

Résumé et évaluation des études sélectionnées

De début mai à mi-juillet 2024, 85 nouvelles publications ont été identifiées, dont cinq ont fait l'objet de discussions approfondies au sein du groupe BERENIS. Quatre d'entre elles ont été retenues comme particulièrement pertinentes au regard des critères de sélection. Elles sont résumées et évaluées ci-après.

1) Conséquences sur l'environnement

Stress oxydatif chez les abeilles mellifères (Apis mellifera L.) après une exposition de longue durée à un champ électromagnétique de haute fréquence (CEM-HF) de 900 MHz (Vilić et al. 2024)

L'étude de terrain réalisée visait à analyser l'influence d'un CEM-HF (900 MHz) sur le stress oxydatif chez les abeilles mellifères, à trois stades de développement (larve, nymphe, abeille adulte). Les groupes ont été constitués par randomisation. Le champ électrique était de 0,03, de 0,07 et de 1 V/m, en fonction de la distance par rapport à la station de base/l'antenne. L'intensité moyenne du CEM a été mesurée. La durée d'exposition était de deux semaines, de cinq mois et d'une année. Les échantillons ont été prélevés en avril et en septembre, et les variations saisonnières ont été prises en compte. Des marqueurs de l'équilibre oxydatif ont été relevés dans l'intestin des abeilles adultes ainsi que dans les larves et les nymphes. Ces marqueurs sont des enzymes (glutathion-S-transférase, catalase et superoxyde dismutase) qui font barrage au stress oxydatif ainsi que des indicateurs de peroxydation lipidique, qui témoignent d'un stress oxydatif persistant.

Les résultats montrent que les CEM-HF de 900 MHz déclenchent un stress oxydatif à certains stades de développement des abeilles mellifères, l'activité des enzymes mesurées dépendant du stade de développement, du CEM et de la durée d'exposition. Souvent, la larve était la plus impactée. Cependant, il n'existe pas de relation cohérente entre l'intensité du CEM et l'effet mesuré. L'ensemble des observations significatives sur le plan statistique ont été faites soit au stade larvaire, soit chez les abeilles adultes, à la fréquence la plus haute.

L'étude a été menée dans des conditions environnementales réelles, de sorte qu'on peut supposer une incidence directe. Toutefois, aucun effet direct sur la santé des abeilles n'a été étudié et seuls des marqueurs moléculaires ont été mesurés, ce qui n'a pas permis d'obtenir des résultats clairs. Cette étude de terrain fournit des premières indications qui devraient faire l'objet d'une étude plus approfondie.

2) Études animales et études cellulaires expérimentales

Influence d'une exposition à une technologie de téléphonie mobile de 4^e génération (signal LTE) de 1,7 GHz sur des cultures de cellules (Goh et al. 2024)

Cette étude se fonde sur les observations du même groupe de recherche (Choi *et al.* 2020 ; voir [Newsletter BERENIS n° 24](#)), selon lesquelles l'exposition de différentes lignées cellulaires humaines à un signal LTE entraîne une réduction de la croissance des cultures cellulaires. Dans cette nouvelle étude, les auteurs ont amélioré le système d'exposition au signal LTE de 1,7 GHz, notamment en couplant les mesures permanentes de la température à un système de refroidissement actif. Ils ont d'abord comparé les effets d'une exposition de 24 heures (valeurs TAS de 0,4 et 4 W/kg) dans le système original et révisé sur la croissance de différentes cultures cellulaires (adipocytes primaires et

cellules cancéreuses humaines). Les cultures cellulaires dans le système d'exposition mieux contrôlé n'ont pas été impactées dans leur croissance, alors que dans les cultures du système original, des réactions ont été observées en fonction du dosage. Par ailleurs, les expositions à température contrôlée pendant 72 heures (à des valeurs TAS de 0,4, 1, 4 et 8 W/kg) n'ont pas eu d'effet sur ces lignées cellulaires ni sur d'autres, pas même lors de l'analyse d'autres paramètres de la vitalité cellulaire (apoptose, cycle cellulaire, dommages à l'ADN et activation des cascades biochimiques). Une expérimentation finale avec et sans contrôle actif de la température a montré que les modifications de la prolifération cellulaire résultaient principalement de l'augmentation de la température due à l'exposition aux CEM-HF.

Les études de Goh *et al.* (2024) n'ont montré aucune influence sur la croissance et la vitalité des cellules cultivées suite à une exposition à un CEM-HF de 1,7 GHz, modulé par un signal LTE, jusqu'à des valeurs TAS de 8 W/kg. Cette étude est remarquable dans la mesure où ce groupe de recherche fait preuve d'une grande autocritique et attribue ses propres résultats antérieurs à un contrôle insuffisant de la température. Cette façon de faire témoigne d'une bonne approche scientifique visant à éliminer rigoureusement les éventuels effets secondaires de l'exposition, ce qui est un facteur important, notamment dans le domaine des CEM-HF, pour distinguer les effets non thermiques des effets thermiques.

3) Études épidémiologiques

Études transversales concernant l'influence des CEM sur les paramètres cytogénétiques dans le sang humain (Nguyen et al. 2024 et Gulati et al. 2024)

Deux études aux concepts similaires ont examiné l'influence du rayonnement non ionisant (RNI) sur l'état génétique/cytogénétique des cellules sanguines de participants volontaires. Les paramètres cytogénétiques ont ensuite été mis en corrélation avec les données d'exposition collectées, contrôlés quant aux facteurs de confusion et comparés aux données de sujets classés comme faiblement ou plus fortement exposés. Vu l'approche choisie, il s'agit donc d'études épidémiologiques transversales qui testent les points communs d'une sous-population sélectionnée, dans ce cas catégorisée selon des critères d'exposition. Toutefois, leur pertinence pour ce qui est de la preuve de causalité est limitée. Ces études ont porté principalement sur l'exposition, dans le cadre professionnel, des employés du secteur électrique à un champ magnétique de basse fréquence (CM-BF) de 50 Hz (Nguyen *et al.* 2024) et sur l'exposition aux CEM-HF de personnes résidant à proximité d'infrastructures de téléphonie mobile (Gulati *et al.* 2024). Elles ont utilisé les critères d'évaluation biologiques que sont la fragmentation de l'ADN du noyau cellulaire au moyen (test des comètes) et la formation de micronoyaux (fragments d'ADN formés lors de la division cellulaire en dehors du noyau cellulaire). L'étude de Gulati *et al.* (2024) a également mesuré les modifications cytogénétiques des chromosomes, les cassures double-brin ainsi que les marqueurs du stress oxydatif et de la préleucémie, dont les analyses ont été effectuées dans des conditions en aveugle. Les deux études présentent des processus analytiques bien réalisés et documentés. La différence dans l'expression des données (test des comètes, test du micronoyau) pourrait être due à des nuances méthodologiques.

Pour les études de ce type, les points suivants sont d'une importance décisive en ce qui concerne la pertinence statistique : 1) la taille de l'échantillon, 2) l'estimation de l'exposition, et 3) l'évaluation et l'inclusion de facteurs de confusion possible. Les deux études ont porté sur un groupe de volontaires relativement restreint. L'étude de Nguyen *et al.* (2024) a réuni 79 employés de gestionnaires de réseaux à haute tension belges, qui exerçaient soit un travail de bureau, soit un travail de technicien sur le terrain. Ils ont été répartis en trois groupes selon qu'ils étaient faiblement (n=29), moyennement (n=37) ou fortement exposés (n=13). Le nombre de personnes les plus exposées était similaire à celui

de l'étude de Gulati *et al.* (2024), qui rassemblait deux groupes de 12 participants (n=24), recrutés en fonction de la distance de leur lieu de résidence (dans deux zones d'habitation en Allemagne) par rapport à des antennes de téléphonie mobile (de 75 à 160 m ou de 490 à 1020 m). Dans l'étude de Nguyen *et al.* (2024), l'exposition aux CM-BF de 50 Hz a été estimée au moyen d'appareils de mesure portables sur une période de trois jours. Cette méthode ne permet toutefois pas d'évaluer précisément l'exposition personnelle sur le long terme. S'agissant de la répartition des groupes, les données de mesure pendant le temps de travail ont été agrégées, et les participants qui présentaient une exposition supérieure à la moyenne en dehors de leur activité ont été exclus (n=9). Seule l'exposition aux fréquences entre 40 et 800 Hz a été relevée et évaluée. *A contrario*, l'étude de Gulati *et al.* (2024) a considéré non seulement les signaux GSM et LTE, mais aussi les signaux WLAN et DECT ainsi que les CM-BF de 16,7 et 50 Hz. Toutefois, la stratégie de mesure est documentée de manière plutôt lacunaire, surtout pour les CEM-HF. Des informations supplémentaires peuvent néanmoins être obtenues auprès de l'adjudicateur du projet¹. Les mesures ont été effectuées pendant cinq à sept jours dans la chambre des participants, puis les données de 22 à 6 h ont été prises en compte dans l'analyse. Par conséquent, cette approche ne tient pas compte de l'exposition en dehors de la période de sommeil, par exemple lors de l'utilisation ou à proximité d'appareils ou d'installations émettant des CEM pendant le travail, les loisirs ou les déplacements. Or, cette exposition pourrait être importante, car typiquement plus grande, et peut remettre en question la répartition des groupes. De plus, la grande distribution des intensités d'exposition montre qu'il n'est pas pertinent de répartir les participants en fonction de la distance de leur logement par rapport à l'antenne concernée. Les deux études ont considéré le genre, le tabagisme, la consommation d'alcool et les interventions médicales (par ex. radiographie, scanner) comme des facteurs de confusion potentiels. L'étude de Nguyen *et al.* (2024) a aussi pris en compte l'âge et le moment des mesures. Les facteurs de confusion ont cependant été traités différemment dans les deux études. Alors que l'étude de Nguyen *et al.* (2024) les a intégrés dans le modèle statistique pour son analyse principale, comme c'est habituellement le cas lors d'études transversales, l'étude Gulati *et al.* (2024) y a renoncé. Or cette approche n'aurait pas été pertinente du point de vue statistique, car la taille de l'échantillon ne permet pas une assez grande puissance du test statistique pour plus de deux facteurs de confusion. Elle a justifié cette façon de procéder en expliquant que les groupes faiblement et fortement exposés étaient suffisamment comparables, ce qui peut difficilement être défini avec 12 participants par groupe, et que seules quelques interactions, généralement non significatives, ont été observées avec des facteurs de confusion. Les analyses de l'étude Nguyen *et al.* (2024), qui portent sur un échantillon plus grand, montrent qu'il s'agit là d'une source possible d'erreurs d'appréciation. Des interactions notables avec l'âge et le tabagisme antérieur ont été rapportées dans le cadre du test des comètes et de celui du micronoyau, tandis que l'exposition professionnelle aux CM-BF de 50 Hz n'a pas montré d'influence significative. En revanche, l'étude Gulati *et al.* (2024) a passé en revue de nombreuses combinaisons de 16 mesures d'exposition et de 15 critères de santé. Ce test multiple, combiné à la petite taille de l'échantillon, est souvent problématique, car on trouve presque toujours des résultats significatifs par hasard. L'étude montre une corrélation notable entre les paramètres de l'exposition au GSM/LTE en ce qui concerne les chromosomes modifiés, mais aussi un effet protecteur sur un marqueur du stress oxydatif (TBARS), ce qui n'est toutefois pas abordé dans l'analyse. La majorité des critères cytogénétiques analysés tendent dans les deux sens, mais ne sont pas significatifs.

Les deux études transversales concernant l'influence du RNI sur les paramètres cytogénétiques sanguins aboutissent à des conclusions différentes. Leur pertinence est toutefois limitée. L'étude Nguyen *et al.* (2024) n'a trouvé aucun indice de changement dû à l'exposition, dans le cadre professionnel, à des CM-BF de 50 Hz. Avec ce type d'étude, la présence au moins de gros effets aurait

¹ https://kompetenzinitiative.com/wp-content/uploads/2024/07/ATHEM_3_Schlussbericht-240710.pdf

pu être mise en exergue. Dans l'étude de Gulati *et al.* (2024), il existe de nombreuses incertitudes quant à une éventuelle découverte aléatoire, en raison notamment de l'échantillon relativement petit et sélectif (voir à ce sujet une autre évaluation indépendante²). Il serait ici important d'élargir les groupes faiblement et fortement exposés et d'affiner l'estimation de l'exposition. Dans la mesure du possible, il faudrait également inclure plusieurs antennes localisées dans différents environnements afin d'accroître la pertinence statistique et d'intégrer des facteurs de confusion dans le modèle. Ne comparer que deux sites comporte le risque que d'autres facteurs non identifiés (statut socio-économique, éducation, alimentation, style de vie, autres facteurs environnementaux) jouent un rôle dans l'interaction.

3) Autres publications pour information

Travaux de synthèse commandés par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS)

La plupart des travaux de synthèse systématiques commandés par l'OMS concernant les effets sur la santé de l'exposition aux CEM-HF ont été publiés entre-temps³ (Cordelli *et al.* 2023, Rössli *et al.* 2024, Cordelli *et al.* 2024, Bosch-Capblanch *et al.* 2024, Benke *et al.* 2024, Kenny *et al.* 2024, Johnson *et al.* 2024, Pophof *et al.* 2024, Meyer *et al.* 2024, Karipidis *et al.* 2024). Les protocoles correspondants ont déjà été publiés en 2021 et 2022.

Bibliographie

Goh J, Suh D, Park G, Jeon S, Lee Y, Kim N, Song K. **1.7 GHz long-term evolution radiofrequency electromagnetic field with stable power monitoring and efficient thermal control has no effect on the proliferation of various human cell types.** PLoS One. 2024 May 7;19 (5):e0302936.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302936>

Gulati S, Mosgoeller W, Moldan D, Kosik P, Durdik M, Jakl L, Skovvaga M, Markova E, Kochanova D, Vlasova K, Belyaev I. **Evaluation of oxidative stress and genetic instability among residents near mobile phone base stations in Germany.** Ecotoxicol Environ Saf. 2024 Jul 1;279:116486. Epub 2024 May 30. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116486>

Nguyen H, Vandewalle G, Mertens B, Collard JF, Hinsenkamp M, Verschaeve L, Feipel V, Magne I, Souques M, Beauvois V, Ledent M. **Exposure assessment and cytogenetic biomonitoring study of workers occupationally exposed to extremely low-frequency magnetic fields.** Bioelectromagnetics. 2024 Jun 11. <https://doi.org/10.1002/bem.22506>

Vilić M, Žura Žaja I, Tkalec M, Tucak P, Malarić K, Popara N, Žura N, Pašić S, Gajger IT. **Oxidative Stress Response of Honey Bee Colonies (*Apis mellifera* L.) during Long-Term Exposure at a Frequency of 900 MHz under Field Conditions.** Insects. 2024 May 20;15 (5):372.

<https://doi.org/10.3390/insects15050372>

² BFS Spotlight; <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2024091946461>

³ <https://www.sciencedirect.com/journal/environment-international/special-issue/109J1SL7CXT>

Contact

Stefan Dongus
Secrétariat BERENIS
Institut tropical et de santé publique suisse (Swiss TPH)
Département Épidémiologie et santé publique
Unité Expositions environnementales et santé
Kreuzstrasse 2, 4123 Allschwil
Tél. : +41 61 284 8111
Courriel : stefan.dongus@swisstph.ch

Pour de plus amples informations, veuillez consulter les liens suivants :

[Le groupe consultatif de spécialistes en matière de RNI \(BERENIS\)](#)

[Base de données de toutes les newsletters BERENIS avec fonction de recherche](#)

[Lien vers la liste des abréviations](#)