induced by mobile telephony and other types of man-made electromagnetic fields », *Mutat. Res. Mutat. Res.*, vol. 781, p. 53-62, juill. 2019, doi: 10.1016/j.mrrev.2019.03.003.
[159] L. D. Dyka, L. A. Shakina, V. Yu. Strashnyuk, et Y. G. Shckorbatov, « Effects of 36.6 {GHz} and static magnetic field on degree of endoreduplication {inDrosophila} melanogasterpolytene chromosomes », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 92, nº 4, p. 222--227, 2016.
[160] D. Todorović, Z. Prolić, B. Petković, et A. Kalauzi, « Effects of two different waveforms of ELF MF on bioelectrical activity of antennal lobe neurons ofMorimus funereus(Insecta, Coleoptera) », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 91, nº 5, p. 435-442, févr. 2015, doi: 10.3109/09553002.2015.1004467.
[161] M. Vácha, D. Drštková, et T. Půžová, « Tenebrio beetles use magnetic inclination compass », *Naturwissenschaften*, vol. 95, nº 8, p. 761-765, avr. 2008, doi: 10.1007/s00114-008-0377-9.
[162] M. Kisliuk et J. S. Ishay, « Influence of the earth's magnetic field on the comb building orientation of hornets », *Experientia*, vol. 35, nº 8, p. 1041-1042, août 1979, doi: 10.1007/bf01949929.
[163] S. Shepherd *et al.*, « Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields impair the Cognitive and Motor Abilities of Honey Bees », *Sci. Rep.*, vol. 8, nº 1, 2018, Consulté le: 1 janvier 5apr. J.-C. [En ligne]. Disponible sur: https://doi.org/10.1038%2Fs41598-018-26185-y

[164] S. Shepherd *et al.*, « Increased aggression and reduced aversive learning in honey bees exposed to extremely low frequency electromagnetic fields », *PLoS One*, vol. 14, nº 10, p. e0223614, 2019.
[165] M. Kisliuk et J. Ishay, « Influence of an additional magnetic field on hornet nest architecture », *Experientia*, vol. 33, nº 7, p. 885--887, 1977.
[166] J. V. Perumpral, U. F. Earp, et J. M. Stanley, « Effects of Electrostatic Field on Locational Preference of House Flies 1 and Flight Activities of Cabbage Loopers 23 », *Environ. Entomol.*, vol. 7, nº 3, p. 482--486, 1978.
[167] D. K. Edwards, « EFFECTS OF ARTIFICIALLY PRODUCED ATMOSPHERIC ELECTRICAL FIELDS UPON THE ACTIVITY OF SOME ADULT DIPTERA », *Can. J. Zool.*, vol. 38, nº 5, p. 899-912, oct. 1960, doi: 10.1139/z60-096.
[168] R. J. Stout, « Responses to Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields by a Dragonfly Naiad (Ophiogomphus colubrinus) in a Northern Michigan Stream: A Five Year Study », *J. Freshw. Ecol.*, vol. 7, nº 4, p. 343--352, 1992.
[169] B. Greenberg, « Impact of Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields on Soil Arthropods », *Environ. Entomol.*, vol. 1, nº 6, p. 743--750, 1972.
[170] T. Leucht, « Responses to light under varying magnetic conditions in the honeybee,Apis mellifica », *J. Comp. Physiol. A*, vol. 154, nº 6, p. 865-870, 1984, doi: 10.1007/bf00610687.
[171] M.-C. Cammaerts, P. D. Doncker, X. Patris, F. Bellens, Z. Rachidi, et D. Cammaerts, « GSM 900 MHz radiation inhibits ants' association between food sites and encountered cues », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 31, nº 2, p. 151-165, janv. 2012, doi: 10.3109/15368378.2011.624661.
[172] D. Favre, « Mobile phone-induced honeybee worker piping », *Apidologie*, vol. 42, nº 3, p. 270--279, 2011.
[173] N. E. Gary et B. B. Westerdahl, « Flight, orientation, and homing abilities of honeybees following exposure to 2.45-{GHz} {CW} microwaves », *Bioelectromagnetics*, vol. 2, nº 1, p. 71--75, 1981.
[174] G.-J. Wan *et al.*, « Reduced geomagnetic field may affect positive phototaxis and flight capacity of a migratory rice planthopper », *Anim. Behav.*, vol. 121, p. 107-116, nov. 2016, doi: 10.1016/j.anbehav.2016.08.024.
[175] V. M. Orlov, « Invertebrates and High-Voltage Powerlines », *J. Bioelectr.*, vol. 9, nº 2, p. 121--131, 1990.
[176] K. Tomanova et M. Vacha, « The magnetic orientation of the Antarctic amphipod Gondogeneia antarctica is cancelled by very weak radiofrequency fields », *J. Exp. Biol.*, 2016, Consulté le: 1 janvier 1apr. J.-C. [En ligne]. Disponible sur: https://doi.org/10.1242%2Fjeb.132878
[177] E. K. Eskov, « Destabilization of the insect heart function by low-frequency electric field », *Biophysics*, vol. 51, nº 1, p. 122-124, janv. 2006, doi: 10.1134/S0006350906010192.
[178] S. Spasić, S. Kesić, G. Stojadinović, B. Petković, et D. Todorović, « Effects of the static and ELF magnetic fields on the neuronal population activity in Morimus funereus (Coleoptera, Cerambycidae) antennal lobe revealed by wavelet analysis », *Comp. Biochem. Physiol. A. Mol. Integr. Physiol.*, vol. 181, p. 27-35, mars 2015, doi: 10.1016/j.cbpa.2014.11.018.
[179] L. Ilijin *et al.*, « The response of dorsomedial A1' and dorsolateral L2' neurosecretory neurons of Lymantria dispar L. caterpillars to the acute effects of magnetic fields », *Arch. Biol. Sci.*, vol. 63, nº 1, p. 167--176, 2011.
[180] L. Ilijin *et al.*, « The effects of acute exposure to magnetic fields on morphometric characteristics of bombyxin-producing neurosecretory neurons in gypsy moth caterpillars », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 87, nº 5, p. 461-471, mai 2011, doi: 10.3109/09553002.2011.542544.
[181] A. K. Manta *et al.*, « Mobile-phone radiation-induced perturbation of gene-expression profiling, redox equilibrium and sporadic-apoptosis control in the ovary of Drosophila melanogaster », *Fly (Austin)*, vol. 11, nº 2, p. 75--95, 2017.

[182] J. Wyszkowska, M. Jankowska, et M. Stankiewicz, « Comprehensive study of the effects of electromagnetic field exposure on nervous system using insect models », sept. 2018. doi: 10.23919/emf-med.2018.8526060.
[183] Z. Prolić, R. Jovanović, G. Konjević, et B. Janać, « Behavioral Differences of the InsectMorimus funereus (Coleoptera, Cerambycidae) Exposed to an Extremely Low Frequency Magnetic Field », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 22, nº 1, p. 63-73, janv. 2003, doi: 10.1081/jbc-120020358.
[184] D. Zmejkoski, B. Petković, S. Pavković-Lučić, Z. Prolić, M. Anđelković, et T. Savić, « Different responses of Drosophila subobscura isofemale lines to extremely low frequency magnetic field (50 Hz, 0.5 mT): fitness components and locomotor activity », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 93, nº 5, p. 544-552, mai 2017, doi: 10.1080/09553002.2017.1268281.
[185] D. Dimitrijević, T. Savić, M. Anđelković, Z. Prolić, et B. Janać, « Extremely low frequency magnetic field (50 Hz, 0.5 mT) modifies fitness components and locomotor activity of *Drosophila subobscura* », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 90, nº 5, p. 337-343, mai 2014, doi: 10.3109/09553002.2014.888105.
[186] Z. M. Prolić et V. Nenadović, « The influence of a permanent magnetic field on the process of adult emergence in Tenebrio molitor », *J. Insect Physiol.*, vol. 41, nº 12, p. 1113-1118, déc. 1995, doi: 10.1016/0022-1910(95)00061-X.
[187] M. A. Seada, S. E. Elkholy, et W. S. Meshrif, « Does the cellphone radio-frequency electromagnetic radiation during ringing or talking modes induce locomotor disturbance {inDrosophila} melanogaster? », *Afr. Zool.*, vol. 51, nº 1, p. 53--60, 2016.
[188] V. Bindokas et B. Greenberg, « Biological effects of a 765-{kV}, 60-Hz transmission line on honey bees (Apis mellifera L.): Hemolymph as a possible stress indicator », *Bioelectromagnetics*, vol. 5, nº 3, p. 305--314, 1984.
[189] R. Goodman, D. Weisbrot, A. Uluc, et A. Henderson, « Transcription in Drosophila melanogaster salivary gland cells is altered following exposure to low-frequency electromagnetic fields: Analysis of chromosome 3R », *Bioelectromagnetics*, vol. 13, nº 2, p. 111-118, 1992, doi: 10.1002/bem.2250130205.
[190] P. Migdał, A. Roman, A. Strachecka, A. Murawska, et P. Bieńkowski, « Changes of selected biochemical parameters of the honeybee under the influence of an electric field at 50 Hz and variable intensities », *Apidologie*, vol. 51, nº 6, p. 956-967, déc. 2020, doi: 10.1007/s13592-020-00774-1.
[191] J. Maliszewska, P. Marciniak, H. Kletkiewicz, J. Wyszkowska, A. Nowakowska, et J. Rogalska, « Electromagnetic field exposure (50~Hz) impairs response to noxious heat in American cockroach », *J. Comp. Physiol. A*, vol. 204, nº 6, p. 605--611, 2018.
[192] D. Todorović *et al.*, « Estimation of changes in fitness components and antioxidant defense of Drosophila subobscura (Insecta, Diptera) after exposure to 2.4 T strong static magnetic field », *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 22, nº 7, p. 5305-5314, avr. 2015, doi: 10.1007/s11356-014-3910-8.

Version corrigée du rapport suite à la correction du 10.01.2023. Adaptation à la page 3, ligne 13 : 0 – 100 kHz au lieu de 0 – 10 kHz , *(0 - 10<u>0</u> kHz, 100 kHz – 6 GHz, 6 GHz - 300 GHz)*.

Annexes

1) Tables détaillées des effets du RNI

Effets des RNI en fonction de l'exposition (gamme de fréquence) pour différents critères d'évaluation. La direction d'effet est codée comme suit : neg = effet négatif pour les arthropodes. Pos = effet positif pour les arthropodes. Incl = Etude inconclusive. La colonne « confiance globale » correspond au niveau de preuve d'un effet des RNI sur la mortalité dans la gamme de fréquences concernée.

Tableau 14 Mortalité

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Kholy 2012 [31]	Des ondes radio à la téléphonie mobile			*D melanogaster*	diminution de la viabilité	neg	0 Hz -100 kHz	faible	faible
Makarov 2014 [134]	ELF EMF			*D. melanogaster* eggs	Réduction de la durée de vie	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Todorovic 2013 [24]	SMF	50 mT	inférieure	*Tenebrio*	Pas d'effet sur le développement larvaire	incl	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Stanojevic 2005 [22]	50Hz	6mT en théorie (non mesuré)	inférieure	*Musca domestica*	Augmente la durée de vie	pos	0 Hz -100 kHz	moyenne	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Kawasaki 2020 **[25]**	50 Hz	35 kV/m	supérieure	*D melanogaster*	L'exposition à un champ électrique de 50 Hz dans des conditions de faible teneur en nutriments allonge la durée de vie des mouches mâles et femelles WT de ~18 %, mais pas celle de trois mutants Cry différents et des souches Cry RNAi.	incl	0 Hz -100 kHz	faible	
Bindokas 1988 [135]	60 Hz	7 kV/m high voltage line 765 kV, 60Hz above hyphes 100kV/m in dry & wet tunnels	supérieure	*Apis mellifera*	Augmentation de la mortalité	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Ramirez 1983 **[26]**	ELF EMF	4.5-mT	inférieure	*Drosophila melanogaster*	diminution de la ponte, augmentation de la mortalité au stade des œufs, des nymphes et des adultes	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Martin 1989 **[23]**	EMF			*Apis mellifica carnica*	augmentation de l'espérance de vie.	pos	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Sudaryadi 2020 **[28]**	4G	6 heures à côté d'un téléphone HSDPA 2100	inférieure	*Drosophila melanogaster*	diminution de la survie	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	faible

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Yanagawa 2014 [33]	2,45GHz	50-300W	supérieure	*Coptotermes formosanus*	Augmentation de la mortalité, convulsions	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Darney 2015 [29]	13.56MHz - 868 MHz	1-4 mV/m at 13,56 MHZ, 3,42-5 V/m at 868 MHz	inférieure	*Apis mellifera*	augmentation de la mortalité,	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Lee 2008 [30]	835 MHz	DAS 1.6 W/kg to DAS 4.0 W/kg	supérieure	*Drosophila*	diminution de la viabilité à un SAR de 4,0 W/kg, aucun effet dans la gamme ANSI.	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	
Shckorbatov 2007 [32]	35GHz	10e-5 to 10 e-2 W/cm²	inférieure	*D Melanogaster*	diminution la viabilité et augmentation la mutabilité	neg	6 GHz – 300 GHz	faible	
Shakina 2011 [20]	36,64 GHz	0,4 W/m²	inférieure	*D Melanogaster*	Œufs plus petits, moins bonne viabilité, mutations létales	neg	6 GHz – 300 GHz	moyenne	

Tableau 15 Reproduction

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Panagopoulos 2013 [136]	50 Hz ELF	0,1 mT - 2,1mT	supérieure	*Drosophila melanogaster*	diminution de la reproduction« pas de relation dose-effet aux intensités testées	neg	0 Hz -100 kHz	faible	haute
Kikuchi 1998 [137]	ELF	0.5 or 5 mT	supérieure	*Drosophila melanogaster*	effet sur le vol et la reproduction	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Diebolt 1978 [41]	SMF	En théorie 0.3 kV/cm (non mesuré)	supérieure	*Drosophila melanogaster*	aucun effet sur la mutation des spermatozoïdes	incl	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Chae 2008 [138]	60 Hz	(0.2 mT)	inférieure	*Spodoptera litura*	augmentation des mouvements chez les larves de troisième stade	neg	0 Hz -100 kHz	Haute	
Todorovic 2020 [139]	ELF MF	10 mT	supérieure	*Blaptica dubia*	Diminution de la masse corporelle des nymphes, augmente tous les paramètres de locomotion examinés	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Valadez-Lira 2017 [40]	ELF-EMF	2.0mT	supérieure	*Trichoplusia ni*	augmentation significative du nombre de cellules de type apoptotique et de la réponse immunitaire	incl	0 Hz -100 kHz	moyenne	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
					cellulaire, aucun effet sur l'oviposition				
Stamenkovic-Radak 2001 **[140]**	SMF			*Drosophila melanogaster*	Pas d'effet sur le développement des larves	incl	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Graham 2000 **[141]**	60 Hz	0, 1.5, 80 µT	inférieure	*Drosophila*	dans un champ de 80 mT a montré une stabilité de développement plus faible	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Michel 1999 **[91]**	ELF -EMF 50 Hz co-stress zvrc temp 34 à 27°C	100 µT +/- 2%	inférieure	*Drosophila* : 3 souches dans lesquelles le gène rapporteur lacZ est contrôlé par les gènes de segmentation engrailed (en), fushi tarazu (ftz) ou sloppy paired (slp).	co stess (ELF-EMF + temp) ont montré des anomalies plus souvent que le stress thermique seul, le coût a augmenté le temps de développement.	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Ma 1993 **[142]**	ELF -EMF AC & DC	50 - 400 mG	inférieure	Droso Oregon-R	Diminue survie de l'embryon	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Becker 1976 **[143]**	50 Hz	~0.4 A/m at 10 cm dist); 0.001 A/m at 150 cm dist	inférieure	*Heterotermes indicola*	Retard de la ponte des œufs	neg	0 Hz -100 kHz	faible	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
				(Wasman), a Rhinotermitid from India.					
Ramirez 1983 **[26]**	ELF EMF	4.5-mT	inférieure	*Drosophila melanogaster*	Diminution de la ponte, augmentation de la mortalité au stade des œufs, des nymphes et des adultes	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Sudaryadi 2020 **[28]**	4G	6 heures à côté d'un téléphone HSDPA 2100	inférieure	*Drosophila melanogaster*	diminue la survie et la taille des organes reproducteurs	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	haute
Odemer 2019 **[36]**	900 MHz	DAS 0.59 W/kg, 0.005–5 V/m	inférieure	Abeilles (reines)	réduction du taux d'éclosion mais pas du succès d'accouplement. mortalité plus élevée des reines dans le groupe EMF (HR 2,3)	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Geronikolou 2014 **[144]**	1880 MHz	SAR 5.10^{-3}W/kg 7.10^{-4} W/kg		*Drosophila melanogaster*	ovicité légère à 900 Mhz	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	
Margaritis 2014 **[145]**	2.44 Ghz	0,3-22V/m	inférieure	*Drosophila melanogaster* et *Drosophila virili*	augmentation de l'apoptose ovarienne	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	
Panagopoulos 2012 **[38]**	900 MHz	17.5 ± 3.2 V/m, 0.8 ± 0.2 mG	inférieure	*Drosophila melanogaster*	réduction de la taille des ovaires. Lésions de l'ADN, induction de la mort cellulaire	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Chavdoula 2010 [37]	900-1800 MhZ	0.35 ± 0.07 mW/cm2	inférieure	*Drosophila melanogaster*	réduit la ferticité (quantité de pupes). altère le squelette d'actine de la chambre à œufs. fragmentation de l'ADN	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Panagopoulos 2010 [146]	900-1800 MhZ	0.010 ± 0.002 mW/cm2	inférieure	*Drosophila melanogaster*	la reproductivité diminue linéairement avec la durée d'exposition	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	
Sharma 2010 [59]	900 MHz	56.8 V/m	supérieure	*Apis mellifera*	baisse de la taille des colonies et du taux de ponte, aucun miel	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	
Panagopoulos 2010 [147]	900-1800 MhZ	10 mW/cm 2 , 0.6–0.7 V/m	supérieure	*Drosophila melanogaster*	diminution de la reproductivité due à la dose et non à la fréquence, augmentation de la mort cellulaire dans les gonades	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	
Panagopoulos 2007 [39]	900-1800 MhZ	0.402 ± 0.054 mW/cm2 at 900 MHz, 0.288 ± 0.038 mW/cm2 at 1800 MHz	inférieure	*Drosophila melanogaster*	diminution de l'oviposition due à la dégradation de l'ADN	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Panagopoulos 2007 [96]	900-1800 MhZ	0,407 ± 0, 061mW/cm 2 à 900MHz, 0.283 ±	inférieure	*Drosophila melanogaster*	diminution de la reproductivité due à la dose et non à la fréquence,	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
		0.043mW/cm² à 1,8GHz							
Panagopoulos 2004 [148]	900-MHz	0.041 +/- 0.006mW/cm 2 et 16.68+/-3.68V/m	inférieure	*Drosophila melanogaster*	diminution de la reproductivité	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Weisbrot 2003 [35]	(900/1,900 MHz	20-63 V/m	supérieure	*Drosophila melanogaster*	augmentation du nombre de descendants, élévation des taux de Hsp70, augmentation de la liaison à l'ADN de l'élément de réponse au sérum (SRE) et induction de la phosphorylation du facteur de transcription nucléaire ELK-1.	pos	100 kHz – 6 GHz	faible	
Sagioglou 2014 [149]	100, 395, 682, 900MH	NA	NA	*Drosophila*	augmentation de la mort cellulaire apoptotique dans la chambre à œufs	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	
Vilic 2017 [150]	(900 MHz)	f 10, 23, 41 and 120 V m −1 for 2 h	supérieure	honey bee larvae	Les dommages à l'ADN ont augmenté de manière significative dans les larves d'abeilles domestiques.	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Vijver 2013 [151]	900MHz	f 10, 23, 41 and 120 V m −1 for 2 h	supérieure	*Folsomia candida, Orius laevigatus,*	aucun effet sur la fécondité et la descendance	incl	100 kHz – 6 GHz	moyenne	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
				Asobara japonica, Drosophila melanogaster					
Lee 2008 **[30]**	835 MHz	DAS 1.6 W/kg to DAS 4.0 W/kg	supérieure	*Drosophila*	Activation de la signalisation MAPK, diminution de la viabilité à un SAR de 4,0 W/kg, pas d'effet dans la gamme ANSI.	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	
Atli 2006 **[152]**	10 GHz	0.0156 Watt/m 2 / 3.42 V/m	inférieure	*Drosophila melanogaster*	le temps moyen de nymphose augmente avec le temps d'exposition	neg	6 GHz – 300 GHz	faible	faible
Sheiman 2003 **[34]**	36 GHz	100 µW/cm2	inférieure	*Tenebrio molitor*	un faible rayonnement électromagnétique a stimulé la mue et la nymphose des larves et la métamorphose des nymphes	pos	6 GHz – 300 GHz	faible	
Atli 2007 **[153]**	10 GHz	156 mV/m² = 0,0156 Watt/m2, l'intensité du champ électrique était de 3,42 V/m et le DAS (débit d'absorption spécifique) était d'environ 9,8	inférieure	Droso Oregon wt	diminution de la fécondité effet max 27 % de réduction	neg	6 GHz – 300 GHz	faible	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
		mW/kg (11, 12, 13) Distance de 1 m de l'antenne cône							
Shakina (2011) [20]	36.64 GHz	0,4 W/m²	inférieure	*D Melanogaster*	Œufs plus petits, moins bonne viabilité, mutations létales	neg	6 GHz – 300 GHz	moyenne	

Tableau 16 Dégradation de l'ADN

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Diebolt 1978 **[41]**	SMF	En théorie 0.3 kV/cm (non mesuré)	supérieure	*Drosophila melanogaster*	aucun effet sur la mutation des spermatozoïdes	incl	0 Hz -100 kHz	moyenne	moyenne
Pandir 2014_**[154]**	50 Hz	1.4-T	supérieure	*Ephestia kuehniella*	Dégradation ADN	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Kale 1982 [44]	SMF	13 000 Gauss	supérieure	*Drosophila melanogaster*	Pas d'effet détectable sur la dégradation de l'ADN	incl	0 Hz -100 kHz	faible	
Valadez-Lira 2017 **[40]**	ELF-EMF	2.0mT	supérieure	*Trichoplusia ni*	augmentation significative du nombre de cellules de type apoptotique et de la réponse immunitaire cellulaire, aucun effet sur l'oviposition	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Tegenkamp 1969 **[155]**	GMF	Niveau GMF	inférieure	*Drosophila*	mutations	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Yanagawa 2020 **[156]**	2.45 Ghz	10 µ W/cm 2 –100 mW/cm 2	supérieure	*Drosophila melanogaster*	effet non thermique : génotoxicité et altérations comportementales	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	haute
Panagopoulos 2012_**[38]**	900 MHz	17.5 ± 3.2 V/m, 0.8 ± 0.2 mG	inférieure	*Drosophila melanogaster*	réduction de la taille des ovaires. Lésions de l'ADN,	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
					induction de la mort cellulaire				
Chavdoula 2010 [37]	900-1800 MhZ	0.35 ± 0.07 mW/cm2	inférieure	*Drosophila melanogaster*	réducton la ferticité (quantité de pupes). Altération du squelette d'actine de la chambre à œufs. fragmentation de l'ADN	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Panagopoulos 2007 [39]	900-1800 MhZ	0.402 ± 0.054 mW/cm2 at 900 MHz, 0.288 ± 0.038 mW/cm2 at 1800 MHz	inférieure	*Drosophila melanogaster*	diminution de l'oviposition due à la dégradation de l'ADN	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Hamnerius 1985 [42]	27 Mhz à 3.10-GHz	DAS 60–130 W/kg pour MW, jusqu'à 20 W/kg pour RF	supérieure	*Drosophilla*	aucun effet sur la mutagenèse	incl	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Hamnerius 1979 [43]	2450 MHz CW	DAS 100 W/kg	supérieure	*Drosophila melanogaster*	aucun effet sur la mutagenèse	incl	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Vilic 2017 [150]	(900 MHz)	f 10, 23, 41 and 120 V m −1 for 2 h	supérieure	Larve d'abeilles	Les dommages à l'ADN ont augmenté de manière significative dans les larves d'abeilles domestiques.	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Mittler 1977 [157]	98.5 MHz Radio EMF	0.3 V/m	inférieure	*Drosophila*	létal dans les chromosomes	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Panagopoulos 2019 [158]	[GSM 900, GSM 1800, 1 G MF, (MF1), 11 G MF (MF2), 21 G MF (MF3), and 400 kV/m PEF	0.378± 0.059mW/cm²	inférieure	*Drosophila melanogaster*	Ruptures de l'ADN SS DS (test TUNEL)	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Dyka 2016 [159]	36.6 GHz	25 mT , 1 W/m 2 for 30s	inférieure	*Drosophila melanogaster*	Augmentation du degré de polyténie des chromosomes.	neg	6 GHz – 300 GHz	faible	faible
Shckorbatov 2007 [32]	35GHz	10e-5 to 10 e-2 W/cm²	inférieure	*Drosophila melanogaster*	diminuer la viabilité et augmenter la mutabilité	neg	6 GHz – 300 GHz	faible	
Shakina 2011 [20]	36.64 GHz	0,4 W/m²	inférieure	*D Melanogaster*	Œufs plus petits, moins bonne viabilité, mutations létales	neg	6 GHz – 300 GHz	moyenne	

Tableau 17 Comportement

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Wyszkowska 2016 [49]	50 Hz,	1, 4 and 7 mT	supérieure	*Schistocerca gregaria*	réduction de la marche, augmentation de Hsp70	neg	0 Hz -100 kHz	faible	haute
Kholy [31]	Des ondes radio à la téléphonie mobile			*D melanogaster*	perte de mémoire, diminution de la viabilité	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Jackson 2011 [109]	SMF			*Periplaneta american*	évite le champ électrique. bouge moins.	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Todorovic 2015[160]	50Hz	2mT	inférieure	*Morimus funereus*	impact sur l'activité neuronale	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Chae 2008 [138]	60 Hz	(0.2 mT)	inférieure	*Spodoptera litura*	augmentation des mouvements chez les larves de troisième stade	neg	0 Hz -100 kHz	haute	
Vacha 2008 [161]	SMF	densité de flux magnétique horizontale : 19,4±0,2 µT, composante verticale : 39,8±0,2 µT, vecteur total 44,3±0,2 µT, inclinaison 64°±1° (sonde HMR 2300,	inférieure	*Tenebrio*	changement de direction de la marche lors de l'inversion du SMF	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
		Honeywell US et logiciel Geomag, Edis, Kosice,SK).							
Kisliuk 1979 **[162]**	GMF	NA	NA	Vespa orientalis	l'absence de GMF empêche les frelons de construire un rayon.	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Shepherd 2018 **[163]**	50 Hz	1000–7000 µT	inférieure	*Apis mellifera*	impact sur leurs capacités cognitives et motrices	neg	0 Hz -100 kHz	haute	
Shepherd 2019 **[164]**	ELF	100 µT and 1000 µT	inférieure	*Apis mellifera*	réduit l'apprentissage, augmente l'agressivité	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Kisliuk 1977 **[165]**	GMF	23.3 Oe 1.3 Oe (uniforme) ; 03- 0.6 Oe (non Uniforme)	inférieure	*Vespa orientalis*	la construction du nid est différente dans les 3 configurations et les larves n'ont pas survécu.	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Perumpral 1978 **[166]**	Electro Static Field (ESF)	200-1500 V/cm		*Musca domestica* , *Trichoplusia ni*	A 750 v/cm un peu, mais significativement, plus de mouches préférées le champ électrostatique.	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Edwards 1960 **[167]**	ESF	10 - 62.5 V/cm		Droso, *Calliphora* adults	activité de mouvement	neg	0 Hz -100 kHz	faible	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Stout 1992 [168]	ELF indéfini	4 -150 a	NA	*Ophiogomphus colubrinus*	Pas d'effet sur le mouvement	incl	0 Hz -100 kHz	faible	
Greenberg 1972 **[169]**	45 - 75 Hz	0-500 mV/m	inférieure	collemboles & 3 groupes de mites	Pas d'impact sur le « sanguine effect »	incl	0 Hz -100 kHz	faible	
Leucht 1984 **[170]**	EMF	2 Gauss	inférieure	*Apis mellitica*	perte de la phototaxie	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Martin 1989 **[23]**	EMF			*Apis mellifica carnica*	diminution de la capacité de vol, augmentation de l'espérance de vie. réduction du tempo de danse	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Yanagawa 2020 **[156]**	2.45 Ghz	10 µ W/cm 2 –100 mW/cm 2	supérieure	*Drosophila melanogaster*	effet non thermique : génotoxicité et altérations comportementales	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	moyenne
Poh 2017 **[50]**	0.01-20 GHz			*Aedes Aegypti*	Non concluant	incl	100 kHz – 6 GHz	faible	
Yanagawa 2014 **[33]**	2,45GHz	50-300W	supérieure	*Coptotermes formosanus*	mortalité accrue, convulsions	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Cammaerts 2013 **[57]**	900MHz	0.77 V/m	inférieure	*Myrmica sabuleti*	désorientation. incapacité à retourner chez soi après avoir trouvé une source de nourriture	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Ved-Parkash-Sharma 2010 [59]	Telephone portable			*Apis mellifera*	baisse de la force des colonies et du taux de ponte, aucun miel	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	
Ondracek [46]	2.375 MHz	0-40Wcm²	supérieure	*Caryedon gonagra, Pyrrhocoris apterus*	les insectes évitent les zones intensément éclairées, probablement à cause de l'échauffement, seuil à 13,2 W/m².	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Vargova 2018 [48]	t 900 and 5000 MHz	0.493 nW/m to 1,05 mW/m²	inférieure	*Dermacentor reticulatus*	l'exposition à 900 MHz a induit une concentration plus élevée de tiques	neutr	100 kHz – 6 GHz	faible	
Cammaerts 2014 [69]	925 MHz–960 MHz	1.5V/m, 0.5V/m	inférieure	*Myrmica sabuleti*	diminution de la locomotion et de l'orientation	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Cammaerts 2012 [171]	900MHz	En théorie 7.95 and 10 24 W/m 2	supérieure	fourmis	impact sur la mémoire visuelle et l'olfaction	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	
Favre 2011 [172]	900 MHz	SAR < 2 W/kg	inférieure	*Apis mellifera*	sifflement induit par l'exposition aux RNI (deux téléphones mobiles 900 MHz communicants placés au-dessus de la ruche ; sifflement dans la ruche enregistré sur un enregistreur audio séparé).	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	
Gary 1981 [173]	2.45 GHz	3 - 50 W/cm²	supérieure	*Apis mellifera*	capacités de retour à la maison	neg	100 kHz – 6 GHz	haute	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Fratzak 2020 **[47]**	900MHz	0.6 V/m	inférieure	*Ixodes ricinus*	tiques attirées par les radiations	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	
Poh 2017 **[50]**	0.01-20 GHz			*Aedes Aegypti*	Non concluant	incl	6 GHz – 300 GHz	faible	faible
Liddle 1986 **[51]**	9.6 GHz puls	10, l, & 0.1 mW/cm2 = DAS estimés 40, 4, et 0.4 mW/g	supérieure	araignées (*Araneus diadematus*)	aucun effet sur le développement de la toile pendant la nuit à la dose la plus élevée	incl	6 GHz – 300 GHz	faible	

Tableau 18 Capacités de vol

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Kikuchi 1998 **[137]**	ELF	0.5 or 5 mT	supérieure	*Drosophila melanogaster*	effet sur le vol et la reproduction	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	haute
Wan 2016 **[174]**	GMF	25-52000 nT	inférieure	Cicadelle du riz migratrice	diminution le vol et la phototaxie	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Orlov 1990 **[175]**	RF EMF SMF ?	8-10 kV/m	supérieure	insectes	altère le vol des moustiques	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Martin 1989 **[23]**	EMF			*Apis mellifica carnica*	diminution de la capacité de vol, augmentation de l'espérance de vie. réduction du tempo de danse	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Shepherd 2021 **[54]**	50 Hz	0; 100; 700; 1,000; et 7,000µT	supérieure	*Schistocerca gregaria*	change la fréquence des ailes	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	

Tableau 19 Orientation

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Ferrari 2014 **[64]**	GMF	0-1000nT	inférieure	abeille	orientation	neg	0 Hz -100 kHz	faible	moyenne
Wan 2019 **[63]**	GMF	GMF50µT vs. GMF45µT	inférieure	*Nilaparvata lugens*	Les trois phénotypes morphologiques et comportementaux ont répondu à une petite différence d'intensité du champ magnétique entre les emplacements simulés au nord et au sud de la manière attendue le long de la route migratoire. On a également constaté des réponses magnétiques cohérentes dans l'expression du gène Cry1 (cryptochrome 1) de type drosophile, lié au phototaxisme, et dans les niveaux de deux substrats énergétiques primaires utilisés pendant le vol, le triglycéride et le tréhalose.	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Acosta-Avalos 2015 **[66]**	60 Hz	10, 16, 26 and 29 µT	inférieure	Fourmis de feu	affect orientation	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Wehner 1970 **[65]**	GMF			*Drosophila*	orientation	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Srygley 2006 [67]	SMF	0.75 T	supérieure	*Pieridae*	Mise en evidence de l'oreientation magnétique	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Schiff 1991 [68]	0.01-100 kHz	09-30 µT	inférieure	*Apis mellitica*	Impacte la magnéto réception	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Leucht 1984 **[170]**	EMF	2 Gauss	inférieure	*Apis mellitica*	Perte de phototaxie	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Cammaerts 2013 **[57]**	900MHz	0.77 V/m	inférieure	*Myrmica sabuleti*	désorientation. incapacité à retourner chez soi après avoir trouvé une source de nourriture	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	moyenne
Wiegmann 2020 **[62]**	144.06–151.98 MHz			*Paraphrynus laevifrons*	Pas d'effet	incl	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Cammaerts 2014 **[69]**	925 MHz–960 MHz	1.5V/m, 0.5V/m	inférieure	*Myrmica sabuleti*	diminution de la locomotion et de l'orientation	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Tomanova 2016 **[176]**	1MHz	20 nT	inférieure	*Gondogeneia antarctica*	perte d'orientation	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	

Tableau 20 Fonctions corporelles et métabolisme

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Eskov 2006 **[177]**	ELF	50 kV/m	supérieure	insectes	effet sur le cœur et les sensilles trichoïdes	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	haute
Jankowska 2015 **[71]**	50 Hz	0.7 mT	inférieure	scorpion	modification de l'efficacité des toxines sur les cafards	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Spasic 2015 **[178]**	0-50 Hz	2mT	inférieure	*Morimus funereus*	aucun effet sur l'activité des neurones de la population	incl	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Ilijin 2011 **[179]**	SMF et ELF MF	2mT en théorie	inférieure	*Lymantria dispar* L. neurones de chenilles	Les changements morphométriques (taille des neurones et de leurs noyaux) des neurones neurosécrétoires dorsomédiaux A1' et dorsolatéraux L2' de protocérébral. L2' neurosécrétoires SMF : Une augmentation de la taille des neurones A1' et de leurs noyaux a été observée après une exposition aiguë au SMF. ELF MF : Une diminution de la taille de ces neurones et de leurs noyaux	neg	0 Hz -100 kHz	très faible	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
					a été observée après une exposition à l'ELF MF.				
Ilijin 2011 [180]	Champs magnétique basse fréquence			*L. dispa*	synthèse intensive de matériel neurosécrétoire semblable à l'insuline.	neg	0 Hz -100 kHz	très faible	
Luo 2018 [70]	SMF	2 ou 4-kV/cm	supérieure	*Sitobion Avenae*	a diminué les taux métaboliques	pos	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Martel 1982 [72]	SMF	0.8 (CTRL) 5, 50 500 gauss	inférieure	*Isopoda Porcellio laevis*	La consommation d'O2 est réduite dans le cas d'un SMF plus fort.	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Kefuss 1999 [73]	SMF	7 Tesla	supérieure	bee worker *Apis mellifera*	Hémolymphe : action de la tréhalase réduite, Glucose Tréhalose Fructose inchangé ; augmentation des phospholipides dans l'intestin.	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Greenberg 1972 [169]	45 - 75 Hz	0-500 mV/m	inférieure	collemboles & 3 groupes de mites	Pas d'impact sur le sanguine effect	incl	0 Hz -100 kHz	moyenne	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Manta 2017 **[181]**	Téléphone portable du commerce	f 0.15 W/kg	inférieure	*Drosophila melanogaster*	impact sur l'expression des gènes et augmentation de l'apoptose	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	**faible**

Tableau 21 Vitesse de déplacement

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Wyszkowska 2018 [182]	50 Hz,	7 mT	supérieure	*Periplaneta americana*	Augmentation de l'activité motrice	pos	0 Hz -100 kHz	faible	moyenne
Wyszkowska 2016 [49]	50 Hz,	1, 4 and 7 mT	supérieure	desert locust	réduction de la marche, augmentation de Hsp70	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Jackson 2011 [109]	SMF			*Periplaneta american*	évite le champ électrique. bouger moins.	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Prolic 2003 [183]	50 Hz	2 mT	inférieure	*Morimus funereus*	diminution de l'activité locomotrice	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Shepherd 2018 [163]	50 Hz	1000–7000 µT	inférieure	*Apis mellifera*	impact sur leurs capacités cognitives et motrices	neg	0 Hz -100 kHz	haute	
Todorovic 2020 [139]	ELF MF	10 mT	supérieure	*Blaptica dubia*	Diminue la masse corporelle des nymphes, a augmenté tous les paramètres de locomotion examinés	pos	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Zmejkoski 2017[184]	50 Hz	0.5 mT	inférieure	*Drosophila subobscura*	Diminution de leur activité locomotrice et cet effet a duré plus longtemps chez les femelles que chez les mâles.	neg	0 Hz -100 kHz	faible	

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Dimitrijevic 2014 [185]	50 Hz	0.5 mT	inférieure	*Drosophila subobscura*	diminue l'activité locomotrice des mouches adultes	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Prolic 1995 [186]	50 Hz	2 mT	inférieure	*Morimus funereus (Coleoptera, Cerambycidae)*	Pas d'effet significative sur la locomotion, mais tendance baissière	incl	0 Hz -100 kHz	faible	
Martin 1989 [23]	EMF			*Apis mellifica carnica*	diminution de la capacité de vol, augmentation de l'espérance de vie. réduction du tempo de danse	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Vacha 2009 [88]	1.2 MHz - 7MHz	12-44nT	inférieure	American cockroach	réduire la locomotion à 12,2Mhz et 2,4Mhz mais pas à 7Mhz	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	moyenne
Cammaerts 2014 [69]	925 MHz–960 MHz	1.5V/m, 0.5V/m	inférieure	*Myrmica sabuleti*	diminution de la locomotion et de l'orientation	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	
Seada 2016 [187]	900 MHz	0.70 W kg	inférieure	*Drosophila melanogaster*	réduction significative de la vitesse de déplacement	incl	100 kHz – 6 GHz	faible	

Tableau 22 Biomarqueurs de stress

Reference	Gamme RNI	Dose	Exposition	Organisme	Effet	Direction	Gamme étendue	Confiance par étude	Confiance par gamme
Wyszkowska 2016 [49]	50 Hz,	1, 4 and 7 mT	supérieure	*Schistocerca gregaria*	réduction de la marche, augmentation de Hsp70	neg	0 Hz -100 kHz	faible	moyenne
Zhang 2016 [90]	50 Hz	3 mT	inférieure	*D melanogaster*	réponse accrue au choc thermique (Hsp)	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Bindokas 1984 [188]	60 Hz	765kV lignes hautes tension. 55, 80, 95 µA	supérieure	Bees	profil protéique des hémocytes et de l'hémolymphe comme indicateur de stress	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Michel 1999 [91]	ELF -EMF 50 Hz co- stress avech temp 34 à 27°C	100 µT +/- 2%	inférieure	Souches Droso 3 dans lesquelles le gène rapporteur lacZ est contrôlé par les gènes de segmentation engrailed (en), fushi tarazu (ftz) ou sloppy paired (slp).	le co-stress (ELF-EMF + temp) a montré des anomalies plus souvent que le stress temp seule, le co-stess a augmenté le temps de développement.	neg	0 Hz -100 kHz	faible	

Goodman 1992 [189]	1.5 to 70 Hz 5 diff types d' ELF EM,			*Drosophila*	Changements dans les modèles de traduction induits par les champs EM ELF dans les cellules exposées (bouffées chromosomiques à des loci définis et augmentation de la protéine Hsp70, etc.	neg	0 Hz -100 kHz	faible	
Lupi 2020 [92]	50Hz	0-1500 V/m	inférieure	abeille	Augmente les présences de biomarqueurs de stress	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Migda 2020 [190]	50 Hz	5.0 kV/m, 11.5 kV/m, 23 kV/m, et 34.5 kV/m	supérieure	abeille	augmentation des activités du système antioxydant. A partir de 23kV/m	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Maliszewska 2018 [191]	50 Hz			*Periplaneta americana*	affecte l'état oxydatif et la perception de la chaleur	neg	0 Hz -100 kHz	haute	
Wan 2019 [63]	GMF	GMF50µT vs. GMF45µT	inférieure	*Nilaparvata lugens*	les trois phénotypes morphologiques et comportementaux ont réagi à une petite différence d'intensité du champ 10 magnétique entre les emplacements simulés au nord et au sud de la manière attendue le long de la 11 route migratoire. On a également constaté des réponses magnétiques cohérentes dans	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	

					l'expression du gène Cry1 (cryptochrome 1) de type drosophile, lié au phototaxisme, et dans les niveaux de deux substrats énergétiques primaires utilisés pendant le vol, le triglycéride et le tréhalose.				
Todorovic 2014 [192]	SMF	2.4 T	supérieure	*Drosophila subobscura*	effet sur la super oxyde dismutase	neg	0 Hz -100 kHz	haute	
Todorovic 2012 [89]		6 mT	inférieure	*Baculum extradentatum*	module la défense antioxydante	neg	0 Hz -100 kHz	moyenne	
Lee 2008 [30]	835 MHz	DAS 1.6 W/kg à DAS 4.0 W/kg	supérieure	*Drosophila*	Activation de la signalisation MAPKS, diminution de la viabilité à une DAS de 4,0 W/kg, aucun effet dans la gamme ANSI.	neg	100 kHz – 6 GHz	faible	faible
Lupi 2021 [117]	100 kHz - 2.5Ghz	environ 1 µT	supérieure	abeille	effet synergique avec les pesticides sur l'augmentation de la présence de biomarqueurs de stress (ACE, CAT, GST)	neg	100 kHz – 6 GHz	moyenne	

2) Grille d’évaluation de la qualité des études

Domaine	Critères	Score base sur le nombre de questions ayant pour réponse "Oui"
Exposition/dose	Les conditions d’exposition sont-elles clairement définies ?	Faible < 3 <= Moyen < 7 <= Haut
	Les potentiels effets secondaires sont-ils pris en compte ?	
	L’intensité de l’exposition a-t-elle été mesurée ?	
	La repose dose-effet a-t-elle été testée ?	
	Y a t-il assez d’information pour reproduire l’étude ?	
	Les mesures d’exposition sont-elles valides ?	
	Aucune erreur pendant les mesures d’exposition ?	
	Les expositions different elles significativement les unes des autres ?	
	La population d’étude est-elel assez grande ?	
méthodes	Le protocole est-il pertinent ?	Faible< 2 <= Moyen < 3 <= Haut
	Le groupe contrôle est-il approprié ?	
	Est-ce que les facteurs confondants sont pris en compte ?	

	L’hypothèse est formulée et testée clairement	
Statistics	Les méthodes statistiques sont-elles appropriées ?	Faible <2 <= Haut
	Les données sont-elles proprement nettoyées/traitées ?	
	Les intervalles de confiance sont-ils rapportés ?	

3) Limites d’immissions légales des RNI définies par l’ORNI et l’ICNIRP

Use	Frenquency	EF	MF	PFD (W/m²)	PFD (µW/cm²)	PFD (mW/cm²)
Mobile Phone	400 MHZ	28 V/m	0,092 µT	2,08	207,96	0,21
	800 MHz	39 V/m	0,13 µT	4,03	403,45	0,40
	900 MHZ	42 V/m	0,138 µT	4,68	467,90	0,47
	1800 MHz	58 V/m	0,195 µT	8,92	892,31	0,89
	2100 MHz	61 V/m	0,20 µT	9,87	987,00	0,99
	2600 MHz	61 V/m	0,20 µT	9,87	987,00	0,99
	2,600 - 300 GHz	61 V/m	0,20 µT	9,87	987,00	0,99
powerlines	50 Hz	5 kV/m	100 µT	66313,00	6631299	6631,30
	16.7 Hz	10 kV/m	300 µT	265251,99	26525198,	26525,20

4) Evaluation de la qualité des études sélectionnées

Article	Exposition	Méthode	Satistiques	Qualité générale
Acosta-Avalos 2015	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Atli 2006	Faible	Haute	Haute	Faible
Atli 2007	Faible	Haute	Haute	Faible
Bartos 2019	Faible	Haute	Haute	Faible
Becker 1976	Faible	Faible	Faible	Faible
Bindokas 1984	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Bindokas 1988	Faible	Haute	Haute	Faible
Bindokas 1989	Faible	Haute	Haute	Faible
Cammaerts 2012	Faible	Moyenne	Faible	Faible
Cammaerts 2013	Faible	Haute	Haute	Faible
Cammaerts 2014	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Chae 2008	Haute	Haute	Haute	Haute
Chavdoula 2010	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Darney 2016	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Diebolt 1978	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Dimitrijevi} 2014	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Dyka 2016	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Edwards 1960	Faible	Haute	Haute	Faible
Erdogah 2019	Faible	Haute	Haute	Faible
Eskov 2006	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Favre 2011	Faible	Haute	Faible	Faible
Fedele 2014	Faible	Haute	Haute	Faible
Ferrari 2014	Faible	Haute	Haute	Faible
Fratzak 2020	Faible	Haute	Haute	Faible
Gaikwad 2016	Moyenne	Haute	Faible	Faible
Gary 1981	Haute	Haute	Haute	Haute
Geronikolou 2014	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Goodman 1982	Faible	Haute	Haute	Faible
Graham 2000	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Greenberg 1972	Faible	Haute	Haute	Faible
Greenberg 1976	Haute	Haute	Haute	Haute
Hamnerius 1979	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Hamnerius 1985	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Ilijin 2011 a	Faible	Haute	Faible	Faible
Ilijin 2011 b	Faible	Haute	Faible	Faible
Jackson 2011	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Jankowska 2015	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Kale 1982	Faible	Faible	Haute	Faible
Kawasaki 2020	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Kefuss 1999	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Kermarrec 1981	Faible	Faible	Faible	Faible

Article	Exposition	Méthode	Satistiques	Qualité générale
Kholy 2012	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Kikuchi 1998	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Kisliuk 1977	Faible	Moyenne	Faible	Faible
Kisliuk 1979	Faible	Faible	Faible	Faible
Lajzaro 2016	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Lee 2008	Faible	Haute	Haute	Faible
Leucht 1984	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Liddle 1986	Faible	Haute	Haute	Faible
Lopatina 2019	Faible	Haute	Haute	Faible
Luo 2018	Moyenne	Moyenne	Haute	Moyenne
Lupi 2020	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Lupi 2021	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Ma 1993	Faible	Haute	Haute	Faible
Makarov 2014	Faible	Haute	Haute	Faible
Maliszewska 2018	Haute	Haute	Haute	Haute
Manta 2017	Faible	Haute	Haute	Faible
Margaritis 2014	Faible	Haute	Haute	Faible
Martel 1982	Faible	Haute	Haute	Faible
Martin 1989	Faible	Haute	Haute	Faible
Michel 1999	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Migda 2020	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Mittler 1977	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Odemer 2019	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Olsen 1982	Faible	Faible	Faible	Faible
Ondracek 1976	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Orlov 1990	Moyenne	Moyenne	Haute	Moyenne
Panagopoulos 2004	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Panagopoulos 2007	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Panagopoulos 2007	Moyenne	Moyenne	Haute	Moyenne
Panagopoulos 2010 a	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Panagopoulos 2010 b	Faible	Haute	Haute	Faible
Panagopoulos 2012	Faible	Haute	Haute	Faible
Panagopoulos 2013	Moyenne	Haute	Faible	Faible
Panagopoulos 2019	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Pandir 2014	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Pereira 2019	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Perumpral 1978	Faible	Haute	Haute	Faible
Poh 2017	Faible	Faible	Faible	Faible
Prolic 1995	Faible	Faible	Haute	Faible
Prolic 2003	Moyenne	Moyenne	Haute	Moyenne
Ramirez 1983	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Rosi 2019	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Sagioglou 2014	Faible	Haute	Haute	Faible

Article	Exposition	Méthode	Satistiques	Qualité générale
Schiff 1991	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Seada 2016	Faible	Faible	Haute	Faible
Shakina 2011	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Sharma 2010	Faible	Faible	Faible	Faible
Shckorbatov 2007	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Sheiman 2003	Faible	Faible	Faible	Faible
Sheiman 2009	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Shepherd 2018	Haute	Haute	Haute	Haute
Shepherd 2019	Faible	Haute	Haute	Faible
Shepherd 2021	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Shuai 2014	Faible	Moyenne	Faible	Faible
Spasic 2015	Moyenne	Moyenne	Haute	Moyenne
Srygley 2006	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Stanojevic 2005	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Starick 2005	Faible	Haute	Haute	Faible
Stout 1992	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Stout 1995	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Sudaryadi 2020	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Tegenkamp 1969	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Todorovic 2011	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Todorovic 2012	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Todorovic 2014	Haute	Haute	Haute	Haute
Todorovic 2015	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Todorovic 2020	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Tomanova 2016	Faible	Haute	Haute	Faible
Vacha 2008	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Vacha 2009	Moyenne	Moyenne	Haute	Moyenne
Valadez-Lira 2017	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Vargovà 2018	Faible	Haute	Haute	Faible
Vijver 2013	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Vilic 2017	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Wan 2016	Faible	Haute	Haute	Faible
Wan 2019	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Watson 1997	Faible	Haute	Haute	Faible
Wehner 1970	Faible	Moyenne	Haute	Faible
Weisbrot 2003	Faible	Haute	Faible	Faible
Wiegmann 2020	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Wyszkowska 2016	Haute	Haute	Faible	Faible
Wyszkowska 2018	Moyenne	Faible	Faible	Faible
Yanagawa 2014	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne
Yanagawa 2020	Faible	Haute	Haute	Faible
Zhang 2016	Faible	Haute	Haute	Faible
Zmejkoski 2017	Faible	Haute	Haute	Faible