

Les 17 et 18 septembre 2020, certains médias français ont fait savoir qu'une méta-étude d'un chercheur allemand, Alain Thill, intitulée « Effets biologiques des champs électromagnétiques sur les insectes », avait été publiée en allemand (*Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Insekten. umwelt • medizin • gesellschaft* 3/2020).

L'information a été vite reléguée, mais si les observations rapportées sont exactes\*, elles méritent d'être mieux connues. Une publication est prévue à l'avenir en anglais, mais pour ma propre connaissance – je ne lis pas l'allemand – et pour en faire profiter sans attendre, j'ai entrepris de traduire l'article. La traduction a été faite grâce à DeepL (<https://www.deepl.com/>) puis corrigée autant que possible. Il manque le sommaire, les références sont dans la publication originelle : <https://www.emfdata.org/en/studies/detail&id=566>

Mes seuls commentaires à l'issue de cette traduction sont en premier lieu qu'il est toujours utile de relire John Ioannidis\* « Why Most Published Research Findings Are False », en second lieu que ce qui est rapporté par Alain Thill appelle à une recherche fondamentale structurée de haut niveau.

JPB, 10/2020

Revue

# Effets biologiques des champs électromagnétiques sur les insectes

Alain Thill

## Résumé

Le nombre d'insectes diminue dans le monde entier à un rythme alarmant. On sait que, parmi d'autres causes, l'utilisation de pesticides et les pratiques agricoles modernes y jouent un rôle majeur. Les effets cumulés de multiples toxines à faible dose et la propagation des toxines dans la nature n'ont pas encore fait l'objet de recherches méthodiques, ou n'en sont qu'à leurs débuts.

Les recherches existantes mettent en évidence un autre facteur d'origine anthropique qui pourrait avoir des effets nocifs subtils : l'utilisation de plus en plus fréquente de champs électromagnétiques (CEM) générés par des moyens techniques, tels que la haute tension, les téléphones portables et les réseaux locaux sans fil (WLAN). L'infrastructure de la prochaine génération de technologies de téléphonie mobile (5G) est actuellement en cours de construction sans avoir été testée pour d'éventuels effets toxiques. Avec la quête d'ubiquité technologique de l'humanité, même les effets modestes des champs électromagnétiques sur les organismes pourraient finalement atteindre un niveau de saturation qui ne peut plus être ignoré.

Cette revue systématique évalue la situation des études concernant les effets toxiques des champs électromagnétiques (CEM) sur les insectes. On y trouve également un examen général des effets et des mécanismes signalés de l'exposition aux CEM, qui traite des nouvelles découvertes en biologie cellulaire. 72 des 83 études analysées ont trouvé un effet. Des effets négatifs ont été décrits dans des études : Restrictions du sens de l'orientation, réduction de la capacité de reproduction et de la fertilité, léthargie, changements dans la dynamique de vol, incapacité à trouver de la nourriture, réduction de la vitesse de réaction, comportement de fuite, perturbation du rythme circadien, blocage de la chaîne respiratoire et dommages aux mitochondries, mauvaise activation du système immunitaire, augmentation du nombre de ruptures de brins d'ADN.

Certains mécanismes d'action qui conduisent à ces dommages sont identifiés. Les CEM affectent le métabolisme, entre autres ils affectent les canaux calciques contrôlés par la tension, par exemple dans la transmission de l'excitation neuronale et dans le tissu musculaire, ce qui peut conduire à une suractivation de la transduction des signaux et de la chaîne respiratoire avec production de radicaux libres d'oxygène et par conséquent à un stress cellulaire oxydatif.

Les résultats montrent que les CEM pourraient avoir un impact sérieux sur la vitalité des populations d'insectes. Dans certaines expériences, il a été constaté que malgré de faibles niveaux d'exposition aux émetteurs, des effets nocifs se produisaient après plusieurs mois. Des champs 100 fois inférieurs aux limites de l'ICNIRP pourraient déjà avoir des effets. Dans le contexte du déclin rapide des insectes et de la poursuite de l'expansion des sources de champs électromagnétiques à haute fréquence, il est non seulement urgent de poursuivre les recherches, mais aussi d'étudier les interactions avec d'autres agents nocifs comme les pesticides. Lors de la planification de l'expansion de la téléphonie mobile, les habitats des insectes doivent être protégés contre l'exposition aux CEM.

## 1. Les effets biologiques des champs électromagnétiques (CEM)

Le déclin des insectes annoncé publiquement récemment, qui a commencé il y a plusieurs décennies, semble être causé par un certain nombre de facteurs aux effets cumulatifs (Hallmann et al. 2017 ; Sánchez-Bayo et Wyckhuys 2019, Fig. 1). Bien que l'on suppose que les causes principales sont à rechercher dans l'utilisation des pesticides et dans la restructuration ou la destruction des habitats naturels, d'autres effets négatifs de ce type ne peuvent être exclus - par exemple l'effet des substances de type hormonal, des métaux lourds et des champs électromagnétiques, tous facteurs dont l'occurrence dans la nature a augmenté de manière spectaculaire au cours des dernières décennies (Sharma et al. 2016 ; Rhind 2009 ; Bandara et Carpenter 2018).

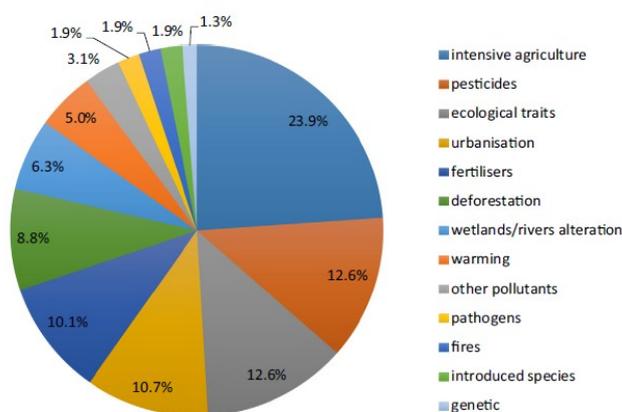


Fig. 1 : Principales causes de la mortalité récente des insectes. Source : Sánchez-Bayo et Wyckhuys 2019

Cette revue traite des effets des champs électromagnétiques de basse fréquence et de radiofréquence sur les insectes. Les effets des champs magnétiques basse fréquence (et des CEM) des lignes électriques (fréquence du courant de 50 Hz) sont déjà relativement bien compris, par exemple en ce qui concerne l'incidence de la leucémie chez l'homme (rapport final ARIMMORA 2015) ou les dommages causés aux insectes (Wyszkowska et al. 2016 ; Maliszewska et al. 2018 ; Shepherd et al. 2018). La haute tension et l'électricité de réseau sont devenues la norme en Europe à partir de 1950. Moins bien étudiés sont les nouveaux champs électromagnétiques à haute fréquence (CEM-HF) dans la gamme des micro-ondes, tels qu'ils sont utilisés pour les réseaux de téléphonie mobile, mais aussi les réseaux locaux sans fil (WLAN) et les applications similaires (à partir de 1990). Dans le cas des CEM à basse fréquence, des dispositifs expérimentaux adéquats, appelés bobines de Helmholtz, sont disponibles depuis des décennies pour appliquer les CEM caractéristiques aux organismes en laboratoire. En comparaison, il n'existe pas d'émulations adéquates pour les CEM à haute fréquence, comme ceux émis par les antennes de téléphonie mobile ou les routeurs WLAN, ou bien ils sont très chers et/ou nécessitent une autorisation (répéteurs de téléphonie mobile). La manière la plus réaliste de le faire actuellement est d'utiliser les

téléphones portables comme émulations de mâts de téléphonie mobile et de véritables routeurs WLAN pour les tests en laboratoire.

Puisque nous sommes sur le point de développer la prochaine génération de communications mobiles (5G), dont l'infrastructure pourrait inclure une nouvelle augmentation de l'énergie rayonnée dans le secteur urbain, la sécurité de cette technologie devrait être démontrée à l'avance - comme c'est indispensable pour la commercialisation de nouveaux médicaments (Bandara et Carpenter 2018).

En général, une distinction est faite entre les effets biologiques thermiques et non thermiques des champs électromagnétiques. L'effet thermique est basé sur le chauffage direct du tissu (comme dans un four à micro-ondes). En dessous des intensités où l'on peut mesurer le réchauffement des tissus, plusieurs autres effets non thermiques ont été décrits, par exemple l'effet auditif des micro-ondes (chez l'homme), également appelé effet Frey, dont le mécanisme est connu depuis plusieurs décennies (transformation électroélastique des micro-ondes en ondes sonores dans le crâne, voir Chou, Guy et Galambos 1982 ; Belyaev et Markov 2015). La résonance dite paramétrique ionique, qui est associée à une modification de l'électroencéphalogramme humain et animal, est également considérée comme scientifiquement prouvée (Hinrikus et al. 2017 ; Mohammed et al. 2013). Bien qu'elles ne soient pas encore clarifiées de manière concluante, il y a de plus en plus de preuves que la résonance paramétrique est un sous-produit de l'activation des canaux ioniques ionique à tension contrôlée et est associée à la libération de calcium (Agnati et al. 2018 ; Pall 2016 ; Sun et al. 2016 ; Belyaev et Markov 2015) - et affecte donc tous les organismes animaux et végétaux.

En résumé, les effets biologiques d'une exposition chronique aux CEM sont approximativement les suivants : Les CEM agissent (directement ou indirectement) sur les canaux calciques voltage-dépendants (CCVD) et conduisent à leur ouverture et à une libération accrue de calcium.

Les canaux ioniques voltage-dépendants (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) ainsi que le récepteur NMDA semblent être sensibles aux champs électromagnétiques non thermiques (c'est-à-dire très faibles) et cela est probablement lié aux fonctions utiles de la perception des propres champs électromagnétiques du corps ("couplage éphaptique"), qui sont générés par l'activité des neurones et des astrocytes (Martinez-Banaclocha 2020 ; Chiang et al. 2019 ; Hales et Pockett 2014). Ainsi, le mécanisme de couplage éphaptique semble jouer un rôle actif dans l'oscillation synchrone des cellules cardiaques (Weinberg 2017) ainsi que dans le traitement des mélanges olfactifs (antennes ou nerf olfactif) (Zhang et al. 2019 ; Bokil et al. 2001) et également dans la coordination du mouvement dans le cervelet (Han et al. 2018). Dans ces cas, cependant, les canaux de sodium voltage-dépendants (Weinberg 2017 ; Han et al. 2018), les canaux de potassium (Fogle et al. 2015) ou les récepteurs NMDA (Chiang et al. 2019) - qui sont sensibles à la tension et qui canalisent le sodium et le calcium - se sont avérés être les macromolécules directement influencées par les CEM. En outre, on soupçonne que les ondes calciques astrocytiques

influencent et régulent l'activité neuronale sur une grande surface et dans une large mesure par couplage éphaptique (Agnati et al. 2018 ; Martinez-Banaclocha 2020).

L'activation par les CEM des canaux sodium et potassium voltage-dépendants ou des récepteurs NMDA conduit indirectement, en déclenchant ou en renforçant les potentiels d'action, à une activation accrue des CCVD synaptiques et à la libération de calcium (Pilla 2012) ; la neurotransmission basée sur les potentiels d'action via les synapses chimiques nécessite une activation des CCVD (Atlas 2013).

Le calcium est l'un des messagers secondaires les plus courants dans tous les organismes ; l'augmentation des niveaux de calcium a un effet activateur sur la chaîne respiratoire et les muscles (Kim et al. 2019). Le calcium libère à son tour de l'oxyde nitrique (NO) par l'intermédiaire de la calmoduline. La suractivation de la neurotransmission dépendante du calcium (et éventuellement des voies métaboliques) conduit à la production de radicaux libres d'oxygène (espèces réactives de l'oxygène, ROS) tels que le peroxy-nitrite, c'est-à-dire au stress oxydatif.

L'augmentation chronique du stress oxydatif a divers effets toxiques sur les organismes, par exemple en bloquant la chaîne respiratoire, en endommageant les mitochondries, en désactivant le système immunitaire et en augmentant le taux de mutation du matériel génétique (Valko et al. 2007 ; Saliev et al. 2019).

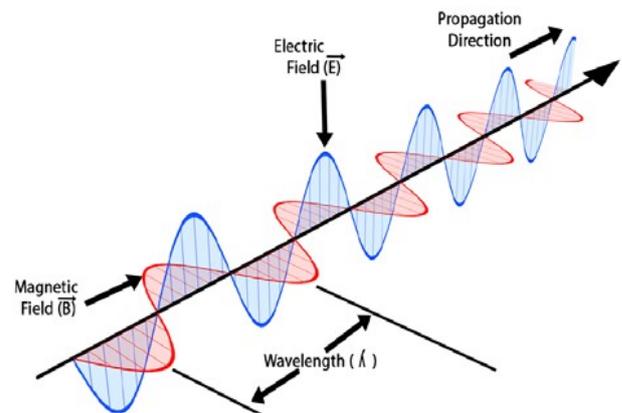


Fig. 3 : Onde électromagnétique. L'intensité du champ électrique en bleu, l'intensité du champ magnétique en rouge. L'intensité de rayonnement ou la densité de puissance d'un CEM peut être dérivée des deux champs (voir annexe). Source : <https://byjus.com/physics/characteristics-of-em-waves/>

### 1.1 Sens magnétique

Il a été démontré que les fluctuations naturelles du champ géomagnétique (CGM), dues par exemple à des éruptions solaires, provoquent un stress chez les animaux. Par exemple, l'effet est très bien documenté par le groupe de recherche de Krylov sur les poissons et les daphnies (Krylov 2017). Une forte corrélation a également été constatée chez les abeilles (Ferrari et Tautz 2015).

## ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

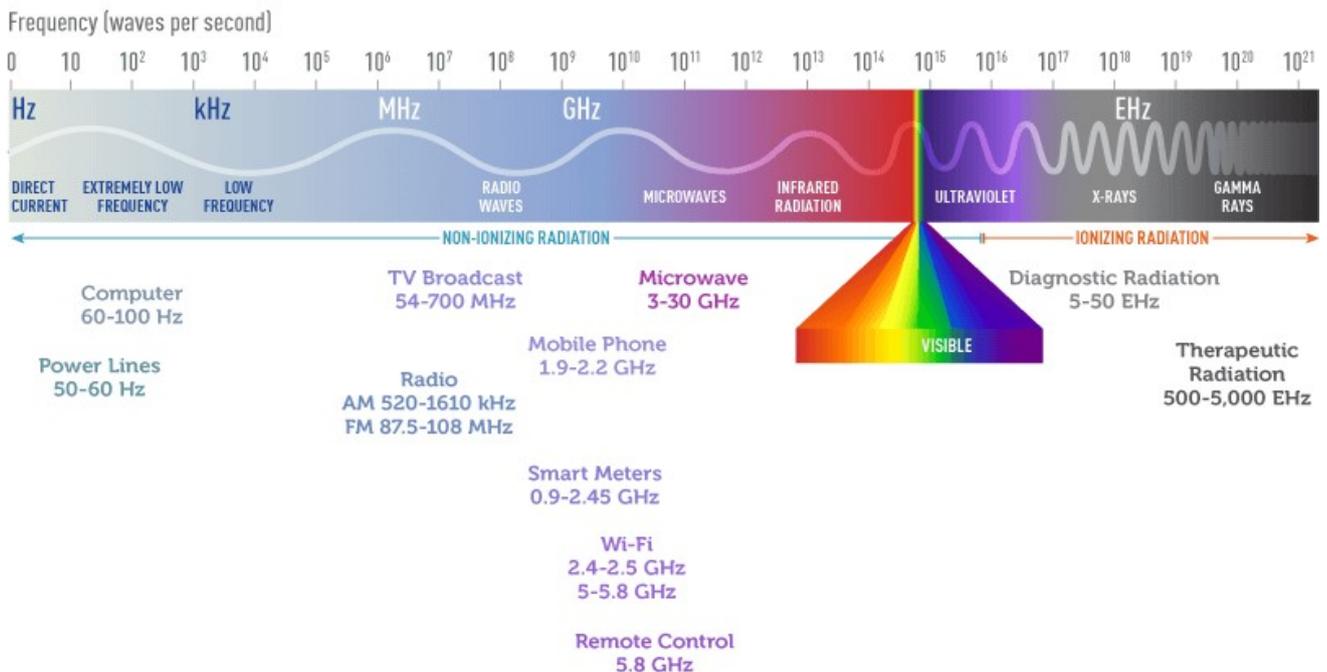


Fig. 2 Spectre électromagnétique. Source : <https://thinktankgreen.com/emf-testing/facts-education/electromagnetic-spectrum/>

En 2019, Guijun Wan et d'autres ont apporté la preuve expérimentale qu'en l'absence du champ magnétique naturel de la terre, le comportement alimentaire et le développement des criquets sont perturbés. Citation : "Ces résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle de fortes variations de l'intensité des CGM peuvent influencer le comportement alimentaire des insectes et les processus de régulation sous-jacents. Nos résultats fournissent des preuves supplémentaires que la magnétoréception et les réponses réglementaires aux changements des CGM peuvent influencer une variété de processus biologiques. »

L'existence d'un sens magnétique est décrite dans la plupart des ordres d'insectes : par exemple, chez les papillons, les scarabées, les mouches, les fourmis et les abeilles (Hyménoptères) ainsi que les termites et les blattes (Guerra, Gegear et Reppert 2014 ; Gegear et al. 2008 ; Oliveira et al. 2010 ; Lambinet et al. 2017 ; Vacha, Puzova et Kvalcova 2009).

Cependant, la question du sens magnétique est assez complexe et n'a pas encore été clarifiée de manière concluante dans le détail, car différents organismes utilisent différents mécanismes (Clites et Pierce 2017 ; Nordmann, Hochstoeger et Keays 2017). Au niveau moléculaire, deux systèmes de magnétoréception typiques mais différents ont été découverts : le cryptochrome et la magnétiite.

## 1.2 Le cryptochrome

Le cryptochrome (CRY) est une molécule de la famille des récepteurs de la lumière bleue qui régule le rythme circadien

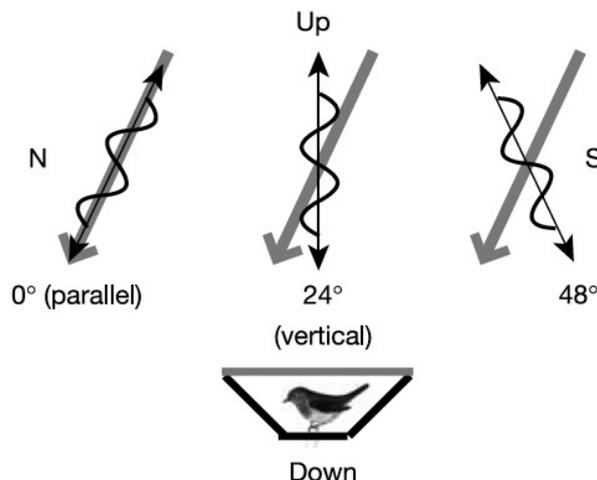
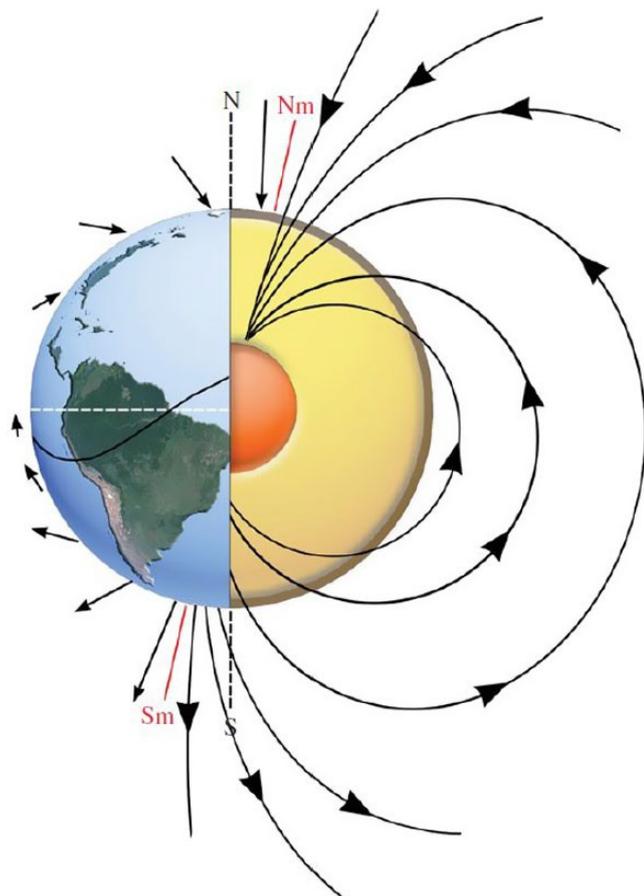


Fig. 4a + b : (a) Champ magnétique de la terre. Source : Shaw et al. 2015. (b) Effet de l'angle du champ EM entrant sur le sens magnétique des oiseaux. Flèche grise : Inclinaison du champ magnétique terrestre. D'après Ritz et al. 2004.

chez les insectes. En outre, le cryptochrome est magnétosensible dès qu'il est activé par une lumière de haute énergie (via le mécanisme de la paire de radicaux) (Georgiou 2010). Le CRY se trouve dans les yeux de la plupart des insectes et des vertébrés ainsi que dans leur cerveau (c'est-à-dire dans les neurones ventro-latéraux des insectes ou dans le noyau suprachiasmatique - NSC des vertébrés), où elle fait partie de la rythmique circadienne (horloge moléculaire, c'est-à-dire minuterie, voir Solov'yov et Schulten 2014).

Fedele et al. 2014 ont montré avec des mutants de cryptochrome de drosophile que le cryptochrome est nécessaire pour le retard du rythme circadien induit par la lumière et les CEM et que ces effets ont effectivement lieu dans le cerveau de la drosophile, mais pas dans le NSC des souris.

En outre, ils pourraient montrer que le magnétorécepteur réel ne doit pas nécessairement être le cryptochrome lui-même. Qin et al. 2016 ont montré que le cryptochrome est associé à la protéine CG8198 (MagR - le magnétorécepteur putatif), qui sont tous deux localisés dans l'œil.

Fogle et al. 2015 ont montré que CRY active le senseur de tension (ou senseur redox) du canal potassique KvB voltage-dépendant, appelé *Hyperkinetics* (dans le cerveau de la drosophile), ce qui conduit à une augmentation de la vitesse d'inflammation du potentiel d'action, par laquelle les radicaux libres formés dans une étape intermédiaire de la CRY, qui n'a pas encore été clarifiée, sont transférés à *Hyperkinetics* (Hk).

Sherrard et al. 2018 ont enquêté sur la production de radicaux libres chez la drosophile. Les dispositifs PEMF (champ électromagnétique pulsé) sont des bobines de Helmholtz aux caractéristiques prédéfinies qui, par exemple, provoquent une cicatrisation plus rapide des fractures ou des blessures osseuses (Pilla 2012). La drosophile de type sauvage a montré une réaction d'aversion et une formation de radicaux libres (ROS) après irradiation avec un dispositif médical PEMF à puissance non

thermique (2 mT). Ce n'était pas le cas de la drosophile mutante dont le cryptochrome avait été enlevé. Un effet dans le type sauvage n'a été constaté qu'en présence d'une lumière bleue (ou blanche) supplémentaire, car le cryptochrome des insectes a besoin de photons bleus à haute énergie pour l'activer (aucun effet n'a été observé en lumière rouge). Bien que ce ne soit pas l'hypothèse des auteurs, cela permet de conclure que la toxicité des CEM chez la drosophile se cumule avec la présence de lumière artificielle (à forte intensité de lumière bleue).

Sherrard et al. 2018 ont pu montrer avec des cultures cellulaires du papillon hibou (*Spodoptera frugiperda*) que le cryptochrome est nécessaire à la formation de radicaux libres lorsqu'il est traité avec des bobines PEMF - et cela concerne probablement toutes les sources de CEM basse fréquence. On ne sait pas encore si le cryptochrome est également nécessaire pour le stress oxydatif des cellules (chez les insectes) lorsqu'elles sont irradiées par des CEM de radiofréquence. L'expérience de Bartos et al. 2019 avec les blattes allemandes (*Blattella germanica*) prouve que des interactions complexes supplémentaires entre le champ magnétique terrestre local (ou champs magnétiques artificiels) et les CEM sont cruciales pour les processus mécaniques quantiques (mécanisme de paires de radicaux) qui activent le cryptochrome, comme cela a pu être montré plus tôt pour les oiseaux (Ritz et al. 2004, Fig. 4) et avait été analysé théoriquement en détail par Warnke (Warnke 2009).

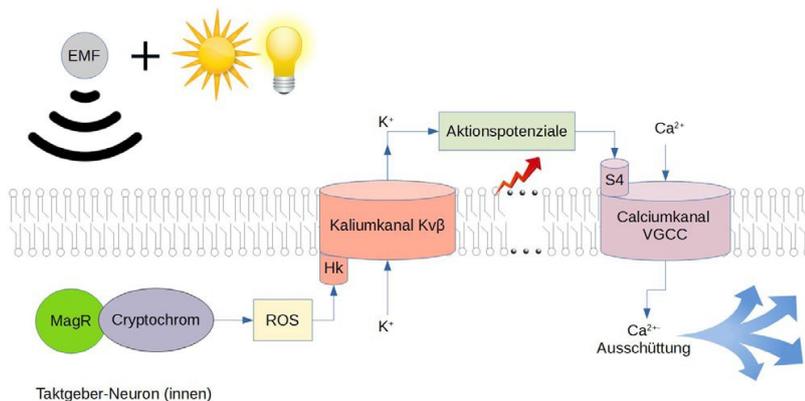


Fig. 5 : Mécanisme d'activation du cryptochrome dans les neurones de l'horloge de la drosophile. En présence de lumière bleue (ou blanche) et de CEM, le cryptochrome est activé et produit des radicaux libres (ROS). Les ROS entraînent l'ouverture de canaux potassiques et le déclenchement de potentiels d'action qui, à leur tour, activent les CCVD synaptiques. Cela entraîne une augmentation de la teneur en calcium intracellulaire et la libération de neurotransmetteurs.

Contrairement à l'hypothèse de l'activation du CCVD, l'activation du cryptochrome par les CEM chez les oiseaux et les insectes a été clairement prouvée et a été largement élucidée ; cela conduit à une nouvelle étape, au moins chez la drosophile, vers l'activation du CCVD. L'hypothèse des CCVD est basée sur de nombreuses observations selon lesquelles les CEM provoquent la libération de calcium et que les bloqueurs des canaux calciques protègent contre les effets négatifs (Pall 2013) - cependant, le calcium et les CCVD sont impliqués dans de nombreux processus de neurotransmission - par exemple dans les synapses excitatrices (Caddick et al. 1999 ; Atlas 2013). En principe, rien ne s'oppose à l'hypothèse selon laquelle les CCVD

peuvent être activés (ouverts) par les CEM, à la fois directement et indirectement via le cryptochrome (et d'autres macromolécules) (Damulewicz et Mazzotta 2020 ; Catterall 2010 ; Littleton et Ganetzky 2000). Cependant, seule la voie d'activation du cryptochrome (par les CEM) dépendant de la lumière dans les neurones de l'horloge de la drosophile, qui conduit à une augmentation du taux d'action de la mise à feu potentielle et produit probablement des effets nocifs décrits par une libération accrue de calcium au niveau des synapses, mais pas encore compris en détail, a été prouvée jusqu'à présent.

### 1.3 Magnétite

Tous les insectes possèdent des cryptochromes dans la rétine et le cerveau. Cependant, les cryptochromes rétinien ne fonctionnent comme magnétosenseurs qu'en présence de lumière bleue. Les insectes qui sont (également) actifs dans l'obscurité semblent avoir un sens magnétique basé sur la magnétite, ce qui a été confirmé expérimentalement chez les abeilles, les fourmis et les termites (Lambinet et al. 2017 ; Liang et al. 2016 ; Shaw et al. 2015).

Sur le mécanisme de perception par la magnétite, Hsu et d'autres font un rapport en 2007 : « Nous avons observé des changements de la taille des grains magnétiques dans les trophées lorsqu'un champ magnétique supplémentaire est appliqué aux cellules. Une libération simultanée d'ions calcium a été observée au microscope confocal. Cette variation de taille a entraîné une augmentation du Ca<sup>2+</sup> intracellulaire, qui a été bloqué par la colchicine et la latrunculine B, qui sont des bloqueurs de la synthèse des microtubules et des microfilaments. Le cytosquelette associé peut ainsi transmettre le signal magnéto et déclencher une réponse neurale. Un modèle du mécanisme de réception magnétique chez les abeilles est proposé, qui pourrait être applicable à la plupart, voire à tous les organismes magnétotactiques. » Cependant, les deux mécanismes pourraient tout aussi bien se produire simultanément mais surtout indépendamment dans l'organisme.

## 2. Aperçu de la situation de la recherche sur le sujet

### 2.1 Examens précédents

#### 2.1.1 Revue de Cucurachi

Citation de Cucurachi et al. 2013 : « Les insectes constituent un système cible utile pour l'étude des RF-EMF en raison de leur taille limitée, de leur cycle de vie court et de la possibilité de détecter facilement les défauts de développement. (Schwartz et al. 1985). » Sur 25 études sur les insectes, 22 ont été évaluées comme "effet" et 3 comme "aucun effet".

#### 2.1.2 Revue de Balmori

Balmori 2014 fait état de cinq études qui prouvent ou suggèrent des effets sur les insectes - par exemple, l'hypothèse selon laquelle la reconnaissance des fleurs, dont il est prouvé qu'elle est en partie causée par la perception de champs électriques, pourrait être perturbée (Clarke et al. 2013).

### 2.1.3 Rapport de Friesen

Friesen 2014 répertorie environ 64 études concernant les effets des CEM chez les insectes.

### 2.1.4 Revue de Redlarski

Redlarski et al. 2015 rapporte environ 15 études sur la drosophile (toutes les formes de CEM et aussi les champs magnétiques statiques) entre 1985 et 2004, dont 13 ont trouvé un effet.

### 2.1.5 Rapport Eclipse

Dans le cadre de l'initiative européenne Eclipse, un rapport détaillé a été rédigé à la demande de l'ONG anglaise "Bug-Life" (Malkemper et al. 2018 ; Goudeseune, Balian et Ventocilla 2018). 39 études ont été identifiées et évaluées en fonction des aspects écologiques, dont 26 ont été évaluées en plus en fonction des aspects techniques.

### 2.1.6 Revue de Vandenberg et al.

Vanbergen et d'autres 2019 s'appuient sur le rapport Eclipse (des mêmes chercheurs). Le rapport souligne la nocivité incontestablement prouvée de la lumière artificielle la nuit et la seule nocivité suspectée, mais jusqu'à présent insuffisamment prouvée, des rayonnements électromagnétiques d'origine humaine ("rayonnements électromagnétiques de radiofréquence anthropiques"). Outre le rapport Eclipse, dont la recherche documentaire s'est achevée en juillet 2017, quelques études plus récentes sont incluses ici (décrites ci-dessous), Shepherd et al. 2018 ; Odemer et Odemer 2019 ; et, selon les auteurs, le seul effet clairement prouvé du rayonnement électromagnétique est la perturbation de l'orientation (Wan, Zhao et Xu 2014 ; Sutton et al. 2016 ; Bae et al. 2016).

## 2.2 Etudes ultérieures

Les bibliographies de ces revues ont été extraites et toutes ont été intégrées dans une bibliographie Bibtex collectée à l'aide du programme open source JabRef, ce qui a donné un total de 159 études, dont 101, après un examen plus approfondi, ont porté sur le thème "insectes et CEM".

Étant donné que les analyses ne comprenaient un aperçu complet de la littérature que jusqu'en 2017 (et en détail seulement jusqu'en 2014), une recherche Google Scholar et Pubmed-Central-Search des années 2015-2020 a été effectuée en plus, avec les termes de recherche suivants : un de : Insecte, invertébré, animal, faune sauvage, biodiversité, abeille, drosophile, pollinisateur ET tous les termes suivants (avec « ou ») : "EMR ; EMF ; électrosmog ; champ électromagnétique ; rayonnement électromagnétique ; électromagnétique".

Ces deux collections de littérature ont été combinées et d'autres études de la collection de littérature de l'auteur ont été ajoutées, ce qui donne un total de 190 études.

44 études ont traité à elles seules du thème des sens magnétiques chez les insectes et ont déjà été abordées dans le chapitre "Les sens magnétiques". 39 autres études étaient des revues ou des traités purement théoriques.

Il reste 107 études concernant des expériences sur les CEM chez les insectes. 15 études ont été exclues en raison de lacunes qualitatives (mauvaises) ou parce qu'elles ne portaient que sur les champs magnétiques ou électriques statiques ou sur des méthodes techniques d'étude des insectes utilisant les CEM (comme les RFID ou le suivi par radar) ou les effets thermiques (chauffage des insectes par micro-ondes). 6 études étaient des publications doubles, c'est-à-dire que les mêmes expériences étaient publiées deux fois ; ces études ont été classées comme non pertinentes. 83 études portant spécifiquement sur des expériences de CEM sur des insectes ont maintenant toutes été évaluées individuellement et enregistrées dans un tableau récapitulatif. 2 études de radiofréquences qui sont de pures simulations informatiques (Thielens 2020, Thielens 2018) ont été traitées séparément. Ces études sont de nature prospective mais non empirique et n'ont donc pas fourni de points de données pour les graphiques.

Numéro par CEM utilisé :

Faible fréquence : 29 études

Radiofréquence : 55 études (63 expériences)

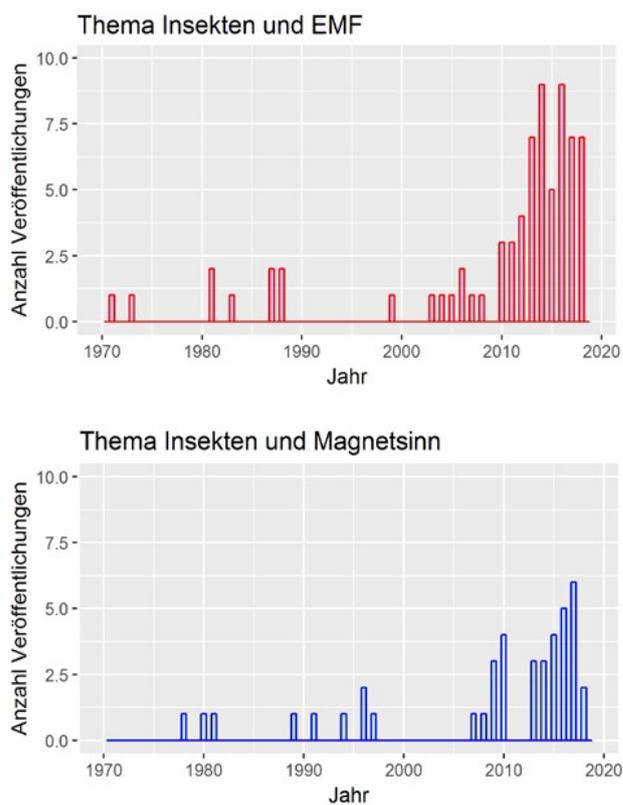


Fig. 6 : Nombre de publications par an

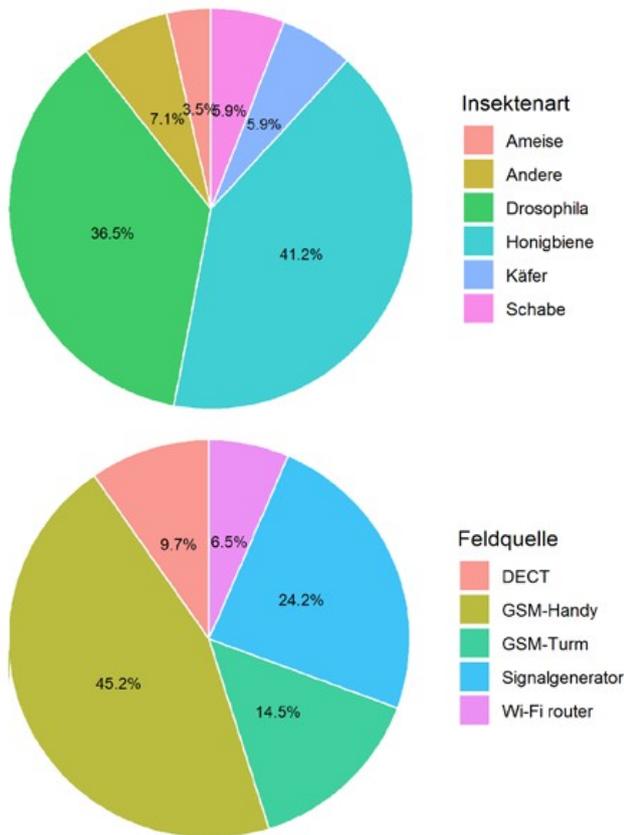


Fig. 7 : Publications par espèces d'insectes et sources de CEM radiofréquence

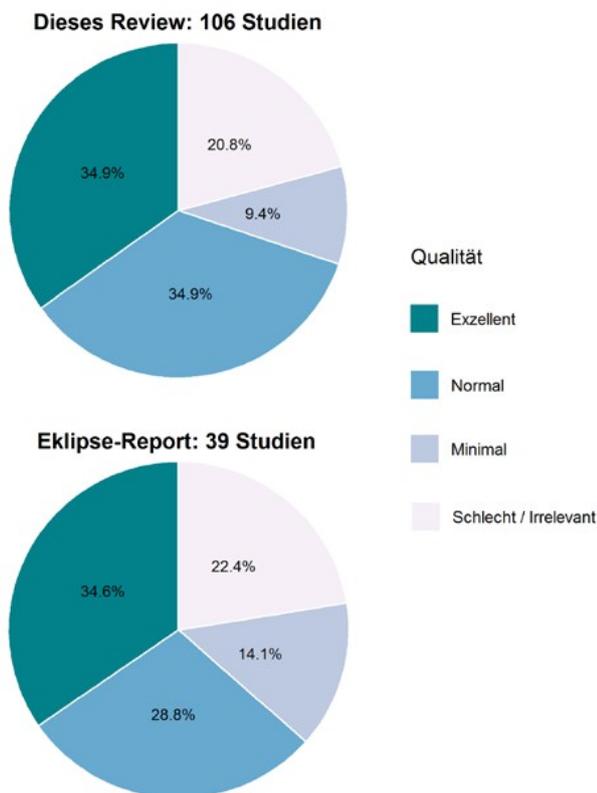


Fig. 8 : Classification de la qualité des études : rapport EKLIPSE comparé à cette revue. Pour le rapport Eklipse : valeur moyenne des évaluations selon les aspects biologiques et techniques.

Dans les 55 études sur les radiofréquences, des intensités de rayonnement (c'est-à-dire des champs électriques) de 0,04 à 38 200 mW/m<sup>2</sup> et de 0,13 à 120 V/m ont été utilisées. La durée d'exposition des insectes aux CEM varie de 6 secondes à 9 mois. La dose de rayonnement (intensité du champ x temps) peut être calculée à partir de l'intensité du champ quantitatif et de la durée d'exposition. Les données statistiques nécessaires à une méta-analyse n'étaient disponibles que dans une poignée d'études, bien que de nombreuses études aient montré des résultats significatifs ( $p < 0,05$ ) et qu'il n'aurait probablement fallu qu'un effort mineur aux auteurs pour fournir des informations supplémentaires telles que les intervalles de confiance (CI) ou les écarts types (SD). Ainsi, aucune analyse de l'état de l'art n'a pu être faite en ce qui concerne la distorsion de la publication.

Au lieu de cela, les effets nocifs décrits dans les études ont été estimés en détail et la nocivité générale (des CEM) a été estimée sur une échelle de 4 points (0 = aucun, 1 = mineur, 2 = modéré, 3 = effet fort), selon le même système que celui utilisé par le IPBES (Potts et al. 2016) et le rapport Eclipse (Malkemper et al. 2018 ; Goudeseune, Balian et Ventocilla 2018). Les "cut-off" ont été déterminés par une variation de 10 %, 25 % et 50 % d'une variable respectivement. Les catégories pour les effets observés (variables) : dommages généraux, mémoire, fonction sensorielle, reproduction/gènes, orientation, préférence, stress oxydatif. Les dommages généraux ont été déterminés en considérant la variable présentant le plus haut degré de variation (significative) en pourcentage comme la plus significative (par exemple, en attribuant un 3 si les dommages à l'ADN augmentent de 50% ou plus, même si toutes les autres variables mesurées présentent un écart inférieur à 50% pour le contrôle). La qualité de chaque étude a également été estimée à l'aide d'une échelle à 4 points (Potts et al. 2016).

Comme leur nom l'indique, les valeurs de toxicité estimées ne sont pas des conclusions exactes et définitives, car elles sont basées sur des études qui, dans la majorité des cas, n'ont pas été réalisées selon les critères de soins habituels (par exemple en toxicologie) et n'ont pas été reproduites dans la plupart des cas. En outre, elles ne sont basées que sur une échelle de 4 points, ce qui ne permet pas d'obtenir des informations précises, mais au moins une estimation approximative. Toutefois, si l'on se penche sur l'histoire de la science, on peut dire que les effets nocifs ont souvent été détectés et décrits très tôt, mais qu'ils ont été ignorés - par exemple en ce qui concerne l'amiante, le plomb et les cigarettes - et qu'il a fallu des décennies pour comprendre les mécanismes et changer la position officielle. L'Agence européenne pour l'environnement (AEE) a produit plusieurs rapports à ce sujet, notamment sous le titre "Lessons learned from early warnings" (Gee et al. 2013).

Concernant la nocivité présumée des différentes sources de CEM (Fig. 11) : le générateur de signaux semble être moins nocif que les types de CEM commerciaux réels à la même intensité de champ. La plupart des générateurs de signaux ne produisent pas les fluctuations fortes et aléatoires caractéristiques qui sont émises, par exemple, par un téléphone mobile en mode conversation ou un WLAN actif.

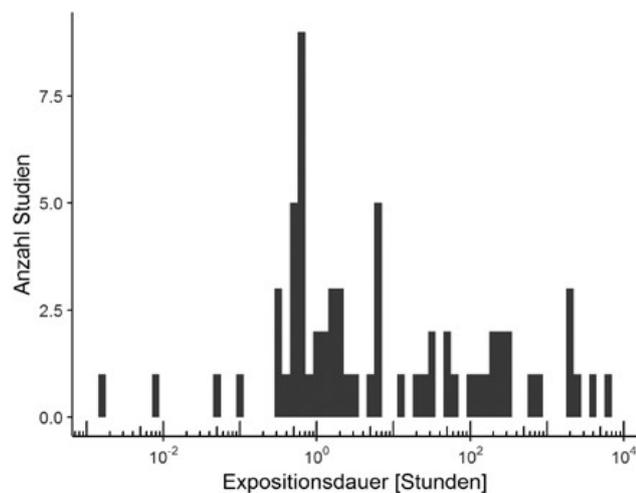
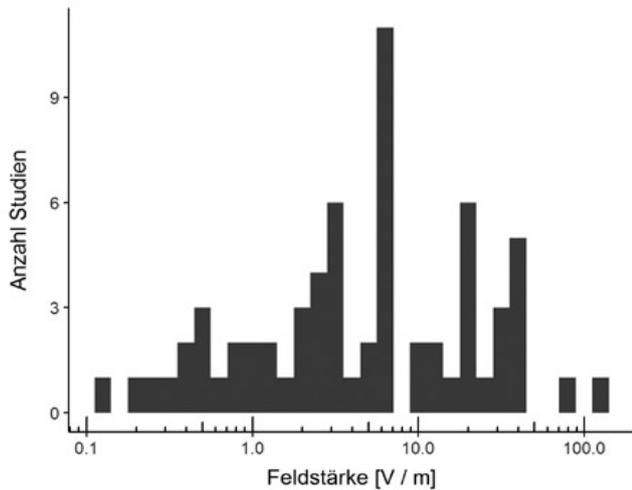
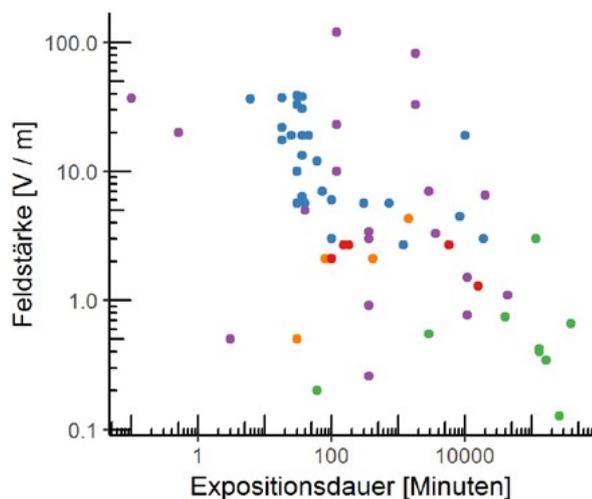


Fig. 9 : Nombre de publications par intensité de champ et durée d'exposition (points de données provenant de 55 études CEM-HF).



#### Feldquelle

- DECT
- GSM-Turm
- Wi-Fi router
- GSM-Handy
- Signalgenerator

Fig. 10 : Intensité du champ électromagnétique pour la durée de l'exposition (points de données de 55 études CEM-HF).

De même, les tours de téléphonie mobile sont apparemment moins nocives que les téléphones mobiles GSM, bien que les deux aient les mêmes caractéristiques de signal. Le champ du signal des tours de téléphonie mobile était de l'ordre de 1,7 V/m en moyenne (valeur médiane 0,66 V/m), alors que le champ à l'exposition avec les téléphones mobiles GSM était de 10,8 V/m en moyenne (valeur médiane 6,5 V/m), cf. fig. 10. Convertie en densités de puissance, la différence quantitative peut être plus facilement détectée (valeurs médianes) : tour de téléphonie mobile 1,15 mW/m<sup>2</sup>, téléphone mobile GSM 112 mW/m<sup>2</sup>. Cela indique que les champs caractéristiques actuels des tours de téléphonie mobile sont, relativement parlant, beaucoup moins nocifs que ceux des téléphones mobiles GSM, DECT et WLAN. Il est probable que les champs typiques actuels des tours de téléphonie mobile sont encore trop faibles pour provoquer rapidement (en quelques jours ou heures) de forts effets biologiques, bien que certaines expériences aient constaté des effets nocifs après plusieurs mois.

La valeur des dommages a également été calculée de manière normalisée, c'est-à-dire divisée par la dose de rayonnement. Les CEM-BF des lignes électriques à haute tension ou des bobines de Helmholtz sont à cet égard beaucoup moins nocives que toutes les CEM-HF testées (voir également la figure 12).

### 3. Liste commentée des études individuelles

#### 3.1 Champs électromagnétiques à basse fréquence, (CEM-BF)

Dès 1976, Altmann et Warnke rapportaient : "Les abeilles dans le champ de haute tension 50-Hz montrent un métabolisme accru en raison d'une activité motrice accrue. À de faibles intensités de champ (inférieures à environ 10 kV/m), l'augmentation du métabolisme n'est pas uniforme dans les différents groupes d'abeilles en cage. À des intensités de champ moyennes (environ 20 kV/m-40 kV/m), l'augmentation du métabolisme est en corrélation avec l'intensité du champ. Lorsque le champ est élevé (plus de 50 kV/m environ), les abeilles sont piquées du côté opposé." D'autres chercheurs ont confirmé les mêmes effets ainsi qu'une perturbation de l'orientation : Wellenstein 1973 ; Greenberg et al. 1981 ; Bindokas, Gauger et Greenberg 1988 ; Korall, Leucht et Martin 1988.

Ramirez et al. 1983 ont réalisé l'expérience suivante : Un champ magnétique d'une intensité de 100 µT à une fréquence de 50 Hz a été appliqué à la drosophile pondueuse. Il en est résulté une réduction significative du dépôt d'œufs dans le groupe de champ magnétique par rapport au groupe témoin.

Shepherd et al. 2018 et Shepherd et al. 2019 ont étudié les effets des CEM provenant des lignes électriques (fréquence de réseau de 50 Hz) sur les abeilles mellifères (*Apis mellifera*). Des bobines spécialement conçues ont été utilisées pour générer un champ magnétique de 20 à 7 000 µT, avec les mêmes caractéristiques qu'une ligne électrique à haute tension. Les CEM à basse fréquence interfèrent de manière significative avec les paramètres d'alimentation, de

comportement en vol, d'apprentissage (réflexe d'extension de la trompe) et de formation de la mémoire à des intensités de champ de 100  $\mu\text{T}$  et plus. À 7 000  $\mu\text{T}$ , la fréquence de battement des ailes est également augmentée de manière significative.

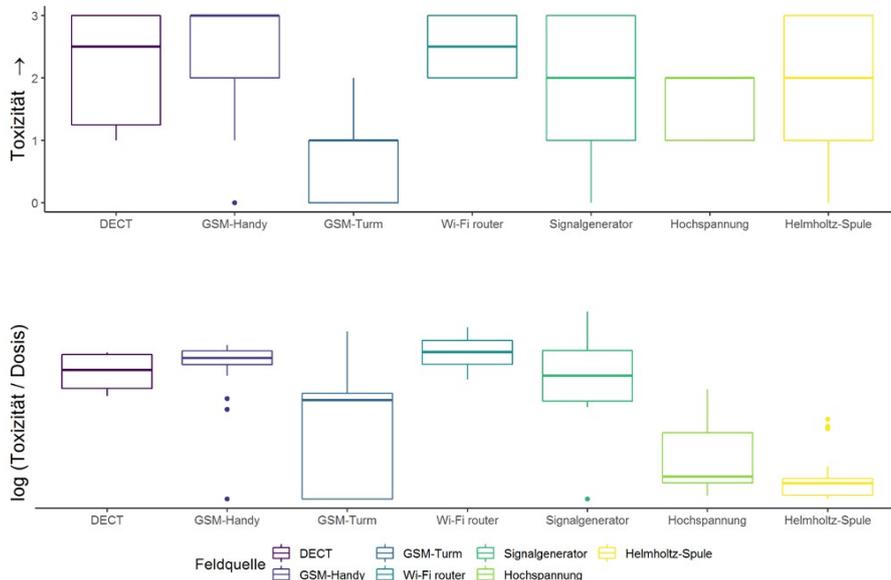


Fig. 11 : En haut : Toxicité mutuelle pour les insectes par type de CEM (valeur estimée). Graphique du bas : Nocivité relative par type de CEM (estimation), normalisée à la dose de rayonnement, c'est-à-dire divisée par le produit de l'intensité du champ par la durée d'exposition [ $\text{V/m} \times \text{min}$ ], indiquée sur une échelle  $\log_2$ . Pour comparer les CEM-HF et les CEM-BF, toutes les valeurs de l'intensité du champ magnétique [T] ont été converties en intensité du champ électrique [ $\text{V/m}$ ] (voir annexe).

Citation : "Il a été constaté que l'exposition aux CEM-BF réduit l'apprentissage, altère la dynamique de vol, réduit le succès de la recherche de nourriture et de l'alimentation. Les résultats suggèrent que les CM-BF de 50 Hz émis par les lignes électriques peuvent être un facteur de stress environnemental important pour les abeilles, avec le potentiel d'affecter leurs capacités cognitives et motrices, qui à leur tour peuvent réduire leur capacité à polliniser les plantes. »

Shepherd et al. 2019 ont constaté une augmentation supplémentaire (de 60%) de l'agressivité chez les abeilles exposées à 100  $\mu\text{T}$  par rapport au témoin et ont confirmé les effets négatifs sur la mémoire à court terme observés dans leur étude précédente.

Dans sa thèse de doctorat (Shepherd 2018), Shepherd a également testé l'effet combiné des CEM avec la clothianidine, un néo-nicotinoïde, et a constaté une réduction des dommages causés par les CEM par rapport au témoin.

Citation : "Ces résultats fournissent une première indication que les CEM-BF environnementaux peuvent influencer des comportements et des processus biologiques critiques chez des insectes importants, ce qui confirme la nécessité d'études de terrain plus importantes pour déterminer les effets environnementaux des CEM-BF et suggère d'approfondir les recherches pour élucider les mécanismes des effets biologiques des CEM-BF. »

### 3.1.2 Erdogan 2019

Lors du premier dispositif d'Erdogan en 2019, 36 ruches ont été installées en 4 rangées et une clôture électrique a été installée devant les ruches. Une partie des ruches a été protégée des CEM à basse fréquence de la clôture électrique par une moustiquaire mise à la terre. Le nombre de travailleurs, les plateaux à miel et la zone de couvain étaient sensiblement plus faibles dans les colonies exposées que dans les colonies témoins protégées.

Dans leur deuxième expérience, Erdogan et Cengiz 2019 se sont intéressés à la préférence des sources alimentaires, en plaçant des bobines magnétiques de 0, 50, 100, 150 et 200  $\mu\text{T}$  avec des sources alimentaires. Il en résulte une forte préférence pour les sources de nourriture à faible champ et un temps de séjour plus long à ces sources de nourriture.

### 3.1.3 Torodovic 2019

Todorovic et al. 2019 ont utilisé une fréquence de 50 Hz (10 mT) sur des larves de blattes argentines (*Blattella germanica*) pendant 5 mois et ont constaté une réduction significative de la masse du tube digestif, de l'activité de la Glutathione S-transférase et une augmentation significative de l'activité de la catalase et de la SOD, indiquant une augmentation du stress oxydatif.

### 3.1.4 Maliszewska 2018

Maliszewska et al. 2018 ont utilisé une fréquence de puissance de 50 Hz (7 mT) sur des blattes américaines (*Periplaneta americana*) et ont constaté une augmentation significative des niveaux de malondialdéhyde - un indicateur de stress oxydatif (après 24 h) et une réduction significative des niveaux de glutathion (GSH) après 7 jours d'irradiation. En outre, la vitesse de réaction à la chaleur a été considérablement réduite.

### 3.1.5 Wyszowska 2016

Wyszowska et al. 2016 ont placé des criquets pèlerins dans un champ magnétique alternatif (4 mT, 50 Hz) et ont constaté une activité réduite. Dans l'essai cellulaire à 7 mT, on a mesuré une concentration significativement élevée de HSP70, des valeurs aussi élevées que dans un échantillon chauffé. L'observation de l'extenseur du tibia (muscle sauteur) et de son ganglion a révélé des potentiels d'action altérés (plus long et plus fort à 7 mT par rapport au contrôle) et une force musculaire réduite.

### 3.2.6 Zhang 2016

Zhang et al. 2016 ont montré que le stress thermique (35 °C) et l'exposition aux CEM (50 Hz, 3 mT) produisaient un effet synergique qui renforçait l'effet négatif des CEM sur la

durée de vie, la locomotion et le stress oxydatif chez *Drosophila melanogaster*.

### 3.2 Champs électromagnétiques de radiofréquences (CEM-HF) : études récentes

#### 3.2.1 Panagopoulos 2019, [...] 2006

Panagopoulos a réalisé un certain nombre d'expériences avec la drosophile, dont voici un extrait, car une description détaillée de l'ensemble des expériences dépasserait le cadre de cet article : Panagopoulos 2019 ; Panagopoulos 2017 ; Panagopoulos, Cammaerts et autres. 2016 ; Panagopoulos, Johansson et Carlo 2015b ; Panagopoulos, Johansson et Carlo 2015a ; Panagopoulos, Karabarbounis et Lioliousis 2013 ; Panagopoulos 2012 ; Panagopoulos, Chavdoula et Margaritis 2010 ; Panagopoulos et Margaritis 2010 ; Panagopoulos, Chavdoula, Karabarbounis et autres a. 2007 ; Panagopoulos, Chavdoula, Nezis et autres 2007 ; Panagopoulos, Karabarbounis et Margaritis 2004 ; Panagopoulos, Karabarbounis et Margaritis 2002.

Panagopoulos a récemment résumé ses propres résultats de nombreuses expériences et de plus de 10 ans de recherche (Panagopoulos 2017). Dimitris J Panagopoulos 2019 a étudié l'effet d'un téléphone portable transmettant par GSM sur le développement des ovaires de drosophile et a trouvé un nombre significativement plus élevé de cassures de brins d'ADN par rapport au témoin non irradié. En outre, 36 minutes d'exposition au GSM se sont avérées nettement plus nocives que 120 heures d'exposition à un champ magnétique basse fréquence de 2 mT (Fig. 12. Bobine de Helmholtz, similaire aux expériences CEM-BF décrites ci-dessus).

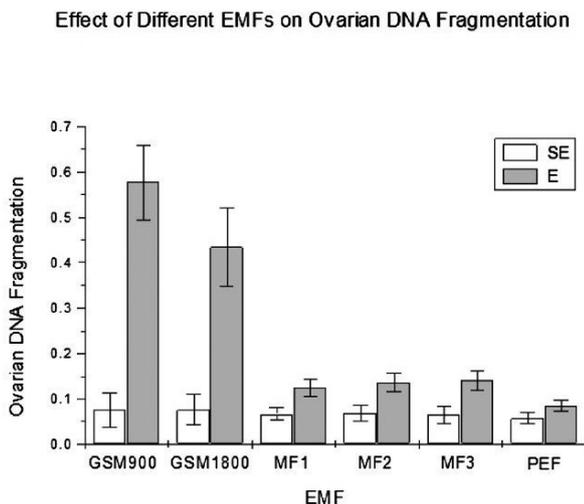


Fig. 12 : Influence des champs magnétiques GSM et de basse fréquence sur le taux de rupture du brin d'ADN dans les ovaires de drosophile (MF-BF-1 = 0,1 mT, MF2 = 1 mT, MF3 = 2 mT). Témoins (SE) par rapport aux ovaires exposés (E).  
Source : Panagopoulos 2019.

Citation de Saliev et al. 2019 concernant Panagopoulos 2011 : "La différence entre les effets des CEM modulés et non modulés sur la capacité de reproduction des insectes a été étudiée par Panagopoulos. Les données expérimentales

ont montré que l'exposition au signal GSM 900 MHz non modulé n'entraînait pas de réduction de la capacité de reproduction des insectes, alors que le signal GSM 900 MHz modulé entraînait une réduction de la reproduction. Il a été clairement démontré que le signal GSM modulé ("mode conversation") avait une influence plus importante sur l'oogénèse des insectes. En outre, les effets biologiques des signaux GSM 900 MHz et GSM 1800 MHz ont été étudiés et comparés avec le même modèle biologique. Une diminution de la capacité de reproduction a été constatée pour les deux types de rayonnement GSM. Le travail de Panagopoulos est cohérent avec d'autres rapports sur l'influence du rayonnement des téléphones portables sur les fonctions de reproduction et l'embryogenèse".

Il convient de mentionner les expériences menées par Panagopoulos, Chavdoula et Margaritis 2010, où les dommages maximums ont été constatés à une distance de 0 cm et 30 cm d'un téléphone mobile GSM (et des dommages nettement moins importants dans la zone intermédiaire). Panagopoulos et Margaritis 2010 attribuent cela à une "fenêtre d'intensité", comme l'ont fait des chercheurs antérieurs (Salford et al. 2008). Chez la drosophile, cette fenêtre bioactive semble avoir une intensité d'environ 100 mW/m<sup>2</sup> (6 V/m), ce qui correspond à une distance d'environ 30 mètres d'un mât de téléphone mobile GSM.

#### 3.2.2 Manta 2017, 2014

Une étude menée par Margaritis et Manta (Margaritis et al. 2014), résultat de 280 expériences, montre une augmentation des espèces réactives de l'oxygène (ROS) dans les ovaires de *Drosophila* après exposition à des champs de radiofréquence. Ont été testés le téléphone mobile GSM, la base et le combiné DECT, le routeur WiFi, le Bluetooth, le baby phone, le four à micro-ondes, le 900 MHz non modulé (oscilloscope) et la radio FM. Le téléphone mobile GSM et le DECT se sont révélés particulièrement nocifs, mais tous les autres CEM artificiels testés étaient également légèrement nocifs dans le sens où ils entraînaient une réduction de la fertilité et une augmentation de la mort cellulaire dans les ovaires.

Manta et al. 2017 s'appuient sur l'étude de 2014 et ont spécifiquement étudié la production de radicaux libres et le profil génétique (induction génique). 168 gènes ont été exprimés de manière différentielle par irradiation avec un téléphone mobile GSM (270 mW/m<sup>2</sup> = 10 V/m pendant 30 min), dont 15 ont été régulés à la baisse, y compris le gène du cryptochrome. Un certain nombre de gènes du cycle antioxydant et de gènes associés aux mécanismes de réparation ont été exprimés plus fortement.

#### 3.2.3 Singh 2020

Singh et al. 2020 ont irradié des drosophiles pendant 5 jours avec une antenne cornet de 2 400 MHz et ont constaté des différences significatives dans la morphologie du cerveau. La classification automatique assistée par ordinateur des images microscopiques du cerveau a atteint une précision de 94,66% dans l'attribution correcte des images (irradiées

ou non), bien qu'aucune différence nette n'ait été visible à l'œil nu (au microscope).

### 3.2.4 Lopatina 2019

Lopatina et al. 2019 ont étudié la fonction sensorielle et la mémoire des abeilles mellifères lorsqu'elles sont irradiées avec un routeur WiFi. Cinq groupes de 18 abeilles ont été utilisés, dont deux groupes ont été exposés à un routeur WiFi (avec une puissance estimée à 50 mW/m<sup>2</sup>) et trois groupes ont servi de témoins. La réaction des abeilles examinées lors de la présentation d'une solution sucrée aromatisée a été enregistrée ainsi que la formation d'un réflexe conditionné (réflexe d'extension de la trompe) et la conservation de ce réflexe dans la mémoire à long terme. Des différences significatives ont été observées entre les groupes irradiés et non irradiés en termes de réponse à la nourriture présentée (perturbée), de mémoire à court terme (détériorée de manière significative) et de mémoire à long terme (légèrement améliorée). Toute l'expérience a été répétée un an plus tard, avec les mêmes résultats.

### 3.2.5 Odemer 2019

Odemer et Odemer 2019 ont étudié le développement des reines d'abeilles mellifères en présence d'un téléphone portable GSM dans la ruche (environ 2,2 V/m ou 13 mW/m<sup>2</sup>). Le développement des larves en reines a été significativement affecté (diminution de 40%) par rapport au contrôle. Cependant, d'autres paramètres de développement sont restés les mêmes entre les reines irradiées et non irradiées et leurs colonies.

### 3.2.6 Vilic 2017

Dans l'étude de Vilic et al. 2017, des larves d'abeilles domestiques ont été exposées à un rayonnement de 900 MHz pendant 2 heures, non modulé (4 intensités de champ) et modulé (80 % 1 kHz, 217 Hz). Les dommages à l'ADN ont été considérablement accrus avec les radiations modulées mais pas avec les radiations non modulées. Cependant, la valeur du TBARS ("thiobarbituric acid reactive substance"), un indicateur de la peroxydation des lipides et du stress oxydatif, a été significativement réduite dans tous les groupes irradiés - indiquant une réduction du stress oxydatif. Les auteurs résumant les résultats d'autres études similaires, dans lesquelles environ un tiers a trouvé une augmentation, un tiers une diminution et les autres études ont trouvé des paramètres d'oxydation constants ou variables. La conclusion est que les effets des CEM radiofréquences sont complexes et dépendent à la fois du type d'animal étudié (par exemple, insecte, ver de terre, rat), du stade de développement (par exemple, œuf, larve, adulte) et de la durée d'exposition.

### 3.2.7 Taye 2017

Taye et al. 2017 ont utilisé un total de 20 ruches placées à 5 distances différentes d'un mât de téléphone portable (100, 200, 300, 500 et 1 000 mètres), observées pendant 6 mois à des intensités de rayonnement très faibles (20-80 µW/m<sup>2</sup>). Citation de Taye : "L'activité de vol et la capacité des travailleurs à revenir étaient maximales dans les colonies

d'abeilles placées à une distance de 500 m et minimales à 100 m de la tour de téléphonie mobile. »

### 3.2.8 Favre 2017, 2011

Dans Favre 2017, le faible signal GSM local (1 mW/m<sup>2</sup>) a été détecté, amplifié puis projeté sur une ruche voisine à l'aide d'une antenne directionnelle. Le signal amplifié avait une intensité de puissance comprise entre 80 et 100 µW/m<sup>2</sup> (0,17 et 0,19 V/m) directement devant l'antenne émettrice et environ 1 à 2,5 µW/m<sup>2</sup> (0,02 et 0,03 V/m) à l'avant de la ruche (à l'intérieur). Les abeilles de Favre ont réagi par un sifflement (enregistré acoustiquement) - un signal associé au danger ou au déplacement de la ruche - dans l'heure qui a suivi le début de l'irradiation GSM et cela a été testé 5 fois. Dans l'étude pilote Favre 2011, un téléphone portable GSM a été placé directement dans la ruche au lieu du répéteur GSM - là encore, le sifflement était la réaction des abeilles. Cette expérience a été répétée douze fois, chaque fois avec des ruches différentes.

## 3.3 Champs électromagnétiques à haute fréquence : Études antérieures

### 3.3.1 Lazaro 2016

Lâzaro et al. 2016 ont utilisé des pièges à pivot à certaines distances (50, 100, 200, 400 m) autour de cinq mâts de téléphonie mobile sur l'île grecque de Limnos et de cinq tours à Lesbos. Sur 17 000 insectes collectés, 3 700 abeilles sauvages, 800 guêpes et 7 000 coléoptères ont été typés comme suit : Évitement des niveaux élevés de CEM pour les coléoptères et les guêpes, mais attraction pour les abeilles sauvages (plus d'abeilles sauvages capturées près des antennes) - avec une tendance plus prononcée à l'attraction pour les abeilles sauvages nichant au sol par opposition aux abeilles sauvages nichant en surface. Les densités de puissance variaient de 0,1 V/m = 26 µW/m<sup>2</sup> à 0,7 V/m = 1 300 µW/m<sup>2</sup>.

### 3.3.2 Geronikonou 2014

Geronikolou et al. 2014 ont comparé l'effet d'une irradiation de 900 MHz (téléphone portable) et de 1 900 MHz (combiné DECT) sur des œufs de drosophile (100 minutes en champ proche). Une baisse significative de la fertilité (par exemple le nombre d'œufs pondus) a été observée.

### 3.3.3 Chavdoula 2010

Des drosophiles ont été exposées à un téléphone portable GSM en mode appel pendant 6 minutes par jour. Citation de Panagopoulos, Chavdoula et Margaritis 2010 : "Les expositions intermittentes avec des intervalles de 10 minutes entre les séances d'exposition se sont avérées presque aussi efficaces que les expositions continues de durée totale égale, tandis que des intervalles plus longs entre les expositions semblaient donner à l'organisme le temps nécessaire pour récupérer et surmonter partiellement les effets susmentionnés de l'exposition au GSM. »

### 3.3.4 Cammaerts 2014, 2013, 2012

Cammaerts, De Doncker et al. 2012 ; Cammaerts, Rachidi et al. 2013 et Cammaerts et Johansson 2014 décrivent trois expériences sur des fourmis en laboratoire qui ont permis d'éviter (?) les CEM, de perturber la mémoire, l'orientation et le mouvement. Cammaerts recommande de répéter une installation similaire avec les abeilles.

### 3.3.5 Kumar 2011 - 2013

Kumar, Sangwan et Badotra 2011 ont étudié l'effet de l'exposition aux téléphones portables sur différentes biomolécules chez les abeilles domestiques adultes. Dix abeilles ont été prélevées sur chaque rayon et irradiées dans une petite cage avec deux téléphones portables en mode conversation. La durée d'exposition était de 10, 20 ou 40 minutes. La concentration de différentes biomolécules a augmenté de manière significative. Kumar 2012 et Kumar, Rana et Kalia 2013 ont étudié l'effet de l'exposition aux téléphones portables sur différentes biomolécules dans le liquide séminal (2012) et l'hémolymphe (2013) des bourdons d'abeilles (même configuration que l'expérience précédente, durée d'exposition 30 minutes). Sperme : la concentration de glucides, de protéines et de lipides a augmenté par rapport au témoin et l'activité de diverses enzymes a été réduite. Hémolymphe : la concentration de diverses biomolécules a augmenté sous l'influence des CEM, par exemple de 0,65 mg/ml à 2,75 mg/ml pour les hydrates de carbone, de 3,74 mg/ml à 4,85 mg/ml pour les protéines et de 0,325 mg/ml à 1,33 mg/ml pour les lipides.

### 3.3.6 Stever et Kuhn 2006, 2005

Dans l'étude pilote Stever, Kuhn et al. 2006, Stever et Kuhn ont étudié les effets des stations de base DECT (à une puissance moyenne de 2,5 mW ou environ 1,4 mW/m<sup>2</sup>) sur le sens de l'orientation des abeilles et le développement des colonies d'abeilles. Huit ruches sur seize ont été exposées à des stations de base DECT pendant 11 jours. Le sens de l'orientation était nettement plus mauvais dans le groupe irradié, tout comme le développement des ruches. Stever, Kimmel et al. 2006 ont répété l'expérience et ont étudié à nouveau le sens de l'orientation (durée jusqu'au retour, nombre de rapatriés) avec la même configuration et ont pu confirmer l'effet perturbateur du DECT.

## 3.4 Etudes « sans effet »

### 3.4.1 Miyan 2014

Miyan 2014 a utilisé 35 ruches, réparties en 5 groupes d'exposition, à une distance de 0 à 800 m d'un mât de téléphone mobile. Aucune différence entre les groupes d'exposition n'a été constatée pour tous les paramètres mesurés, par exemple la production de miel, la collecte de pollen, la reproduction, la taille des ruches, etc. Une densité de puissance de 0,423 V/m en moyenne (475 µW/m<sup>2</sup>) a été mesurée directement à la tour de téléphonie mobile, toutes les autres valeurs étaient inférieures à 0,01 V/m (25 µW/m<sup>2</sup>), ce qui est une valeur très faible que l'on peut difficilement trouver en Europe. La valeur maximale de 0 m était également inférieure à la valeur seuil, lorsque les experts soupçonnent un effet nocif, soit 1 000-100 000 µW/

m<sup>2</sup> (Cucurachi et al. 2013 ; Panagopoulos et Margaritis 2010).

### 3.4.2 Hoofwijk 2013

En 2011, une expérience du groupe autour de Tjeerd Blacquièr (Hoofwijk et Blacquièr 2013) a étudié les indicateurs de la toxicité des antennes de téléphonie mobile pour les abeilles domestiques. Le dispositif expérimental consistait en 20 ruches d'abeilles, qui étaient logées dans deux enceintes séparées. 10 ruches ont été protégées par un grillage métallique, 10 autres ont été exposées aux radiations du mât de téléphonie mobile situé à proximité. Toutes les expériences ont été réalisées en double aveugle. Le site d'essai avec les deux habitations est situé à 230 m d'un mât de téléphonie mobile, en vue directe. L'intensité du GSM 900 MHz sur place, à l'extérieur des habitations, était en moyenne de 0,5 V/m, soit environ 660 µW/m<sup>2</sup>.

Les auteurs résument les résultats de l'expérience : *"Nos enquêtes montrent que les colonies du groupe exposé et du groupe témoin ont eu un succès de développement comparable de l'œuf à la larve à l'abeille adulte, des capacités d'orientation comparables, des performances comparables dans leur phase adulte, à l'éclosion des paramètres morphométriques et physiologiques comparables, une longévité comparable, un développement comparable au niveau de la colonie (production de couvain et de jeunes abeilles), mais différaient en termes de survie hivernale en ce sens que davantage de colonies non exposées (9/10) que de colonies exposées (3/10) ont survécu. Cependant, ce paramètre n'a pas pu être testé statistiquement car les colonies ont toutes hiverné ensemble dans leurs habitations respectives dans 10 ruches. Cette expérience doit être répétée avec au moins 30 ruches exposées et 30 ruches protégées, chacune logée séparément ou en petits groupes, afin de réduire la possibilité qu'un parasite infecte une maison entière, car les ruches exposées dans l'expérience ci-dessus présentaient des taux élevés d'infection par les acariens varroa. »*

## 4. Evaluation de la recherche et la connaissance au début de 2020

Aperçu de la situation de l'étude :

CEM haute fréquence : effet constaté dans 56 des 64 expériences et dans 46 des 55 études.

CEM basse fréquence : effet constaté dans 26 des 29 études.

L'effet constaté était dans la plupart des cas nocif, dans de rares cas neutre. Une étude (Makarov et Khmelinski 2016) a montré qu'il est possible d'obtenir des effets à la fois négatifs et positifs en modifiant les paramètres d'un CEM-BF 3D.

### Considérations générales et recommandations pour l'avenir :

Un résultat expérimental qui soutient l'hypothèse de l'activation du CCVD - ou d'autres canaux à tension contrôlée - est que les dommages causés par les CEM ne

se produisent qu'après une irradiation prolongée dans une direction. Un champ magnétique à rotation aléatoire ("chaotique") peut être utilisé pour neutraliser les dommages causés par une exposition simultanée aux CEM (Lai et Singh 2005 ; Litovitz et al. 1994). En pratique, on pourrait donc s'attendre à des dommages plus importants des CEM dans les plantes que dans les animaux en mouvement, ce qui a également été généralement confirmé expérimentalement (Halgamuge, Yak et Eberhardt 2015 ; Halgamuge 2016). Chez les insectes, l'influence néfaste aux premiers stades de développement (œuf, larve, pupa) devrait être plus forte que chez les adultes - des preuves en ont été trouvées par exemple par Odemer et Odemer 2019.

Il existe des preuves considérables de l'existence de nombreuses applications médicales des CEM en attente d'utilisation (Markov 2007 ; Pilla 2013). Même si les technologies actuelles de lutte contre les CEM sans fil sont généralement - en fonction de la dose - toxiques, les recherches existantes suggèrent qu'il devrait être facile d'améliorer considérablement la biocompatibilité des technologies sans fil (Lai 2004 ; Pilla 2006). Étant donné qu'au moins en ce qui concerne le mécanisme largement élucidé de l'activation cryptochrome, la présence de lumière bleue (ou blanche) semble nécessaire pour les effets nocifs des CEM chez les insectes, l'utilisation massive de l'éclairage artificiel des rues devrait être reconsidérée - et si nécessaire, des sources lumineuses à moindre teneur en bleu devraient être utilisées (par exemple, des LED avec un spectre "chaud" au lieu de "froid"). Pour tous les insectes qui utilisent la magnétite pour leur sens magnétique, par exemple tous les hyménoptères - abeilles, guêpes, fourmis - il faut s'attendre à des effets nocifs des CEM, même en l'absence de lumière (artificielle).

À quelles intensités de champ s'attendent les dommages causés aux insectes, ou des expériences ont-elles montré qu'ils sont nuisibles ? Panagopoulos, Chavdoula et Margaritis 2010 ont trouvé une fenêtre bioactive à une distance de 20-30 cm des téléphones mobiles GSM, correspondant à une densité de puissance de 100 mW/m<sup>2</sup> ou environ 6 V/m - où des effets toxiques significatifs ont été observés chez la drosophile après une exposition de courte durée (à partir de 10 minutes) - et ces résultats ont maintenant été reproduits plusieurs fois (Chavdoula 2010, Margaritis 2014, Geronikolou 2014). Si cela devait être généralement vrai pour les insectes, la limite des effets toxiques serait 100 fois inférieure aux limites actuelles de l'ICNIRP (10 W/m<sup>2</sup> ou 61 V/m, voir Protection contre les rayonnements non ionisants et al. 2020), qui ne protègent que contre les effets thermiques.

En cas d'exposition chronique, on pourrait s'attendre à des effets négatifs si la densité de puissance était 10 fois plus faible - c'est-à-dire 10 mW/m<sup>2</sup> - , mais l'état des connaissances est encore incertain.

Actuellement, les densités de puissance dans l'environnement sont généralement encore bien inférieures à 10 ou 100 mW/m<sup>2</sup> (soit 2 ou 6 V/m). Une étude récente a mesuré des valeurs de 0,17-0,53 V/m RMS sur le terrain (0,1-0,8 mW/m<sup>2</sup> - Thielens, Greco et autres 2020). L'auteur de cette étude a mesuré des valeurs allant jusqu'à 10 mW/m<sup>2</sup> RMS (2,5 V/m) dans le cadre de sa thèse de maîtrise,

mais uniquement à proximité immédiate (30-50 m) des mâts LTE/GSM. Les mesures Ofcom 2020 dans les points chauds urbains (Royaume-Uni) ont trouvé un maximum de 150 mW/m<sup>2</sup> (1,5% de la limite ICNIRP) et une moyenne de 25 mW/m<sup>2</sup> (comme somme de toutes les émissions radiofréquences dans la gamme de fréquences 0,3-6 GHz).

En Belgique, en Italie, en Suisse, en Russie et en Chine, les expositions maximales autorisées (limites du système) pour la population générale sont de 6 V/m (100 mW/m<sup>2</sup>) ou moins (3 V/m au Luxembourg) dans la gamme des radios mobiles/WLAN, tandis que l'Allemagne, les États-Unis et de nombreux autres pays respectent les limites de l'ICNIRP, qui sont fixées à 41 V/m (4000 mW/m<sup>2</sup>) pour 900 MHz et 61 V/m (10 W/m<sup>2</sup>) à partir de 2 GHz (funkstrahlung.ch 2017 ; Woelfle 2003 ; Nonionizing Radiation Protection et al. 2020).

36 des 64 expériences de radiofréquence de cette étude ont utilisé un champ de moins de 6 V/m (100 mW/m<sup>2</sup>) et 30 expériences (83 %) ont néanmoins trouvé des indications claires ou des effets nocifs statistiquement significatifs, par exemple à partir de 3 V/m, c'est-à-dire également en dessous des limites particulièrement basses du système, que l'on ne trouve que dans certains pays. La valeur limite du système est mesurée là où les gens peuvent rester plus longtemps, c'est-à-dire dans les rues, les places, les appartements, etc.

Selon Thielens, Bell et d'autres en 2018, l'absorption des CEM artificiels par les insectes reste relativement constante, même à des fréquences beaucoup plus élevées que celles généralement utilisées aujourd'hui (par exemple 60 GHz). La longueur d'onde de la 5G est très proche de la longueur du corps de divers insectes, ce qui entraîne une absorption résonnante (voir figure 13). La 5G sera progressivement étendue à des fréquences de plus en plus élevées. Comme la perte de puissance due à la diffusion, à la réflexion et à la force de pénétration plus faible des fréquences plus élevées devient de plus en plus importante, la puissance rayonnée des stations de base devrait également être de plus en plus augmentée pour assurer le confort des connexions sans fil dans les maisons et les véhicules. Selon Xu et al. 2017, la puissance d'une seule station 5G (dans la bande des 15 GHz) devrait être d'environ 10 W/m<sup>2</sup> à 1 m de distance, ou 100 mW/m<sup>2</sup> à 10 m de distance. Selon les calculs de Thor en 2017 et ailleurs, les antennes 5G n'émettraient dans le pire des cas que 15 % de leur puissance maximale théorique et auraient l'avantage - par rapport à l'infrastructure actuelle (1G-4G) - de réduire l'intensité de rayonnement à pratiquement zéro en l'absence d'utilisateurs (par exemple la nuit).

Selon les mesures de l'Ofcom, les stations de base 5G (au Royaume-Uni) n'ont actuellement qu'une puissance maximale de 3,8 mW/m<sup>2</sup> et une moyenne de seulement 0,59 mW/m<sup>2</sup> dans les points chauds urbains (Ofcom 2020). Toutefois, comme l'infrastructure est encore très rudimentaire et que le nombre d'utilisateurs est faible, ces chiffres seront probablement plusieurs fois plus élevés à l'avenir, d'autant plus que la puissance de l'antenne pour la 5G dépend directement du nombre de chaînes utilisées, c'est-à-dire des utilisateurs finaux. De récentes mesures de l'ANFR dans des projets pilotes 5G en France ont trouvé des valeurs plus élevées, par exemple environ 6 V/m (100

mW/m<sup>2</sup>) à 150 mètres de distance, à la puissance maximale de l'antenne, et environ 3,5 V/m (32 mW/m<sup>2</sup>) pour le terminal dans le cas d'un téléchargement de 10 gigaoctets (ANFR 2020). Toutefois, il ne s'agit que d'une estimation approximative, car la nouvelle technologie de formation de faisceau concentre précisément le rayonnement de 64 antennes individuelles par station 5G sur les terminaux (petite ouverture) et, en même temps, chaque station de base éclaire séparément de nombreux terminaux ("massive MIMO").

Il est prévu d'installer une station de base tous les 250 mètres (ou moins) dans le secteur urbain, une distinction étant également faite entre les "petites cellules" et les stations de base conventionnelles. Si cela devait être mis en œuvre, une proportion importante de la région d'air des insectes dans les zones urbaines serait finalement saturée d'une puissance d'environ 100 mW/m<sup>2</sup>. La Suisse, l'Italie et quelques pays d'Europe de l'Est se situent dans la plage vraisemblablement inoffensive de 6 V/m - mais ailleurs en Europe, l'expansion de 5G menace d'entraîner une augmentation significative des émissions de CEM. Au vu de la situation actuelle de la recherche, l'auteur de cette revue doit mettre en garde contre une telle approche, car des effets nocifs sur les insectes seraient inévitables. En outre, le rayonnement 5G est probablement - du moins pour les insectes - plus bioactif que, par exemple, les émissions 4G de même intensité de champ, en raison des caractéristiques du signal très "dense" (Panagopoulos 2011).

Cependant, les informations et les évaluations actuellement disponibles sur la 5G sont assez controversées et contradictoires et vont de "complètement sans problème" en ce qui concerne une exposition aux rayonnements sensiblement réduite par rapport à la technologie actuelle

(Chiaraviglio et al. 2018 ; Matalatala et al. 2018) - bien que des mesures récentes ne le confirment pas ou seulement partiellement (ANFR 2020 ; Ofcom 2020) - aux avertissements apocalyptiques d'effets graves (Kostoff et al. 2020 ; Hardell et Nyberg 2017).

Conclusions : Les recherches montrent que les CEM pourraient avoir un impact sérieux sur la vitalité des populations d'insectes. 72 des 83 études analysées ont trouvé un effet. Des effets négatifs ont été décrits dans des études : Restrictions du sens de l'orientation, réduction de la capacité de reproduction et de la fertilité, léthargie, changements dans la dynamique de vol, dans le succès de la recherche de nourriture, dans les vitesses de réaction, comportement de fuite, perturbation du rythme circadien, blocage de la chaîne respiratoire et dommages aux mitochondries, mauvaise activation du système immunitaire, augmentation du nombre de ruptures de brins d'ADN. Certains mécanismes d'action conduisant à ces dommages sont identifiés. Les CEM affectent le métabolisme, entre autres ils affectent les canaux calciques voltage-dépendants, par exemple dans la transmission de l'excitation neuronale et dans le tissu musculaire, ce qui peut conduire à une suractivation de la transduction des signaux et de la chaîne respiratoire avec production de radicaux libres d'oxygène et par conséquent à un stress cellulaire oxydatif. Dans certaines expériences, il a été constaté que malgré le faible niveau de stress des émetteurs, des effets néfastes se produisaient après plusieurs mois. Les forces de champ déjà 100 fois inférieures aux limites de la LCNIRP pourraient déjà avoir un effet. Il se peut que les effets nocifs pour les insectes se produisent à des intensités de rayonnement inoffensives pour l'homme, en particulier dans les bandes de fréquences supérieures (voir figure 13).

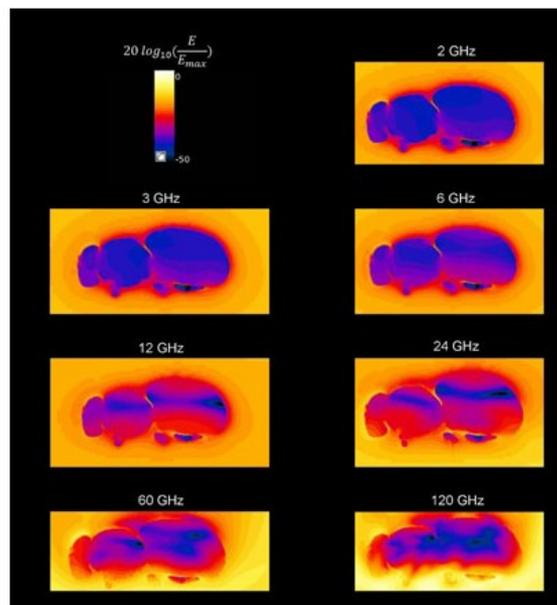
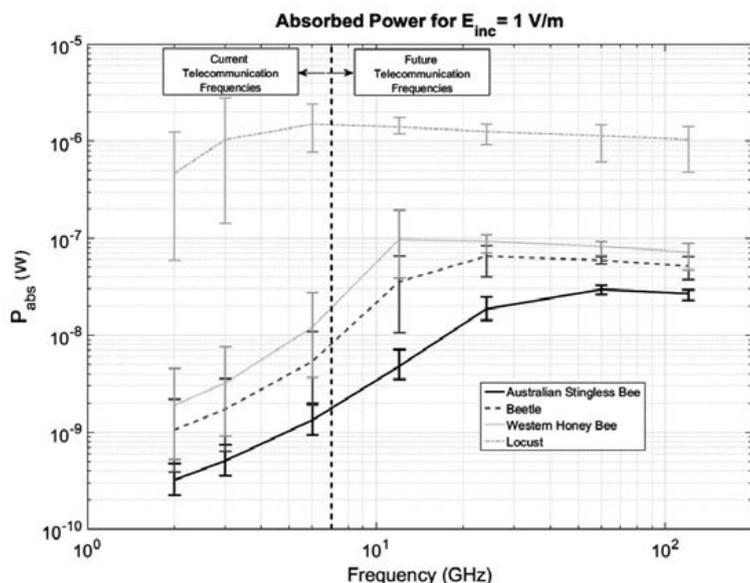


Fig. 13 : Absorption d'énergie par les insectes à des fréquences de micro-ondes croissantes. Source : Thielens, Bell et autres 2018.

Jusqu'à ce que la vérité éclate, le développement de l'extension doit être étroitement surveillé et des tests toxicologiques doivent être immédiatement lancés pour identifier et quantifier rapidement tout effet nocif afin que

des directives de protection réalistes puissent être émises. Dans le contexte du déclin rapide des insectes et de la poursuite de l'expansion des sources de champs électromagnétiques à haute fréquence, il est non seulement

urgent de poursuivre les recherches, mais aussi, et en particulier, sur les interactions avec d'autres agents nocifs tels que les pesticides. Lors de la planification de l'expansion de la radio mobile, les habitats des insectes

doivent être protégés dès maintenant contre l'exposition aux CEM. Cet auteur fait ici référence au principe dit de précaution, qui est ancré dans l'article 191 du traité sur le fonctionnement de l'Union européenne.

---

## 5 annexe

### 5.1 Liste des abréviations

5G ..... La cinquième génération de technologies de communications mobiles  
CCVD..... "canal calcique voltage-dépendant  
CEM.....Champs électromagnétiques  
CEM-BF....Champs électromagnétiques basse fréquence  
CEM-HF....Champs électromagnétiques haute fréquence  
EEG..... Électroencéphalogramme  
GHz..... Gigahertz (1 GHz correspond à 1.000 MHz)  
ICNIRP..... La Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants  
NMDA .....Récepteur N-méthyl-D-aspartate, un récepteur ionotrope du glutamate  
MIMO ..... "entrée multiple sortie multiple"  
RMS ..... "racine moyenne carrée", la valeur moyenne carrée  
ROS..... "espèces réactives de l'oxygène », radicaux libres  
SOD.....Superoxyde dismutase  
W/m2.....Watt par mètre carré, une mesure de la densité de puissance rayonnée

### 5.2 Calculs

L'unité SI (Système international) pour exprimer l'intensité d'un champ électromagnétique est le volt par mètre [V/m], qui est également l'unité de mesure générale des champs électriques. Dans le cas des champs électromagnétiques, cela peut être utilisé pour calculer la densité de puissance moyenne (RMS) ou l'intensité de rayonnement en watts par mètre carré [W/], qui est également

utilisée dans la technologie des cellules solaires. Pour toutes les études à haute fréquence incluses ici, toutes les valeurs de champ données ont été converties en V/m si elles étaient décrites dans une unité différente.

Les formules suivantes ont été utilisées (Woelfle 2003 ; Vecteur de Poynting) :

$S = E^2/Z_0$  ou encore :  $E = \sqrt{S \times Z_0}$  où E est l'intensité du champ électrique [V/m], S est la densité de puissance [W/m<sup>2</sup>] et Z<sub>0</sub> l'impédance d'onde [377 Ohm].

Pour les ondes électromagnétiques, l'intensité du champ électrique associé à l'intensité du champ magnétique, selon :

$B = E / c$  avec B le champ magnétique en Teslas, E est le champ électrique en volts par mètre et c la vitesse de la lumière ( $3 \times 10^8$  m/s)  
(dérivé de la loi Ampère-Faraday, ou directement auprès du Vecteur de Poynting).

Dans le champ proche, c'est-à-dire en dessous d'une longueur d'onde (par exemple < 30 cm pour le GSM900), les champs électriques et magnétiques sont présents sous forme de champ tourbillonnaire. Cependant, la proportionnalité des champs électriques et magnétiques, calculée sur la base de nombreuses mesures, est également maintenue ici. La valeur du DAS, abréviation de "Débit d'absorption spécifique", exprime la quantité d'énergie effectivement absorbée par le tissu irradié et dépend donc du type de tissu (ou généralement du matériau) et a été estimée ici comme étant le  $DAS = (E \times 1,19)^2 / 1000$  W/kg selon Panagopoulos, Johansson et Carlo 2013 ; Sagioglou et autres 2014.