

Exposition des insectes aux champs électromagnétiques radiofréquences de 2 à 120 GHz

- Arno Thielens ,
- Duncan Bell ,
- David B. Mortimore ,
- Mark K. Greco ,
- Luc Martens &
- Wout Joseph
-

Pour ouvrir les liens internet OU LES PHOTOS ET GRAPHIQUES :
Cliquez sur contrôle en même temps que sur la figure
OU sur :

[Image en taille réelle](#)

Les insectes sont continuellement exposés à des champs électromagnétiques de radiofréquence (RF) à différentes fréquences. La gamme de fréquences utilisées pour les systèmes de télécommunications sans fil augmentera dans un avenir proche, passant de moins de 6 GHz (2 G, 3 G, 4 G et WiFi) à des fréquences allant jusqu'à 120 GHz (5 G). Cet article est le premier à rendre compte de la puissance électromagnétique RF absorbée dans quatre types d'insectes différents en fonction de la fréquence de 2 GHz à 120 GHz. Un ensemble de modèles d'insectes a été obtenu en utilisant une nouvelle imagerie Micro-CT (tomographie par ordinateur). Ces modèles ont été utilisés pour la première fois dans des simulations électromagnétiques dans le domaine temporel à différences finies. Tous les insectes ont montré une dépendance de la puissance absorbée sur la fréquence. Tous les insectes ont montré une augmentation générale de la puissance RF absorbée à et au-dessus de 6 GHz, par rapport à la puissance RF absorbée au-dessous de 6 GHz. Nos simulations ont montré qu'un déplacement de 10% de la densité de puissance incidente vers des fréquences supérieures à 6 GHz entraînerait une augmentation de la puissance absorbée entre 3 et 370%.

introduction

Les champs électromagnétiques radioélectriques (RF) permettent des communications sans fil entre des milliards d'utilisateurs dans le monde. Actuellement, cela se produit principalement à des fréquences RF situées entre 100 MHz et 6 GHz ¹. Les stations de base de télécommunications sans fil sont les sources dominantes de RF-EMF extérieurs ¹. Les humains et les animaux sont exposés à ces champs, qui sont partiellement absorbés par leur corps, par exemple pour les insectes signalés en ². La dose absorbée dépend de la fréquence ^{3,4} et peut être fortement augmentée lorsqu'une résonance complète ou partielle du corps se produit ³. Cette absorption RF a déjà été étudiée pour

des insectes particuliers à différentes fréquences individuelles: 27 MHz ^{5,6}, 900–915 MHz ^{6,7,8} et 2450 MHz ⁹.

Cette absorption peut provoquer un échauffement diélectrique ¹⁰. Le chauffage affecte le comportement, la physiologie et la morphologie des insectes ¹¹. Des revues d'études qui étudient le chauffage RF des insectes sont présentées dans ^{12,13,14}. D'autres auteurs se concentrent sur l'exposition aux RF dans l'environnement des insectes ^{15,16} ou exposent les insectes au rayonnement RF afin d'étudier les effets biologiques potentiels ^{17,18}. Il existe des études sur les effets non thermiques de l'exposition aux RF-EMF: ¹⁹ présente une revue des mécanismes potentiels d'effets non thermiques et une revue des effets non thermiques de l'exposition aux CEM fauniques est présentée dans ²⁰. La plupart des études existantes portent sur les fréquences RF inférieures à 6 GHz. Les mêmes fréquences auxquelles fonctionnent les générations actuelles de télécommunications ¹. Cependant, en raison d'une demande accrue de bande passante, on s'attend généralement à ce que la prochaine génération de fréquences de télécommunications fonctionne à des longueurs d'onde dites millimétriques: 30–300 GHz ^{21,22}. Par conséquent, les futures longueurs d'onde des champs électromagnétiques utilisés pour les systèmes de télécommunications sans fil diminueront et deviendront comparables à la taille corporelle des insectes et, par conséquent, l'absorption des RF-EMF chez les insectes devrait augmenter. L'absorption d'énergie RF a été démontrée chez des insectes entre 10 et 50 GHz ²³, mais aucune comparaison n'a été démontrée avec l'absorption RF à des fréquences inférieures à 10 GHz. La section efficace radar des insectes a été déterminée au-dessus de 10 GHz, mais cette quantité comprend à la fois la diffusion et l'absorption ²⁴. On ignore actuellement comment la puissance RF totale absorbée chez les insectes dépend de la fréquence à laquelle ils sont exposés.

La plupart des études citées précédemment dépendent de mesures utilisant des équipements RF tels que des antennes, des guides d'ondes et des sondes diélectriques pour déterminer l'absorption des RF-EMF chez les insectes. Une autre approche consisterait à utiliser des simulations numériques. Cette approche était auparavant utilisée pour déterminer l'absorption des RF-EMF chez l'homme et nécessite des modèles numériques ou des fantômes ^{25,26,27,28}.

Des techniques de création de modèles d'insectes hétérogènes et tridimensionnels avec une résolution micrométrique ont déjà été démontrées dans ²⁹.

Cependant, jusqu'à présent, les fantômes d'insectes n'ont pas été utilisés dans les simulations électromagnétiques.

Les objectifs de cette étude étaient, pour la première fois, d'évaluer numériquement l'absorption RF-EMF dans des modèles réels d'insectes et de déterminer une différence potentielle d'absorption RF chez les insectes due aux réseaux de télécommunications actuels et futurs. Dans ce but, nous avons étudié la puissance RF absorbée dans quatre modèles d'insectes différents obtenus en utilisant l'imagerie micro-CT en fonction de la fréquence dans une large bande, de 2 GHz à 120 GHz, qui couvre à la fois les bandes de télécommunications sans fil existantes et futures. Une précision de voxel de l'ordre de 5 à 20 μm est obtenue, nécessaire pour des simulations électromagnétiques précises.

Les méthodes

Les insectes

Abeille australienne sans dard (*Tetragonula carbonaria*)

Cette abeille (*Tetragonula carbonaria*) est originaire d'Australie. L'insecte scanné mesurait environ 4,5 mm de long, 3,0 mm de large et avait une masse de 2,5 mg.

Abeille à miel (*Apis mellifera*)

Cette abeille (*Apis mellifera*) est originaire d'Europe. C'est l'abeille la plus commune. L'échantillon étudié mesurait environ 11,0 mm de long, 5,0 mm de large et avait une masse de 900 mg.

Criquet pèlerin (*Schistocerca gregaria*)

Le criquet étudié (*Schistocerca gregaria*) mesurait environ 55,0 mm de long, 18,0 mm de large et avait une masse approximative de 3,5 g.

Coléoptère (*Geotrupes stercorarius*)

Le coléoptère étudié est un coléoptère dor (*Geotrupes stercorarius*). Le scarabée a été trouvé et scanné (voir ci-dessous) à l'Université d'Aberdeen en Écosse. La longueur du scarabée était de 8,01 mm et sa largeur de 4,5 mm. La masse de l'insecte n'a pas été mesurée au moment du balayage. La masse moyenne d'un coléoptère dor est de 220 mg ³⁰.

Méthodes de numérisation

Abeille australienne sans dard

Les analyses MicroCT ont été effectuées avec un système MicroCT haute résolution Skyscan 1172 (Bruker MicroCT, Kontich, Belgique). Ce système a un tube à rayons X microfocal scellé avec une taille de tache focale de 5 μm . Les rayons X ont été produits en exposant l'anode à 40 kV à 100 μA . Avant le balayage, l'échantillon contenant l'insecte a été placé sur le piédestal entre la source de rayons X et le détecteur CCD. Après avoir positionné l'échantillon, 600 images radiographiques 2D sur 180° ont été capturées en exposant l'échantillon puis en le tournant vers la position d'exposition suivante avec une distance de rotation tranche à tranche de 2 μm , et un temps d'acquisition total d'environ 60 min: chaque image 2D représente une tranche. Le logiciel du scanner a ensuite converti chaque tranche en orientation axiale et créé 998 images bitmap (échelle de gris 16 bits) qui ont été stockées pour la visualisation 2D et la reconstruction 3D sous la forme d'un ensemble de données de 983 Mo. La taille de voxel isotrope résultante était de 5 μm .

Abeille à miel

Un scanner MicroCT de paillasse (système d'imagerie MicroCT Quantum GX, PerkinElmer, Hopkinton, MA, États-Unis) à la National Sydney University National Imaging Facility (Sydney, Australie) a été utilisé pour scanner l'abeille. Les paramètres suivants ont été utilisés: 50 kVp, 80 μA , matrice d'image haute résolution 2048 \times 2048 pixels, avec 20 μm taille de voxel isotrope. Le temps de balayage était de 3,0 s pour chacune des 180 projections avec une rotation de 3,0 s entre chaque projection. La durée totale du scan était d'environ 18 min par abeille entière. Le logiciel de numérisation MicroCT de paillasse Quantum GX a été utilisé pour reconstruire les 180 images de projection, puis pour les convertir en une pile d'images de rendu 2D de 512 images bitmap 16 bits. Les données de volume d'abeille ont ensuite été acquises en chargeant la pile d'images dans le logiciel de rendu de volume BeeView (DISECT Systems Ltd, Suffolk, Royaume-Uni).

Criquet pèlerin

Le criquet a été suspendu verticalement dans un tube acrylique de 30 mm qui a été monté

hermétiquement sur la platine d'inclinaison du micro-CT. Cette étape a été utilisée pour s'assurer que l'axe de rotation était à 90° par rapport à la source de rayons X. Les facteurs d'exposition étaient: 50 kVp et 198 μ A. Les données étaient isotropes 16 bits 2000×2000 pixels avec 1048 lignes. La taille des pixels était de 10,469 μ m. Le logiciel Skyscan NRecon version 1.5.1.4 (Bruker, Kontich, Belgique) a été utilisé pour reconstruire les données de projection ³¹. Après avoir obtenu les données de projection sous la forme d'une pile d'images de fichiers TIFF 2D, les données ont été vues comme un modèle 3D à l'aide du logiciel Disect, DISECT Systems ²⁹.

Scarabée

Le scarabée a été scanné à l'Université d'Aberdeen sur un scanner Micro-CT Skyscan 1072 (Bruker, Kontich, Belgique) en utilisant 50 kV et 197 μ A, à 10,46 μ m pixels de manière isotrope. Les images ont ensuite été converties en tranches axiales à l'aide du logiciel NRECON de Skyscan (version 1.4). La pile d'images axiales produite a ensuite été traitée et analysée à l'aide du logiciel Tomomask (www.tomomask.com) avant d'être visualisée en détail.

Développement de modèles 3D

Les modèles 3D des insectes ont été créés à l'aide du logiciel TomoMask (www.tomomask.com). La pile d'images pour chaque insecte a d'abord été importée dans le logiciel avec les détails de l'espacement des pixels et des tranches. Les régions à convertir en modèle 3D sont définies dans TomoMask en dessinant un masque des régions souhaitées sur chaque tranche. Cela peut être fait automatiquement en utilisant la fonction Masque de luminance qui crée un masque basé sur le niveau de gris des pixels. Les valeurs seuils pour le masque sont définies pour inclure tous les tissus d'insectes, mais excluront les cavités d'air et les structures très fines, telles que les ailes. Le modèle 3D (généralisé par un algorithme de cubes en marche ³²) est exporté en STL (STereo Lithography) ³³ fichier de format. Les fichiers STL décrivent uniquement la géométrie de surface d'un objet tridimensionnel sans aucune représentation de couleur ou de texture. Typiquement, un certain lissage des modèles est nécessaire et cela est réalisé en utilisant le schéma de lissage Taubin λ / μ ³⁴ mis en œuvre dans MeshLab ³⁵. La méthode Taubin est efficace pour éliminer le bruit tout en préservant les formes et les caractéristiques. Les dimensions des modèles et l'intégrité du maillage sont enfin vérifiées (et corrigées si nécessaire) à l'aide de Netfabb (Autodesk, San Rafael, CA, USA).

Propriétés diélectriques

La propagation des champs électromagnétiques à l'intérieur et autour des fantômes d'insectes 3D obtenus dépendra de leurs propriétés diélectriques: la permittivité relative (ϵ_r) et la conductivité (σ). Dans cette étude, nous avons exécuté et nous sommes appuyés sur une revue de la littérature des mesures antérieures des propriétés diélectriques des insectes, en utilisant principalement la méthode de la sonde à ligne coaxiale ³⁶. Il existe des méthodes alternatives. Un résonateur toroïdal a été utilisé pour déterminer les propriétés diélectriques de deux insectes à 2370 MHz ³⁷. Les propriétés diélectriques des charançons du riz (*Sitophilus oryzae*) sont obtenues en utilisant la méthode de la sonde coaxiale pour des fréquences de $5 \times 10^4 - 2 \times 10^{10}$ Hz ². La même technique a été utilisée sur trois autres insectes: le coléoptère de la farine rouge (*Tribolium castaneum*), le coléoptère des dents de scie (*Oryzaephilus surinamensis*) et le pyrale du grain (*Rhyzopertha dominica*), de 0,2 à 20 GHz ³⁶. La même méthode a également été utilisée pour mesurer les propriétés diélectriques de quatre insectes: le Codling Moth (*Cydia pomonella*), l'Indian Mealmoth (*Plodia interpunctella*), la mouche mexicaine des fruits (*Anastrepha ludens*) et le Navel Orange Worm (*Amyelois transitella*) du 27. –1800 MHz ⁶. Mesures coaxiales sur un coléoptère du Colorado (*Leptinotarsa decemlineata*) ont été effectuées de 0,1 à 26,5 GHz et utilisées pour dériver un ajustement aux données de mesure ³⁸.

Nous avons regroupé les séries de données, partie réelle et imaginaire de ϵ_r en fonction de la fréquence, obtenues par [6, 36, 38] et les avons interpolées de 2 à 120 GHz par pas de 0,1 GHz. Nous avons ensuite fait la moyenne de toutes les données disponibles à chaque pas de fréquence considéré dans les simulations.

Simulations numériques

La technique FDTD (Finite-Difference Time-Domain) mise en œuvre dans le logiciel de simulation commercial Sim4life (ZMT, Zurich, Suisse) est utilisée pour évaluer l'absorption des RF-EMF à l'intérieur des insectes en fonction de la fréquence. Cette technique est couramment utilisée pour déterminer l'absorption des RF-EMF dans des modèles hétérogènes du corps humain [3]. La méthode FDTD nécessite de discrétiser le domaine de simulation à l'aide d'une grille tridimensionnelle. Le domaine de simulation est divisé en un certain nombre de cubes (discrétisés) avec des extensions spatiales qui sont définies par les étapes de la grille spatiale dans le domaine de simulation. Les RF-EMF peuvent être incidentes de n'importe quelle direction. Par conséquent, nous avons choisi de travailler avec 12 ondes planes incidentes avec une intensité de champ électrique quadratique moyenne de 1 V/m, illustrée sur la Fig. 1, selon 6 directions définies par des axes cartésiens, avec deux polarisations orthogonales des RF-EMF incidentes le long de chaque axe.

Figure 1 <https://www.nature.com/articles/s41598-018-22271-3/figures/1>



[Cliquez sur contrôle en même temps que sur la figure](#)

Illustration de la configuration d'exposition RF-EMF. L'insecte (Beetle montré ici en rose) est exposé à douze ondes planes RF incidentes de six directions le long des directions positive et négative des axes cartésiens indiqués en bas à gauche avec deux polarisations orthogonales pour chaque direction. Les douze vecteurs d'onde \vec{k}_{ij} sont indiqués en bleu (flèches pointillées), tandis que la polarisation des champs électriques incidents \vec{E}_{ij} sont indiqués en rouge. i et j indiquent le numéro de configuration, de 1 à 12.

[Image en taille réelle](#)

L'exposition a été modélisée à l'aide d'ondes planes sinusoïdales (harmoniques) à fréquence unique. Nous n'avons pas pris en compte une modulation potentielle des ondes, qui pourraient être présentes dans des signaux de télécommunications réels. Cette même technique a déjà été utilisée pour évaluer la dépendance en fréquence de l'absorption RF dans le corps humain [3]. Des simulations ont été exécutées pour des ondes planes sinusoïdales à 7 fréquences harmoniques (simples): 2, 3, 6, 12, 24, 60 et 120 GHz. Cela a abouti à un ensemble de données de 4 (insectes) \times 7 (fréquences) \times 12 (ondes planes: 6 angles d'incidence \times 2 polarisations) = 336 simulations.

L'Australian Stingless Bee, le Western Honey Bee et le Beetle ont été discrétisés avec des pas de 0,05 mm dans chaque direction, tandis que le criquet plus gros a été discrétisé avec des pas de 0,2 mm dans chaque direction à des fréquences inférieures à 60 GHz et un pas de 0,1 mm à 60 GHz et 120 GHz. Ces étapes spatiales ont fourni un équilibre entre le temps de simulation (qui dépend du nombre d'étapes de la grille et de la taille relative des étapes de la grille par rapport à la longueur d'onde) et la résolution spatiale des caractéristiques des insectes. Une simulation FDTD stable donne des résultats reproductibles qui convergent dans le temps. Les quantités déterminées à l'aide de l'algorithme FDTD doivent converger vers une valeur constante à mesure que la simulation

progresses dans le temps. Après un certain temps de simulation, ces valeurs resteront constantes, c'est ce qu'on appelle un état stable. Un pas de grille inférieur à un dixième de la plus petite longueur d'onde dans le domaine de simulation est nécessaire pour une simulation FDTD stable³⁹. Ceci est une exigence de l'algorithme FDTD³⁹ et reste valable dans toutes nos simulations. La plus petite longueur d'onde dans les tissus ($\lambda / \epsilon_r - \sqrt{\epsilon_r}$) (λ / ϵ_r) est de 1,1 mm à 120 GHz. À cette fréquence, nous avons utilisé des pas de grille de 0,05 mm ($\leq 0,045 \times \lambda / \epsilon_r - \sqrt{\epsilon_r}$) ($\leq 0,045 \times \lambda / \epsilon_r$) pour tous les insectes, sauf pour le criquet où nous avons utilisé 0,1 mm ($\leq 0,09 \times \lambda / \epsilon_r - \sqrt{\epsilon_r}$) ($\leq 0,09 \times \lambda / \epsilon_r$). Nous nous sommes assurés que les marches du réseau étaient suffisamment petites pour éviter les déconnexions dans les modèles. Tous les insectes ont été considérés comme constitués de tissus homogènes avec des paramètres diélectriques dépendants de la fréquence obtenus en moyenne des valeurs que nous avons trouvées dans la littérature (section précédente). Il s'agit d'une approximation, car les vrais insectes ont des propriétés tissulaires hétérogènes. Chaque simulation a été exécutée jusqu'à ce qu'un état stationnaire soit atteint. Le nombre de périodes nécessaires pour atteindre une solution à l'état d'équilibre dépendait de l'insecte étudié et de la fréquence et était compris entre 20 et 80. Cela a été contrôlé par une surveillance temporelle de l'intensité du champ électrique le long d'une ligne dans le domaine de la simulation jusqu'à ce qu'elle atteigne un état stationnaire. De plus, le nombre choisi de périodes de simulation a permis une propagation d'au moins 3 fois la longueur de la diagonale des insectes (voir tableau 1).

Tableau 1 Dimensions des modèles d'insectes étudiés selon les différents axes représentés sur la figure 1.

<https://www.nature.com/articles/s41598-018-22271-3/tables/1>

Table pleine grandeur

Après chaque simulation, la puissance RF-EMF absorbée (P_{abs}) de l'insecte a été extraite. Le P_{abs} est calculé comme le produit de la conductivité et de l'intensité du champ électrique carré intégrés sur le volume de l'insecte. Le taux d'absorption spécifique moyen du corps entier peut être obtenu en divisant P_{abs} par la masse des insectes (en supposant une densité de masse homogène). La puissance RF-EMF absorbée est généralement utilisée comme indicateur indirect du chauffage des tissus diélectriques¹⁰. Nous n'avons pas exécuté de simulations thermiques complètes en raison d'incertitudes sur les capacités calorifiques spécifiques des insectes et les mécanismes de dissipation thermique.

Résultats

Modèles 3D

La figure 2 montre les modèles 3D utilisés obtenus en utilisant la micro-tomodensitométrie de quatre insectes.

Figure 2 <https://www.nature.com/articles/s41598-018-22271-3/figures/2>



Cliquez sur contrôle en même temps que sur la figure

Vue frontale, latérale et de dessus des quatre insectes étudiés. (**a**) abeille australienne, (**b**) abeille

occidentale, (**c**) coléoptère, et (**d**) criquet.

[Image en taille réelle](#)

Propriétés diélectriques

La figure 3 montre les parties imaginaires et réelles de ϵ_r obtenues en faisant la moyenne des valeurs disponibles dans 6, 36, 38. La partie réelle est positive et décroît avec la fréquence, tandis que la partie imaginaire est négative (support avec perte) et affiche un minimum entre 10 et 20 GHz. Celles-ci sont conformes aux courbes diélectriques de Debye proposées en 38. La figure 3 ajoute une perspective supplémentaire en montrant la conductivité correspondante (S / m) et la profondeur de pénétration RF.

figure 3



[Cliquez sur contrôle en même temps que sur la figure](#)

De haut en bas: partie réelle de la permittivité diélectrique utilisée, partie imaginaire de la permittivité diélectrique utilisée et conductivité avec la profondeur de pénétration RF-EMF en tant qu'encart. Les marqueurs montrent les mesures obtenues de la littérature. La ligne noire avec des marqueurs circulaires montre la moyenne sur la série de données disponibles à ces fréquences.

[Image en taille réelle](#)

Simulations numériques

La figure 4 illustre la dépendance en fréquence de l'absorption des RF-EMF dans l'abeille domestique en termes de rapport entre l'intensité du champ électrique à l'intérieur de l'insecte et le champ électrique maximum dans le domaine de la simulation. Aux fréquences actuellement utilisées pour les télécommunications (<6 GHz), la longueur d'onde est relativement grande par rapport aux insectes et les ondes ne pénètrent pas dans les insectes, ce qui se traduit par des valeurs de P_{abs} plus faibles. À 12–24 GHz, les champs pénètrent de plus en plus dans l'insecte à mesure que la longueur d'onde devient comparable à la taille des insectes et que la conductivité augmente également. Aux fréquences les plus élevées étudiées, les champs pénètrent moins profondément dans l'insecte, mais leur amplitude est plus élevée, entraînant une P_{abs} similaire ou légèrement inférieure.

Figure 4 [Cliquez sur contrôle en même temps que sur la figure](#)



Intensité de champ électrique normalisée (dB) dans une section transversale mi-transversale de l'abeille à miel en fonction de la fréquence pour une onde plane incidente par le bas avec une polarisation orthogonale au plan illustré (n° 5 sur la figure 1). La normalisation a été exécutée pour chaque simulation séparément, c'est-à-dire que E_{max} peut être différent dans chaque sous-

figure.

[Image en taille réelle](#)

La figure 5 montre la moyenne linéaire de P_{abs} sur les douze ondes planes en fonction de la fréquence pour tous les insectes étudiés. La puissance absorbée augmente avec l'augmentation de la fréquence de 2 à 6 GHz pour tous les insectes exposés à une densité de puissance incidente constante ou une intensité de champ électrique incident de 1 V / m. La puissance absorbée chez le Criquet pèlerin, le plus grand insecte étudié, diminue légèrement aux fréquences étudiées > 6 GHz, mais reste plus élevée qu'à 2 et 3 GHz. Le Western Honeybee montre une augmentation jusqu'à 12 GHz, suivie d'une légère diminution jusqu'à 120 GHz (P_{abs} reste plus de $10 \times$ supérieur à <6 GHz). L'abeille australienne plus petite montre une augmentation de P_{abs} avec une fréquence jusqu'à 60 GHz et une légère diminution à 120 GHz. Le Pabs dans le Beetle augmente jusqu'à 24 GHz et diminue légèrement à des fréquences plus élevées.

Figure 5 Cliquez sur contrôle en même temps que sur la figure



P_{abs} pour un champ incident de 1 V / m en fonction de la fréquence pour tous les insectes étudiés. Les marqueurs indiquent la moyenne sur les douze ondes planes à chacune des fréquences simulées, tandis que les moustaches indiquent les valeurs P_{abs} minimales et maximales obtenues au cours des simulations.

[Image en taille réelle](#)

Le tableau 1 énumère les dimensions des différents insectes étudiés, par rapport à la gamme de longueur d'onde λ dans laquelle les P_{abs} maximaux seront situés. Le P_{abs} est simulé pour des pas de fréquence discrets. Par conséquent, le λ_{max} qui correspond au maximum P_{abs} est situé entre la longueur d'onde étapes juste en dessous et au-dessus de l'étape de longueur d'onde qui correspond à la simulation maximale P_{abs} , voir Fig. 4. La diagonale principale de la boîte englobante des insectes se situe dans la plage dans laquelle la longueur d'onde d'absorption maximale λ_{max} est localisé pour trois des quatre insectes étudiés. Cela indique que l'absorption est (en partie) déterminée par la taille des insectes.

Les simulations numériques ne sont jamais identiques à la réalité et il existe toujours des incertitudes associées à toute technique de simulation EM. Nous rapportons les sources d'incertitude suivantes: variations du modèle et variation des propriétés diélectriques.

Les modèles d'insectes sont scannés avec une résolution de 20 μm , 10,5 μm , 10,5 μm et 5 μm , respectivement pour l'abeille domestique, le criquet pèlerin, le scarabée et l'abeille australienne sans dard. Ce sont 40%, 5–10%, 21% et 10% du pas de grille spatiale utilisé dans les simulations de l'abeille domestique (0,05 mm), du criquet (0,1–0,2 mm), du scarabée (0,05 mm), et l'Australian Stingless Bee (0,05 mm), respectivement. Cela indique que le pas de grille est dominant dans la détermination des étendues spatiales des modèles utilisés et non la résolution de la méthode de balayage. Afin d'étudier l'effet de l'étape de la grille choisie sur les obtenues P_{abs} valeurs, nous avons exécuté la simulation avec la configuration 9 (Fig. 1) à 120 GHz avec un pas de grille

maximal qui est la moitié du pas de grille utilisé dans nos simulations utilisant les quatre insectes étudiés. Nous supposons le plus grand effet de la taille des pas de la grille à la fréquence la plus élevée. Une réduction de 50% du pas de la grille (modélisation plus précise) a entraîné des écarts de 1,1%, 2,5%, 0,32% et 0,24%, respectivement pour l'abeille domestique, le criquet pèlerin, le scarabée et l'abeille australienne sans dard. Ces écarts sont faibles par rapport aux variations en fonction de la fréquence, voir Fig. 5, et l'incertitude causée par les paramètres diélectriques, voir le paragraphe suivant.

Les écarts sur ϵ_r influenceront P_{abs} : la partie réelle de ϵ_r déterminera (en partie) l'amplitude des champs électriques internes, tandis que P_{abs} évolue linéairement avec la conductivité. Les écarts relatifs maximaux sur la partie réelle et imaginaire de ϵ_r sont de (-13, +36)% et (-40, +36)%, respectivement, qui se produisent entre 2 et 3 GHz. Nous avons exécuté une simulation en utilisant la configuration 1 à 2 GHz pour le fantôme de Beetle, illustré sur la figure 1, en utilisant cinq ensembles différents de propriétés diélectriques tenant compte des écarts mentionnés ci-dessus: $[Re(\epsilon_r), Im(\epsilon_r)]$, $[1,36 \times Re(\epsilon_r), 1,36 \times Im(\epsilon_r)]$, $[1,36 \times Re(\epsilon_r), 0,6 \times Im(\epsilon_r)]$, $[0,87 \times Re(\epsilon_r), 1,36 \times Im(\epsilon_r)]$, et $[0,87 \times Re(\epsilon_r), 0,6 \times Im(\epsilon_r)]$, afin de déterminer l'effet de l'incertitude des propriétés diélectriques sur P_{abs} . Nous avons trouvé des écarts relatifs maximaux de [-57, +59]% par rapport à la valeur obtenue en utilisant $[Re(\epsilon_r), Im(\epsilon_r)]$. Ces écarts sont faibles en comparaison des variations en fonction de la fréquence, voir Fig. 5.

Des études antérieures ont indiqué qu'il pourrait exister de grandes différences dans les propriétés diélectriques entre les insectes adultes et les larves 40. Des pires écarts de $[Re(\epsilon_r)/7, Im(\epsilon_r)/5]$ à 5 GHz et $[Re(\epsilon_r)/6, Im(\epsilon_r)/8]$ à 15 GHz ont été observés dans 40. Nous avons exécuté des simulations de la configuration 1 en utilisant le scarabée (montré sur la figure 1) à 6 GHz et 12 GHz où nous avons appliqué ces paramètres diélectriques réduits. Nous avons constaté une augmentation de P_{abs} de 4% à 6 GHz et une diminution de 66% de P_{abs} à 12 GHz. La figure 5 montre que ces variations sont plus petites que les variations que nous avons observées pour des angles d'incidence variables à une fréquence fixe.

Discussion

Dans cette étude, nous avons évalué l'absorption des RF-EMF chez les insectes en fonction de la fréquence. Dans ce but, nous avons obtenu de nouveaux modèles d'insectes en utilisant l'imagerie micro-CT, qui ont été utilisés dans les simulations FDTD. Dans ces simulations, ils ont été exposés à des ondes planes incidentes de six directions et de deux polarisations.

La fréquence des ondes planes harmoniques incidentes variait de 2 à 120 GHz et donnait P_{abs} en fonction de la fréquence.

Des études antérieures ont montré que l'imagerie micro-CT peut être utilisée avec succès comme technique non invasive pour scanner avec précision les insectes et développer des modèles 3D avec une résolution micrométrique 29, 41. Des modèles avec une résolution micrométrique sont nécessaires pour obtenir des résultats précis dans les simulations FDTD à 120 GHz ($\lambda = 2,5$ mm), car une discrétisation de $\lambda/10$ dans le domaine de la simulation est recommandée pour obtenir des résultats stables 39. Il a été démontré pour les modèles du corps humain que les modèles anatomiques réels donnent généralement des résultats plus précis et réalistes que les modèles approximatifs 3, 25, 28. Par conséquent, nous nous attendons également à ce que nos véritables modèles d'insectes conduisent à des résultats plus précis concernant la puissance RF absorbée que, par exemple, les fantômes cylindriques de différents diamètres et hauteurs, qui ont été utilisés dans des études antérieures sur l'exposition aux RF des insectes 42.

Les propriétés diélectriques attribuées aux insectes étudiés ont été obtenues à partir d'une interpolation de données trouvées dans la littérature. Idéalement, les simulations devraient être exécutées avec des propriétés diélectriques mesurées dans les insectes réels qui ont été utilisés pour créer les modèles. La figure 3 montre que la plupart des insectes présentent un comportement en fréquence similaire, que nous avons calculé en utilisant une interpolation sur les valeurs répertoriées dans la littérature.

Nos simulations numériques montrent que l'absorption des RF-EMF dans les modèles d'insectes dépend de la fréquence. Le P_{abs} est le plus petit aux fréquences les plus basses étudiées 2 GHz et 3 GHz, pour tous les insectes. P_{abs} montre un pic, qui dépend de la taille et / ou de la masse des insectes. Les trois petits insectes montrent leur maximum à une fréquence supérieure à 6 GHz: 60 GHz, 24 GHz et 12 GHz pour l'Australian Stingless Bee, le Beetle et le Honey Bee, respectivement. Le criquet montre un maximum à 6 GHz. Nous attribuons ce comportement fréquentiel à deux effets: premièrement, l'efficacité du couplage RF-EMF dans les modèles est maximale à des fréquences comparables à la longueur des insectes, comme le tableau 1 illustre. D' autre part, l'interpolation de la partie imaginaire de la constante diélectrique présente un minimum à 12 GHz, ce qui signifie que les champs électromagnétiques RF peuvent provoquer la plus grande SAR locale à ces fréquences, voir Fig. 3.

La différence entre le P_{abs} maximal et minimal trouvé à une fréquence pour différents angles d'incidence est plus faible aux fréquences > 6 GHz, qu'aux fréquences < 6 GHz, en particulier pour les trois plus petits insectes. Cela indique que l'angle d'incidence est moins important à ces fréquences. Cela suggère qu'il y a peu de différence d'efficacité lors du dépôt de puissance RF chez les insectes étudiés avec une seule onde plane par rapport au dépôt de la même puissance en utilisant des sources non corrélées ou des réflexions provenant de toutes les directions. Dans cette étude, nous n'avons utilisé que des simulations à onde plane unique pour déterminer P_{abs} . La moyenne sur P_{abs} n'inclut pas les effets d'interférence, qui pourraient entraîner des limites inférieures (interférence destructrice) ou supérieures (interférence constructive) sur les valeurs de P_{abs} indiquées sur la figure 5.

Un comportement de fréquence similaire (augmentation, pic, diminution et dépendance à la taille du corps) est observé dans les modèles de corps humain 3,4. Cependant, à des fréquences qui sont à peu près un facteur 100 à 1 000 fois plus faibles, car le corps humain est à peu près du même ordre de grandeur plus grand que celui des insectes étudiés. Par exemple, le modèle de corps humain adulte hétérogène Duke montre une augmentation des P_{abs} de 10 MHz à 80 MHz, un pic entre 80 MHz et 90 MHz, suivi d'une diminution des P_{abs} (et d'un deuxième pic à des fréquences plus élevées) 3. Le petit fantôme enfant Thelonus montre une augmentation des P_{abs} de 10 MHz à 100 MHz, un pic entre 100 MHz et 200 MHz, suivi d'une diminution de P_{abs} 3.

Afin de quantifier l'effet d'un passage à des fréquences de télécommunication plus élevées sur P_{abs} , on peut utiliser les données présentées sur la figure 5. Si nous supposons un E_{rms} incident = 1 V / m qui est uniformément réparti sur 2, 3 et 6 GHz, nous trouvons des valeurs moyennes de P_{abs} de 0,71 nW, 2,6 nW, 5,7 nW et 990 nW, pour l'Australian Stingless Bee, le scarabée, l'abeille et le criquet, respectivement. Si nous supposons que 10% de ce champ incident seraient uniformément répartis sur les fréquences supérieures à 6 GHz, le P_{abs} augmente à 2,6 nW, 7,7 nW, 14 nW et 1,0 μ W, pour l'Australian Stingless Bee, le Beetle, le Honey Bee et le Locust, respectivement. Ce sont des augmentations de 370%, 290%, 240% et 3%, respectivement. Notez qu'il s'agit d'une estimation prudente de l'augmentation de P_{abs} , car nous supposons un champ incident constant et une distribution uniforme des fréquences actuellement utilisées < 6 GHz. De nos jours, la majeure partie de la densité de puissance incidente utilisée pour les télécommunications se situe à des fréquences \leq 2 GHz 1, où tous les insectes présentent un P_{abs} minimal. Dans une approximation

isolée (pas de convection ou de conduction) et sous l'hypothèse d'une masse immuable et d'une capacité thermique spécifique, le taux d'augmentation de la température évolue linéairement avec l'augmentation de P_{abs} . À titre d'exemple, pour l'Australian Stingless Bee (masse = 2,5 mg), un P_{abs} de 3×10^{-8} W est estimé pour un champ incident de 1 V / m à 60 GHz. Dans l'hypothèse où l'insecte a une capacité thermique spécifique égale à celle de l'eau (4179 J / K kg⁴³), cette exposition aux RF-EMF entraînerait une augmentation de la température de 3×10^{-6} K / s, dans une approximation isolée .

Forces et limites

Notre article présente plusieurs forces et contributions claires à l'état de l'art en littérature. À notre connaissance, c'est le seul papier dans lequel de vrais insectes sont utilisés pour créer des modèles de simulation numérique. De plus, c'est le premier article qui étudie l'exposition des champs électriques avec des fréquences RF associées à la communication sans fil 5 G et qui montre que la puissance absorbée des insectes devrait augmenter dans des conditions environnementales inchangées par rapport à celle des systèmes de communication sans fil actuels (3 G et 4 G). Un inconvénient de notre étude est l'utilisation de modèles homogènes dans les simulations, alors que les vrais insectes auront des paramètres tissulaires hétérogènes. Des variations des paramètres diélectriques peuvent exister à une échelle inférieure à la résolution spatiale que toute méthode de balayage peut actuellement obtenir⁴⁴. La méthode FDTD nécessite une division du domaine de simulation en un certain nombre de voxels, qui doivent chacun se voir attribuer des propriétés diélectriques homogènes³⁹. Toute simulation numérique sera une approximation de la réalité. À notre connaissance, la méthode FDTD, bien que confrontée à des incertitudes^{3, 39, 44} est la meilleure méthode de simulation actuellement disponible pour estimer les quantités étudiées dans ce manuscrit. Cet article se limite à la dosimétrie électromagnétique, qui se concentre sur la détermination des valeurs de puissances absorbées. Ceux-ci peuvent être utilisés comme entrée dans la modélisation thermique des insectes. Cependant, une analyse thermique complète sortait du cadre de cet article. Enfin, nous avons inclus les variations d'angles et de polarisations des ondes incidentes. Cependant, nous n'avons examiné qu'un nombre limité d'ondes planes, alors que l'exposition réelle est composée d'ondes planes de n'importe quelle direction.

La recherche future

Dans nos futures recherches, nous aimerions modéliser davantage d'insectes pour mieux comprendre la dépendance en fréquence de la puissance RF-EMF absorbée en fonction de la taille des insectes. Nous aimerions également développer des modèles d'insectes hétérogènes avec des paramètres diélectriques spécifiques aux tissus. Enfin, notre objectif est de déterminer l'effet de l'absorption des RF-EMF sur la température centrale des insectes en fonction de la fréquence. Dans ce but, nous voulons utiliser des mesures de température infrarouge d'insectes exposés à des champs électromagnétiques élevés en fonction de la fréquence.

Conclusions

Nous avons étudié la puissance électromagnétique radiofréquence absorbée dans quatre insectes réels différents en fonction de la fréquence de 2 à 120 GHz. L'imagerie micro-CT a été utilisée pour obtenir des modèles réalistes d'insectes réels. Ces modèles ont reçu des paramètres diélectriques obtenus à partir de la littérature et utilisés dans des simulations de domaine temporel à différences finies. Tous les insectes montrent une dépendance de la puissance absorbée à la fréquence avec une fréquence de crête qui dépend de leur taille et de leurs propriétés diélectriques. Les insectes

montrent un maximum de puissance de radiofréquence absorbée à des longueurs d'onde comparables à leur taille corporelle. Ils montrent une augmentation générale de la puissance radioélectrique absorbée au-dessus de 6 GHz (jusqu'aux fréquences où les longueurs d'onde sont comparables à leur taille corporelle), ce qui indique que si les densités de puissance utilisées ne diminuent pas, mais passer (en partie) à des fréquences plus élevées, l'absorption chez les insectes étudiés augmentera également. Un déplacement de 10% de la densité de puissance incidente vers des fréquences supérieures à 6 GHz entraînerait une augmentation de la puissance absorbée entre 3 et 370%. Cela pourrait entraîner des changements dans le comportement, la physiologie et la morphologie des insectes au fil du temps en raison d'une augmentation des températures corporelles, due au chauffage diélectrique. Les insectes étudiés inférieurs à 1 cm présentent un pic d'absorption à des fréquences (supérieures à 6 GHz), qui ne sont actuellement pas souvent utilisées pour les télécommunications, mais devraient être utilisées dans la prochaine génération de systèmes de télécommunications sans fil. Aux fréquences supérieures à la fréquence de crête (petites longueurs d'onde), la puissance absorbée diminue légèrement. Un déplacement de 10% de la densité de puissance incidente vers des fréquences supérieures à 6 GHz entraînerait une augmentation de la puissance absorbée entre 3 et 370%. Cela pourrait entraîner des changements dans le comportement, la physiologie et la morphologie des insectes au fil du temps en raison d'une augmentation des températures corporelles, due au chauffage diélectrique. Les insectes étudiés inférieurs à 1 cm présentent un pic d'absorption à des fréquences (supérieures à 6 GHz), qui ne sont actuellement pas souvent utilisées pour les télécommunications, mais devraient être utilisées dans la prochaine génération de systèmes de télécommunications sans fil. Aux fréquences supérieures à la fréquence de crête (petites longueurs d'onde), la puissance absorbée diminue légèrement. Un déplacement de 10% de la densité de puissance incidente vers des fréquences supérieures à 6 GHz entraînerait une augmentation de la puissance absorbée entre 3 et 370%. Cela pourrait entraîner des changements dans le comportement, la physiologie et la morphologie des insectes au fil du temps en raison d'une augmentation des températures corporelles, due au chauffage diélectrique. Les insectes étudiés inférieurs à 1 cm présentent un pic d'absorption à des fréquences (supérieures à 6 GHz), qui ne sont actuellement pas souvent utilisées pour les télécommunications, mais devraient être utilisées dans la prochaine génération de systèmes de télécommunications sans fil. Aux fréquences supérieures à la fréquence de crête (petites longueurs d'onde), la puissance absorbée diminue légèrement. Les insectes étudiés inférieurs à 1 cm présentent un pic d'absorption à des fréquences (supérieures à 6 GHz), qui ne sont actuellement pas souvent utilisées pour les télécommunications, mais devraient être utilisées dans la prochaine génération de systèmes de télécommunications sans fil. Aux fréquences supérieures à la fréquence de crête (petites longueurs d'onde), la puissance absorbée diminue légèrement. Les insectes étudiés inférieurs à 1 cm présentent un pic d'absorption à des fréquences (supérieures à 6 GHz), qui ne sont actuellement pas souvent utilisées pour les télécommunications, mais devraient être utilisées dans la prochaine génération de systèmes de télécommunications sans fil. Aux fréquences supérieures à la fréquence de crête (petites longueurs d'onde), la puissance absorbée diminue légèrement.

Les références

1. 1.

Bhatt, CRR *et coll* . Évaluation de l'exposition personnelle aux champs électromagnétiques radiofréquences en Australie et en Belgique à l'aide d'exposimètres calibrés sur le corps. *Environ. Res.* **151** , 547–563 (2016).

- [CAS](#)
- [Article](#)
- [PubMed](#)

- [Google Scholar](#) 2. 2.
-
- Nelson, SO Examen et évaluation de l'énergie des radiofréquences et des micro-ondes pour la lutte contre les insectes à grains stockés. *Transactions ASAE* **39** , 1475–1484 (1996).
- [Article](#)
 - [Google Scholar](#) 3. 3.
-
- Bakker, JF, Paulides, MM, Christ, A., Kuster, N. & van Rhoon, GC Évaluation du DAS induit chez les enfants exposés à des ondes planes électromagnétiques entre 10 MHz et 5,6 GHz. *Phys. Médecine Biol.* **55** , 3115–3130 (2010).
- [LES PUBLICITÉS](#)
 - [CAS](#)
 - [Article](#)
 - [Google Scholar](#) 4. 4.
-
- Hirata, A., Kodera, S., Wang, J. et Fujiwara, O. Facteurs dominants influençant le DAS moyen du corps entier en raison de l'exposition en champ lointain dans la fréquence de résonance du corps entier et les régions GHz. *Bioélectromagnétique.* **28** , 484–487 (2007).
- [Article](#)
 - [Google Scholar](#) 5. 5.
-
- Shrestha, B., Yu, D. & Baik, OD Élimination des cruptolestes ferrungineus s. dans le blé par chauffage diélectrique radiofréquence à différentes teneurs en humidité. *Programme. En électromagnétique. Res.* **139** , 517–538 (2013).
- [Article](#)
 - [Google Scholar](#) 6. 6.
-
- Wang, S., Tang, J., Cavalieri, RP & Davis, DC Chauffage différentiel des insectes dans les noix et les fruits séchés associé aux traitements par radiofréquence et micro-ondes. *Transactions ASAE* **46** , 1175–1182 (2003).
- [Google Scholar](#) 7. sept.
-
- Dubey, MK, Janowiak, J., Mack, R., Elder, P. & Hoover, K. Étude comparative du chauffage par radiofréquence et micro-ondes pour le traitement phytosanitaire du bois. *EUR. J. Wood Prod.* **74** , 491-500 (2016).
- [CAS](#)
 - [Article](#)
 - [Google Scholar](#)

Tang, J. Libérer les potentiels des micro-ondes pour la sécurité et la qualité des aliments. *J. Food Sci.* **80** , E1776 – E1793 (2015).

- [CAS](#)
- [Article](#)
- [PubMed](#)
- [PubMed Central](#)
- [Google Scholar](#)

9. 9.

Shayesteh, N. & Barthakur, NN Mortalité et comportement de deux espèces d'insectes des produits stockés pendant l'irradiation aux micro-ondes. *J. stocké Prod. Res* **32** , 239–246 (1996).

- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

10.dix.

Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants, Lignes directrices de l'ICNIRP pour limiter l'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques variant dans le temps (jusqu'à 300 GHz). *Guéris . Phys .* **74** , 494-522 (1998).

11.11.

Sanborn, A. Thermorégulation chez les insectes. encyclopédie de l'entomologie (2008).

12.12.

Das, I., Kumar, G. & Shah, NG Le chauffage par micro-ondes comme méthode alternative de quarantaine pour la désinfestation des céréales alimentaires stockées. *Int. J. Food Sci.* **2013** , 13 (2013).

- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

13.13.

Hansen, JD, Johnson, JA & Winter, DA Histoire et utilisation de la chaleur dans la lutte antiparasitaire: une revue. *Int. J. Pest Manag.* **57** , 267-289 (2011).

- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

14.14.

Wang, S. & Tang, J. Traitements alternatifs aux radiofréquences et aux micro-ondes pour la lutte contre les insectes des noix: une revue. *Int. Agric. Eng. J.* **10** , 105-120 (2001).

- [CAS](#)

- [Google Scholar](#) 15.15.

Balmori, A. Les champs électromagnétiques radiofréquence anthropiques comme une menace émergente pour l'orientation de la faune. *Sci. Total. Environ.* **518–519** , 58–60 (2015).

 - [Article](#)
 - [PubMed](#)
 - [Google Scholar](#)

16.16.

Vijver, MG *et al* . Étudier l'exposition à court terme aux champs électromagnétiques sur la capacité de reproduction des invertébrés dans la situation sur le terrain. *Electromagn Biol Med* **33** , 21-28 (2014).

 - [Article](#)
 - [PubMed](#)
 - [Google Scholar](#)

17.17.

Cammaerts, MC, Vandenbosch, GAE & Volski, V. Effet du rayonnement gsm à court terme à des niveaux représentatifs de la société sur un modèle biologique: la fourmi myrmica sabuleti. *J Insect Behav* **27** , 514–526 (2014).

 - [Article](#)
 - [Google Scholar](#)

18.18.

Marec, F. & Ondracek, BVJ L'effet de l'irradiation répétée aux micro-ondes sur la fréquence des mutations létales récessives liées au sexe chez la drosophile melanogaster. *Mutat. Res.* **157** , 163-167 (1985).

 - [CAS](#)
 - [Article](#)
 - [PubMed](#)
 - [Google Scholar](#)

19.19.

Pall, ML Les champs électromagnétiques agissent via l'activation des canaux calciques voltage-dépendants pour produire des effets bénéfiques ou néfastes. *J. Cell. Mol. Medicine* **17** , 958–965 (2013).

 - [CAS](#)
 - [Article](#)
 - [Google Scholar](#)

20.20.

Balmori, A. Electrosmog et conservation des espèces. *Sci. Total. Environ.* **496** , 314-316

(2014).

- [LES PUBLICITÉS](#)
- [CAS](#)
- [Article](#)
- [PubMed](#)
- [Google Scholar](#)

21.21.

Colombi, D., Thors, B. & Tornevik, C. Implications des limites d'exposition aux champs électromagnétiques sur les niveaux de puissance de sortie pour les appareils 5 G supérieurs à 6 Ghz. *Antennes IEEE Wirel. Propag. Lett.* **14** , 1247-1249 (2015).

- [LES PUBLICITÉS](#)
- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

22.22.

Pi, A. & Khan, F. Une introduction aux systèmes mobiles à large bande à ondes millimétriques. *IEEE Commun Mag* **49** , 101-107 (2011).

- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

23.23.

Halverson, SL, Burkholder, WE, Bigelow, TS, Nordheim, EV & Misenheimer, EM Rayonnement micro-ondes haute puissance comme méthode alternative de lutte contre les insectes pour les produits stockés. *J. Econ. Entomol.* **89** , 1638-1648 (1996).

- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

24.24.

Riley, JR Coupe transversale des insectes. *IEEE* **73** , 228-232 (1985).

- [LES PUBLICITÉS](#)
- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

25.25.

Findlay, RP et Dimbylow, P. Fdtd calculs du taux d'absorption d'énergie spécifique dans un modèle de voxel assis du corps humain de 10 MHz à 3 GHz. *Phys. Médecine Biol.* **51** , 2339-2352 (2006).

- [LES PUBLICITÉS](#)
- [CAS](#)
- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

26.26.

Dimbylow, P., Bolch, W. & Lee, C. Sar calculs de 20 MHz à 6 GHz dans le fantôme de voxel nouveau-né de l'université de Floride et leurs implications pour la dosimétrie. *Phys. Médecine Biol.* **55** , 1519-1530 (2010).

- [LES PUBLICITÉS](#)
- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

27.27.

Hand, JW, Li, Y. & Hajnal, JV Étude numérique de l'exposition aux RF et de l'augmentation de température qui en résulte chez le fœtus au cours d'une procédure de résonance magnétique. *Phys. Médecine Biol.* **55** , 913–930 (2010).

- [LES PUBLICITÉS](#)
- [CAS](#)
- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

28.28.

Christ, A. *et al* . La famille virtuelle, développement de modèles anatomiques en surface de deux adultes et deux enfants pour des simulations dosimétriques. *Phys. Médecine Biol.* **55** , N23–38 (2010).

- [LES PUBLICITÉS](#)
- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

29.29.

Greco, M., Tong, J., Soleimani, M., Bell, GD & Schafer, MO Imagerie du cerveau d'abeilles vivantes par radio-entomologie diagnostique mini-invasive. *J. Insect Sci.* **12** , 1-7 (2012).

- [Google Scholar](#)

30.30.

Nervo, B., Tocco, C., Caprio, E., Palestrini, C. & Rolando, A. Les effets de la masse corporelle sur l'efficacité de l'élimination des excréments chez les bousiers. *PLoS One* **9** , e107699 (2014).

- [LES PUBLICITÉS](#)
- [Article](#)
- [PubMed](#)
- [PubMed Central](#)
- [Google Scholar](#)

31.31.

Tarplee, M. & Corps, N. Microtomographe à rayons X de bureau Skyscan 1072 - protocoles d'échantillonnage, de reconstruction, d'analyse et de visualisation (2D et 3D). directives, notes, références sélectionnées et FAQ. disponible sur: <http://www.geog.qmul.ac.uk/docs/staff/4952.pdf> (consulté en mai 2008) (2008).

32.32.

Lorensen, WE & Cline, HE Cubes de marche: un algorithme de construction de surfaces 3D haute résolution. *Comput. Graphique*. **21** , 163-169 (1987).

- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

33.33.

Systèmes 3D. spécification d'interface de lithographie (1998).

34.34.

Taubin, G. Une approche de traitement du signal pour une conception de surface équitable. *Proc. ACM SIGGRAPH* **95** , 351–358 (1995).

- [Google Scholar](#)

35.35.

Cignoni, P. *et al* . Meshlab: un outil de traitement de maillage open source. *Proc. Sixième chapitre italien d'Eurograph Conf.* **6** , 129–136 (2008).

- [Google Scholar](#)

36.36.

Nelson, SO, Bartley, PG & Lawrence, KC Rf et les propriétés diélectriques des micro-ondes des insectes à grains stockés et leurs implications pour le contrôle potentiel des insectes. *Transactions ASAE* **41** , 685–692 (1998).

- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

37.37.

Ondracek, J. & Brunnhofer, V. Propriétés diélectriques des tissus d'insectes. *Gen Physiol Biophys* **3** , 251–257 (1984).

- [CAS](#)
- [PubMed](#)
- [Google Scholar](#)

38.38.

Colpitts, B., Pelletier, Y. & Cogswell, S. Mesures de permittivité complexes du doryphore de la pomme de terre en utilisant des techniques de sonde coaxiale. *J. Microw. Electromagnétique de puissance. Energy* **27** , 175–182 (1992).

- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

39.39.

Hand, JW Modélisation de l'interaction des champs électromagnétiques (10 MHz – 10 GHz)

avec le corps humain: méthodes et applications. *Phys. Médecine Biol.* **53** , R243-286 (2008).

- [LES PUBLICITÉS](#)
- [CAS](#)
- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

40.40.

Massa, R. *et al* . Mesures de permittivité à large bande du palmier (phoenix canariensis) et du rhynchophorus ferrugineus (coleoptera curculionidae) pour la lutte antiparasitaire RF. *J. Microw. Electromagnétique de puissance. Energy* **48** , 158-169 (2014).

- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

41.41.

Smith, DB *et al* . Exploration de cerveaux d'insectes miniatures à l'aide de techniques de balayage micro-CT *Nat. Sci. Rapports* **6** , 21768 (2016).

- [LES PUBLICITÉS](#)
- [CAS](#)
- [Google Scholar](#)

42.42.

Huang, Z., Chen, L. & Wang, S. Simulation informatique du chauffage sélectif par radiofréquence d'insectes dans le soja. *Int. J. Transfert de masse de chaleur.* **90** , 406–417 (2015).

- [CAS](#)
- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

43.43.

Osborne, NS, Stimson, HF & Ginnings, DC Mesures de la capacité thermique et de la chaleur de vaporisation de l'eau dans la plage de 0 à 100 degrés C. *J. Res. Natl. Normes du Bureau* **23** , 197-260 (1939).

- [CAS](#)
- [Article](#)
- [Google Scholar](#)

44.44.

Panagopoulos, DJ, Johansson, O. & Carlo, GL Évaluation du taux d'absorption spécifique en tant que quantité dosimétrique pour les bioeffets des champs électromagnétiques. *Plos One* **8** (2013).

[Télécharger les références](#)

Remerciements

Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention Marie Skłodowska-Curie n ° 665501 avec la Fondation pour la recherche Flandre (FWO). AT est membre FWO [PEGASUS] 2 Marie Skłodowska-Curie. L'Eva Crane Trust (numéro d'organisation caritative incorporée: 1175343) a financé en partie la collecte de données sur les insectes, qui a été utilisée pour cette étude par MKG

Informations sur l'auteur

Affiliations

- Département des technologies de l'information, Université de Gand - imec, Gand, B-9052, Belgique*
 - Arno Thielens
 - , Luc Martens
 - & Wout Joseph
- Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California Berkeley, Berkeley Wireless Research Center, Berkeley, CA, 94704, États-Unis*
 - Arno Thielens
- Department of Science and Technology, Faculty of Health and Science, University of Suffolk, Ipswich, IP30AQ, Royaume-Uni*
 - Duncan Bell
- Newbourne Solutions Ltd, Newbourne, Woodbridge, IP12 4NR, Royaume-Uni*
 - David B. Mortimore
- Université Charles Sturt, Imagerie médicale, SDHS, Faculté des sciences, Wagga Wagga, NSW 2678, Australie*
 - Mark K. Greco

Contributions

AT a effectué les simulations numériques, analysé les résultats et rédigé le manuscrit, MKG, DB et DBM ont effectué l'imagerie et le post-traitement de l'imagerie. WJ et LM ont contribué à l'analyse de la méthodologie et des résultats. Tous les auteurs ont examiné le manuscrit et fourni des contributions aux différentes sections.

auteur correspondant

Correspondance avec [Arno Thielens](#) .

Déclarations éthiques

Intérêts concurrents

Les auteurs ne déclarent aucun intérêt concurrent.

Information supplémentaire

Note de l'éditeur: Springer Nature reste neutre en ce qui concerne les réclamations juridictionnelles dans les cartes publiées et les affiliations institutionnelles.

Droits et autorisations

Libre accès Cet article est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License, qui permet l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction dans n'importe quel support ou format, tant que vous accordez le crédit approprié aux auteurs originaux et à la source, fournir un lien vers la licence Creative Commons et indiquer si des modifications ont été apportées. Les images ou tout autre matériel tiers dans cet article sont inclus dans la licence Creative Commons de l'article, sauf indication contraire dans une ligne de crédit pour le matériel. Si le matériel n'est pas inclus dans la licence Creative Commons de l'article et que votre utilisation prévue n'est pas autorisée par la réglementation ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir la permission directement du détenteur des droits d'auteur. Pour afficher une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> .

<https://www.nature.com/articles/s41598-018-22271-3>

CLIQUEZ DROIT SUR LA PAGE ET CLIC TRADUIRE EN FRANCAIS

Thielens, A., Bell, D., Mortimore, DB *et al.* Exposition des insectes aux champs électromagnétiques radiofréquences de 2 à 120 GHz. *Sci Rep* **8**, 3924 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22271-3>

Pour ouvrir les liens internet OU LES PHOTOS ET GRAPHIQUES :
Cliquez sur contrôle en même temps que sur la figure
ou sur :

Image en taille réelle