

Résumé et évaluation des études sélectionnées

De mi-juillet à début novembre 2023, 103 nouvelles publications ont été identifiées, dont huit 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) *Études animales et études cellulaires expérimentales*

Changement du comportement d'apprentissage de rats et de profils de protéines sériques dans des vésicules extracellulaires (exosomes) à la suite d'une exposition simultanée à des micro-ondes à des fréquences de 1,5 GHz et de 4,3 GHz (Wang et al. 2022)

L'étude *in vivo* sur des rats menée par Wang *et al.* (2022) s'est intéressée à l'influence d'une brève exposition à des micro-ondes à des fréquences de 1,5 GHz et de 4,3 GHz (séparément ou simultanément) de type CEM-HF (valeurs SAR de 3,3, 2,5 et 5,8 W/kg durant six minutes) sur le comportement d'apprentissage des individus étudiés ainsi que sur la quantité de vésicules extracellulaires (exosomes) dans le sérum et les protéines sériques. Un des apports majeurs de cet article est sa comparaison expérimentale quantitative des protéines cellulaires (profilage protéomique) présentes dans les exosomes, réalisée sans hypothèse de départ. Par ailleurs, l'étude a analysé des aspects fonctionnels du comportement d'apprentissage et de la mémoire, l'activité électrique dans l'hippocampe et également, par microscopie électronique, des changements de cette structure céphalique. Les résultats montrent que le comportement d'apprentissage et la performance de la mémoire étaient diminués (de l'ordre de 10 % à 30 %) chez les sujets exposés à des CEM-HF, en particulier en cas d'exposition simultanée à des micro-ondes de 1,5 GHz et de 4,3 GHz. De plus, l'exposition a endommagé l'ultrastructure de l'hippocampe et modifié l'activité électrique (EEG). L'exposition simultanée aux deux fréquences susmentionnées a entraîné des perturbations plus importantes. Les analyses de protéine ont identifié des protéines (VAMP8, Syn7 et VMAT) qui pourraient être liées aux perturbations de la perception dues à l'exposition aux micro-ondes. Ces protéines sont impliquées notamment dans le transport des protéines, dans la régulation de la localisation des protéines dans la membrane plasmique, dans la régulation de l'endocytose et dans l'élimination de l'alpha-synucléine, une protéine dont la production augmente dans le cerveau des individus atteints de la maladie d'Alzheimer. Des analyses de microscopie électronique indiquent une perturbation de la libération des vésicules au niveau de la synapse et ainsi une modification de la transmission du signal.

La vaste étude de Wang *et al.* (2022) comprend des données fonctionnelles, morphologiques et mécaniques qui montrent des changements dans le comportement d'apprentissage en lien avec une modification de l'activité synaptique et des changements morphologiques de l'hippocampe. La perturbation observée de l'apprentissage et de la mémoire pourrait donc s'expliquer par une perturbation de l'activité synaptique par certaines protéines après une brève exposition à des CEM-HF.

Champs électromagnétiques à haute fréquence 5G modulée et activité neuronale (Canovi et al. 2023)

S'appuyant sur une approche expérimentale novatrice, Canovi *et al.* (2023) analysent l'influence des CEM-HF d'une fréquence de 3,5 GHz (onde porteuse et modulation 5G avec duplexage par répartition en fréquence, FDD) sur les activités neuronales. Sur le plan méthodologique, le groupe de recherche a

cultivé des neurones de cortex de rats sur des matrices multi-électrodes (MEA), celles-ci formant un réseau neuronal. Cette méthode permet de mesurer dans le temps l'activité électrophysiologique spontanée de cellules isolées ainsi que les transmissions coordonnées de signaux. Dans le cadre de la présente étude, le groupe de recherche a comparé des indicateurs (des paramètres) des activités neuronales pour différents intervalles de temps de 15 minutes avant, pendant et après l'exposition. Aux alentours des valeurs limites (1 et 3 W/kg SAR), il n'a observé aucune modification significative des activités neuronales durant l'exposition à la fréquence porteuse de 3,5 GHz et au signal 5G modulé. Cependant, par comparaison avec une exposition simulée, il a identifié, en particulier pour le signal 5G, une tendance à l'augmentation des activités (fréquence des signaux électriques orientés et spontanés) après l'exposition. Dans les expériences utilisant une exposition à haute dose (28 W/kg SAR), le groupe de recherche a observé une diminution temporaire significative de l'activité du réseau neuronal. On mentionnera ici que l'intensité des effets était dans ce cas semblable pour les différents types de signaux (signal 5G modulé ou un CEM-HF à 3,5 GHz ou à 1,8 GHz). Étant donné que, pour cette dose d'exposition, la température du milieu de culture avait augmenté d'environ 1 °C, ces résultats ont été comparés avec un réchauffement similaire sans CEM-HF. Dans ce dernier cas également, le groupe de recherche a constaté une diminution des activités neuronales durant la phase d'augmentation de la température, mais il mentionne que cet effet est moins prononcé que pour une exposition à un CEM-HF, et que les observations réalisées ne peuvent donc pas être entièrement expliquées par la température.

Dans ce contexte, il demeure peu clair si une divergence dans la dynamique de l'augmentation de la température ou du gradient de température due au type d'apport thermique pourrait jouer un rôle. L'étude de Canovi *et al.* (2023) a employé un modèle moderne pour analyser l'influence sur les activités neuronales des CEM-HF à 3,5 GHz, une fréquence qui n'a pas encore très souvent été utilisée. Elle rapporte des effets sur des activités neuronales uniquement lorsque l'exposition est accompagnée d'une augmentation de la température. Par ailleurs, il faut tenir compte du fait que ce travail, contrairement aux méthodes courantes, ne compare pas les effets sur des cultures cellulaires soumises à une exposition de contrôle simulée avec ceux sur des cultures cellulaires exposées à un CEM-HF, mais confronte les changements relatifs dans le temps. Le choix de cette approche pourrait être conditionné par la variation vraisemblablement très marquée des activités des réseaux de neurones établis. Il conviendra donc de confirmer à l'avenir ces observations par d'autres études indépendantes, en tenant compte des facteurs d'incertitude mentionnés.

2) Études épidémiologiques

Utilisation de téléphones portables et qualité du sperme chez les recrues suisses (Rahban et al. 2023)

Cette étude transversale portant sur 2886 recrues de l'armée suisse âgées de 18 à 22 ans a analysé les liens entre l'utilisation auto-rapportée de téléphones portables et la qualité du sperme. L'étude a analysé comme paramètres du sperme le volume, la concentration, le nombre total, la mobilité et la morphologie des spermatozoïdes. Parmi les 20 associations avec les différentes catégories d'exposition auto-rapportée analysées, trois se sont révélées significatives. Chez les hommes ayant annoncé avoir utilisé leur téléphone portable plus de 20 fois par jour, le groupe de recherche a observé un nombre total plus faible de spermatozoïdes que chez les hommes disant avoir utilisé leur téléphone portable uniquement une à cinq fois par jour. Il a trouvé un pourcentage significativement plus élevé de spermatozoïdes de morphologie normale chez les hommes qui indiquaient utiliser leur téléphone dix à vingt fois ou plus de vingt fois par jour. Parmi les cinq groupes de fréquence auto-rapportée analysés, deux effets négatifs étaient significatifs : la concentration de spermatozoïdes d'une part et leur nombre total d'autre part. Le groupe de recherche n'a identifié aucun lien entre la position du

téléphone chez les sujets étudiés lorsque celui-ci n'est pas utilisé (p. ex. dans la poche d'un pantalon ou d'une veste, ou dans un sac) et la qualité du sperme.

Parmi les points forts de cette étude, on citera notamment l'analyse rigoureuse de la qualité des spermatozoïdes et le nombre relativement élevé de participants, l'échantillon étant représentatif de 97 % de la jeune population masculine de Suisse. Par ailleurs, la méthodologie de l'étude est bien meilleure que dans nombre d'études antérieures sur la qualité du sperme. En effet, beaucoup d'études ont jusqu'ici recruté des participants dans des centres de fertilité. Les sujets étudiés étaient donc moins représentatifs de la population générale et la méthodologie avait pour effet que les participants indiquaient une exposition plus élevée lorsqu'ils croyaient que cette exposition pourrait avoir un lien avec leur fertilité. Un autre point fort de cette étude réside dans le fait que l'estimation de l'exposition avait lieu avant que les participants connaissent les résultats de leur analyse de sperme. L'étude était de type transversal et ne permet pas de déduire des liens de causalité. Bien que certains résultats soient compatibles avec des découvertes fortuites (p. ex., trois des vingt relations étudiées étaient significatives, et des effets aussi bien indésirables que protecteurs ont été observés), les auteurs mettent en avant dans leurs conclusions des relations négatives significatives, voire suggèrent parfois des relations causales. L'estimation de l'exposition se fondait sur des indications autoreportées des participants concernant leur utilisation des téléphones portables. Cependant, on ne sait pas dans quelle mesure la fréquence d'utilisation d'un téléphone portable est liée à la dose de CEM-HF effective. En théorie, le fait d'utiliser fréquemment son téléphone portable pourrait être une sorte d'intermédiaire pour un autre facteur sans aucun lien avec le CEM-HF et non analysé, un facteur qui serait plutôt lié à la qualité des spermatozoïdes. La définition de l'exposition fondée sur une fréquence autoreportée d'utilisation quotidienne du téléphone portable sur une échelle prédéfinie est vague. Comme le font remarquer les auteurs, la compréhension qu'ont les participants de cette notion de fréquence d'utilisation du téléphone pourrait avoir évolué durant l'étude. En effet, tandis que, les premières années (de 2005 à 2007), on utilisait un téléphone portable plutôt rarement et avant tout pour passer des appels, durant la période plus récente (de 2012 à 2018), il était plus courant d'utiliser l'écran de l'appareil. C'est pourquoi une étude complémentaire améliorant l'estimation de l'exposition a démarré fin 2022. De plus amples informations concernant cette étude complémentaire sont disponibles sur le site Internet de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)¹. Les auteurs de l'étude interprètent la baisse tendancielle du lien entre le CEM-HF et la qualité du sperme au fil du temps comme une tendance causale, en mentionnant que cette évolution correspond à la transition de la technologie 2G à la 3G, puis à la 4G. Ils ne fournissent cependant aucune justification pour cette interprétation. Les participants appartenant à la catégorie des utilisateurs fréquents ont plus souvent indiqué un style de vie moins sain (p. ex. tabagisme, consommation d'alcool ou de médicaments, IMC plus élevé, niveau de formation moindre) que ceux utilisant leur téléphone moins fréquemment. Cela laisse à penser que le style de vie joue un rôle important et, bien que ce point ait été pris en compte de différentes manières dans l'analyse, il est possible que l'absence de prise en compte de certains facteurs ait pu engendrer une distorsion (biais) ici.

¹ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/electrosmog/info-specialistes/recherche-rni.html#346638777>

3) Études expérimentales sur l'être humain

Influence du rayonnement 5G (3,5 GHz) sur l'activité cérébrale de volontaires en bonne santé (Jamal et al. 2023)

Pour cette étude, 34 volontaires en bonne santé (17 hommes et 17 femmes) ont été exposés à un signal 5G (antenne cornet, 3,5 GHz, par impulsions [577 μ s/4,6 ms] ; force du champ au niveau de la tête de 2 V/m rms) d'une part et à une exposition fictive (aucun champ) d'autre part. Le groupe de recherche a mesuré les flux cérébraux (EEG, 64 canaux) en état d'éveil (yeux ouverts et yeux fermés), l'activité cardiaque et la température. Il a également prélevé des échantillons de salive. Le protocole expérimental comprenait une phase de pré-exposition (baseline), une phase d'exposition et une phase de post-exposition. Seuls les flux cérébraux ont été analysés. L'activité cérébrale n'était influencée par le rayonnement 5G d'une force de champ de 2 V/m ni pendant l'exposition ni après celle-ci.

Il se pourrait que les 64 électrodes aient formé un écran protecteur limitant l'exposition. Cela étant, l'intensité du champ était faible (SAR 0,037 mW/kg ; station de base) et peu d'effets sont susceptibles de se produire pour de telles intensités. Jusqu'à présent, on a pu observer des modifications d'EEG pour des intensités considérablement plus élevées correspondant à celles des téléphones portables, avec une valeur SAR d'environ 1 W/kg.

4) Autres publications pour information

Monitoring RNI en Suisse

Le consortium de projet SwissNIS a publié son deuxième rapport annuel. Ce rapport décrit les mesures effectuées en 2022 dans le cadre du monitoring de l'exposition au RNI en Suisse².

Revues de l'OMS

Sur mandat de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), une série de revues systématiques de la littérature sont en cours de réalisation au sujet des effets sur la santé de l'exposition aux CEM-HF. À la suite à la parution des protocoles correspondant en 2021 et 2022, les résultats des premières revues viennent d'être publiés (Cordelli et al. 2023, Rösli et al. 2024, Cordelli et al. 2024).³

Bibliographie

Canovi A, Orlacchio R, Poullietier de Gannes F, Lévêque P, Arnaud-Cormos D, Lagroye I, Garenne A, Percherancier Y, Lewis N (2023) : **In vitro exposure of neuronal networks to the 5G-3.5 GHz signal**. Frontiers in Public Health. 2023 Aug 7;11:1231360. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1231360>

Jamal L, Yahia-Cherif L, Hugueville L, Mazet P, Lévêque P, Selmaoui B (2023) : **Assessment of Electrical Brain Activity of Healthy Volunteers Exposed to 3.5 GHz of 5G Signals within**

² SwissNIS (2023). Mesures d'exposition au rayonnement non ionisant : Rapport annuel 2022 - Consortium de projet SwissNIS. 30 août 2023. Office fédéral de l'environnement (OFEV). <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/82514.pdf>

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

Environmental Levels: A Controlled-Randomised Study. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023 Sep 21;20(18):6793. <https://doi.org/10.3390/ijerph20186793>

Rahban R, Senn A, Nef S, Rösli M (2023) : **Association between self-reported mobile phone use and the semen quality of young men.** Fertility and Sterility. 2023 Nov 1:S0015-0282(23)01875-7. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2023.09.009>

Wang H, Liu Y, Sun Y, Zhao L, Dong J, Xu X, Wang H, Zhang J, Yao B, Zhao X, Liu S, Zhang K, Peng R (2022) : **Changes in rat spatial learning and memory as well as serum exosome proteins after simultaneous exposure to 1.5 GHz and 4.3 GHz microwaves.** Ecotoxicology and Environmental Safety. 2022 Sep 15;243:113983. Epub 2022 Aug 17. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113983>

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 81 11
Courriel : stefan.dongus@swisstph.ch

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

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

[Lien vers la liste des abréviations \(PDF\)](#)