

Résumé et évaluation des études sélectionnées

De mi-octobre 2016 à fin janvier 2017, 83 nouvelles publications ont été identifiées et 15 d'entre elles ont été discutées de manière approfondie par le groupe d'experts BERENIS. Parmi ces 15 publications, 6, considérées comme particulièrement significatives, ont été sélectionnées aux fins de l'évaluation ; elles sont résumées ci-après.

1) Études animales et études cellulaires expérimentales

Exposition sur le long terme aux champs électromagnétiques de haute fréquence et effets sur le cerveau des souris (Kim et al. 2017)

Cette étude *in vivo* avait pour objet l'investigation des effets des champs électromagnétiques de haute fréquence (CEM-HF) exercés sur les réactions neuronales du cortex cérébral de la souris. Le cortex cérébral joue un rôle primordial dans les fonctions nerveuses. Cela concerne par exemple l'ouïe, le ressenti, la sensation, le sens de l'orientation et le comportement locomoteur ainsi que des fonctions impliquant la raison ou l'intelligence comme la prise de conscience, la mémoire et l'attention. Des souris mâles de la souche C57BL ont été soumises à exposition durant 12 semaines à raison de 5 heures par jour à une fréquence de 835 MHz (onde sinusoïdale, TAS : 4 W/kg). Les expériences ont été effectuées dans des conditions définies (température, air ambiant, lumière) et en aveugle. Divers comportements ont été examinés ainsi que plusieurs biomarqueurs de l'autophagie¹ et de l'apoptose (mort cellulaire programmée). En outre, le degré de la démyélinisation ou de l'atteinte de la myéline des voies nerveuses comme elle se présente par exemple chez les patients atteints de sclérose en plaques a été analysée elle aussi. La myéline est en effet importante pour le développement et la fonction du système nerveux. Les résultats ont montré une augmentation du taux d'autophagie après exposition aux CEM-HF alors que l'on n'a observé aucune différence chez les marqueurs d'apoptose entre les animaux soumis à exposition et les animaux de contrôle. De plus, les souris ayant subi l'exposition présentaient des atteintes de la myéline et étaient devenues hyperactives. Ces perturbations de comportement d'origine neurologique ont probablement été induites par la démyélinisation des neurones après une exposition de 12 semaines. Les auteurs considèrent que l'autophagie accrue est un mécanisme de protection des corps cellulaires neuronaux du cortex cérébral. Un article de synthèse datant de 2014² décrivait déjà des problèmes de myéline chez les rats après une exposition à de hautes fréquences.

¹ Littéralement, autophagie signifie « se manger soi-même » ; ce processus protège la cellule contre les dysfonctionnements en décomposant dans des organelles cellulaires spécialisées des particules cellulaires défectueuses ou même nuisibles, ou des agents infectieux pour réintégrer les éléments au métabolisme cellulaire. Une autophagie trop souvent sollicitée ou défectueuse peut provoquer des maladies.

² Redmayne M, Johansson O (2014): **Could myelin damage from radiofrequency electromagnetic field exposure help explain the functional impairment electrosensitivity? A review of the evidence.** J Toxicol Environ Health B Crit Rev 2014; 17 (5): 247 – 258. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25205214>

Champs magnétiques statiques et régulation du photorécepteur cryptochrome chez les larves de drosophiles (Giachello et al. 2016)

Le cryptochrome est un récepteur de la lumière bleue. Cette protéine joue un rôle central dans la régulation du rythme circadien. Le cryptochrome joue aussi un rôle dans les fonctions comme le sens magnétique, la modulation de l'excitation neuronale, la phototransduction et la régulation de la plasticité synaptique. Il est notoire que beaucoup d'animaux peuvent percevoir le champ magnétique terrestre et l'utiliser pour l'orientation et la navigation. On pense que l'ordre de grandeur et la direction du champ magnétique terrestre modulent l'activité du cryptochrome en influençant des processus photochimiques transitoires de paires de radicaux dans la protéine. On sait que le rôle du cryptochrome en tant que magnétorécepteur est encore controversé, les preuves expérimentales d'une augmentation de l'activité neuronale induite par une exposition à des champs magnétiques faisant défaut. Dans la présente étude *in vitro/ex vivo* ont donc été examinés les effets dépendant du cryptochrome exercés par les champs magnétiques statiques (100 mT) sur les motoneurons des larves de drosophiles. Au moyen de méthodes électrophysiologiques on a pu montrer dans cette étude que l'action d'un champ magnétique de 100 mT a pour effet d'augmenter fortement l'activité neuronale du cryptochrome activé par la lumière. Une région du cryptochrome (extrémité C-terminale) nécessaire à la potentialisation a pu être identifiée. Ainsi, il a été effectivement prouvé premièrement que l'activité biologique du cryptochrome est influencée par les champs magnétiques et deuxièmement que le champ magnétique externe peut influencer le comportement d'animaux par le biais du cryptochrome. Ces résultats renforcent les preuves selon lesquelles l'activité neuronale du cryptochrome photoactivé, et ainsi le sens de l'orientation des animaux, est modulée par les champs magnétiques.

L'exposition ainsi que la réalisation des expériences sont bien décrites ; cette étude livre ainsi la preuve directe que le cryptochrome agit comme magnétorécepteur chez les drosophiles.

Les champs électromagnétiques de haute fréquence exercent une influence sur la dynamique et l'efficacité de la réparation du génome (Sun et al. 2016)

Dans une étude *in vitro* très innovante, Sun *et al.* (2016) présentent quelques observations remarquables en ce qui concerne l'action des champs électromagnétiques de haute fréquence (CEM-HF) sur le génome et ses mécanismes de contrôle. Les auteurs ont soumis à exposition des cellules du tissu conjonctif de souris (fibroblastes embryonnaires) avec un CEM-HF à modulation GSM (1800 MHz, TAS : 4 W/kg, intervalles de 5/10 min on/off). Au cours de l'évolution temporelle de l'exposition (1, 12, 24, 36 heures), on a analysé les ruptures simple et double brin de la substance héréditaire (ADN) ainsi que les biomarqueurs pour les activités de réparation du génome et de multiplication des cellules, et on a effectué des comparaisons avec des cellules de contrôle cultivées en parallèle. En outre, des analyses identiques ont été effectuées sur des cellules de tissu conjonctif dont la protéine ATM était manquante. Celle-ci joue en effet un rôle essentiel dans la reconnaissance et la réparation de dommages du génome et le déclenchement de cascades de signaux agissant à l'encontre de conséquences fatales comme les mutations cancérogènes. Des mutations dans ce gène sont la cause d'une maladie héréditaire rare chez l'homme connue comme syndrome de Louis-Bar ou ataxie téléangiectasie (*ataxia teleangiectatica*). L'absence de l'importante fonction de contrôle et de régulation apportée par la protéine ATM conduit à l'apparition chez les patients de nombreux symptômes comme la neurodégénérescence, une réduction de la compétence immunitaire et une augmentation du risque de cancer. Les cellules dans lesquelles la protéine ATM est manquante présentent typiquement des valeurs de base plus élevées en ce qui concerne les dommages à l'ADN, des taux de mutations plus élevés et une réponse cellulaire modifiée quant aux influences

génétoxiques. Après une exposition d'une heure, les auteurs ont observé une augmentation temporaire des ruptures simple brin dans les cellules normales ; elle n'était plus observable après 12 et 24 heures et le nombre de ruptures était significativement inférieur après 36 heures alors qu'aucune différence dans les ruptures double brin n'a été décelée. En revanche, après 1 heure, on n'a pas observé de différences dans les cellules contenant de l'ATM mutée, mais une augmentation temporaire des ruptures simple brin (après 12 heures) et double brin (après 12 et 24 heures) alors qu'on observait des indices accrus d'activités réparatrices concomitantes. Cela indique une réponse cellulaire ralentie face au rayonnement, qui a cependant conduit à une réduction des atteintes du génome après 36 heures d'exposition.

Les auteurs supposent que leurs observations indiquent une hormèse, ce qui signifie que l'effet dépend de la dose cumulative de manière non linéaire. Cette forme particulière de la réaction cellulaire d'adaptation à des influences externes a été décrite pour des médicaments, des produits chimiques génotoxiques et un rayonnement radioactif légèrement accru mais, tout au moins en ce qui concerne ce dernier, n'a pas été établie. Une telle réduction des effets cellulaires est généralement expliquée par le fait qu'une faible exposition induit certains mécanismes de compensation – dans ce cas une augmentation des activités de réparation du génome –, ce qui a pour effet que les cellules sont ensuite moins sensibles à des doses élevées ou qu'elles peuvent réagir plus rapidement et mieux à leur action. Ceci conduit à son tour au fait que les effets sont affaiblis ou même surcompensés. Pour confirmer cet effet hormétique dû à des expositions aux CEM-HF, les auteurs ont réalisé les mêmes expériences en utilisant de faibles doses de produits chimiques génotoxiques connus (4-nitroquinoléine 1-oxyde, H₂O₂) dans les deux types de cellules et ont constaté des surcompensations comparables. Sur la base d'une telle expérience *in vitro*, il n'est cependant pas possible de savoir si cela exerce des effets positifs ou négatifs sur la santé à long terme. Par ailleurs, seule une valeur TAS relativement élevée (4 W/kg) a été examinée si bien que la question de savoir si l'hormèse peut également être observée dans des scénarios d'exposition plus pertinents reste ouverte.

2) Études épidémiologiques

Exposition d'adolescents à des champs électromagnétiques de haute fréquence en Suisse (Roser et al. 2017)

Les adolescents utilisent très fréquemment les techniques de communication sans fil, mais on sait finalement peu de choses sur leur exposition aux champs électromagnétiques de haute fréquence (CEM-HF). L'étude de Roser *et al.* (2017) avait pour objectif de déterminer l'exposition aux CEM-HF de 90 adolescents de Suisse centrale, âgés de 13 à 17 ans, ayant participé à l'étude HERMES. À cet effet, des mesures personnelles ont été effectuées de mai 2013 à avril 2014 au moyen d'exposimètres portables (expom-RF). Les participants à l'étude ont porté l'appareil durant 2 à 3 jours sur eux et ont tenu un protocole de leurs activités durant cette période. En outre les coordonnées GPS des lieux de séjour correspondants ont été enregistrées par l'exposimètre. L'exposition moyenne aux CEM-HF était de 0,15 V/m (maximum : 0,51 V/m). La majeure partie de l'exposition mesurée était due aux téléphones portables (67 %, téléphone portable personnel ou un autre) et aux stations de base de la téléphonie mobile (20 %). Le réseau wi-fi contribuait à raison de 3,5 % à l'exposition moyenne. Les expositions les plus élevées ont été constatées dans les voitures (total : 0,56 V/m, dont 0,10 V/m dû aux stations de base de la téléphonie mobile), les autobus (0,50, 0,15 V/m) et les trains (0,45, 0,18 V/m). L'exposition moyenne à domicile était de 0,11 V/m (stations de base de la téléphonie mobile : 0,06 V/m) ; elle était de 0,15 V/m (0,04 V/m) dans les écoles et de 0,24 V/m (0,14 V/m) en

plein air. Pour calculer le rayonnement moyen absorbé, ces résultats de mesure ont été combinés à des données relatives à l'utilisation moyenne des appareils de communication sans fil. Il résulte des calculs de doses que 94 % du rayonnement CEM-HF absorbé par le cerveau et 91 % du rayonnement absorbé par le corps entier provenaient du rayonnement des appareils personnels.

Cette étude montre que la majeure partie de l'exposition aux CEM-HF est le fait d'une « autoproduction », principalement par le biais des téléphones portables. La durée d'utilisation n'est pas le seul facteur important contribuant à la dose cumulative de CEM-HF, la qualité de la liaison intervient elle aussi. En effet, les téléphones portables émettent d'autant moins de rayonnement que la liaison est bonne.

Utilisation des téléphones portables en Angleterre de 1985 à 2014 et apparition de certains types de tumeurs cérébrales (de Vocht 2016)

L'utilisation de téléphones portables et de téléphones sans fil est aujourd'hui très largement répandue. Si le risque de subir de ce fait une tumeur au cerveau était plus élevé, le nombre de cas aurait augmenté durant les dix dernières années. L'objectif de l'étude de de Vocht (2016, plus corrigendum) était de vérifier cette hypothèse. À cet effet, on a évalué l'apparition de certains types de tumeurs du cerveau en Angleterre entre 1985 et 2014 au moyen d'une approche de la statistique bayésienne. Les nombres de cas annuels des types de tumeurs suivants ont été pris en compte : les néoplasmes malins non spécifiques du cerveau, les glioblastomes multiformes ainsi que les néoplasmes malins des lobes temporal et pariétal. Les données de l'Office national de la statistique (Office of National Statistics) ont été utilisées comme source de données. L'effet de l'utilisation de la téléphonie mobile sur les variations du nombre de cas de tumeurs du cerveau a été déduit des différences constatées entre les séries chronologiques de données recensées et celles modélisées. La modélisation du nombre de cas a pris en compte les facteurs suivants : l'apparition de tous les types de cancers, la taille de la population, l'âge moyen (médiane) de celle-ci, le nombre de fumeurs de cigarettes, le taux d'urbanisation et un critère de qualité pour le codage du type de cancer. On n'a pas noté de lien entre l'augmentation du nombre de contrats de téléphonie mobile et les modifications temporelles en ce qui concerne l'apparition de néoplasmes non spécifiques du cerveau et de glioblastomes multiformes. Un lien négatif a été constaté entre les néoplasmes malins du lobe pariétal et l'évolution temporelle du nombre de contrats de téléphonie mobile. Pour les néoplasmes malins du lobe temporal et un temps de latence de 10 ans, les séries chronologiques de données ont indiqué un risque 1,35 fois plus élevé (95 % CI: 1.09-1.59), mais pas pour un temps de latence de 15 ans. Lors de l'utilisation des téléphones portables et des téléphones sans fil, le lobe temporal est le plus fortement exposé. Selon les auteurs, l'augmentation du risque observée annuellement en Angleterre conduirait à 188 cas de cancers supplémentaires chaque année.

Cette étude simple présente quelques points faibles, par exemple le manque de données sur les expositions individuelles et un choix sélectif des taux de maladie. On ignore pourquoi l'accent principal a été mis sur des diagnostics non spécifiques alors que c'est justement ce groupe diagnostique qui est particulièrement concerné par les fortes variations intervenant dans la pratique du diagnostic et du codage. L'introduction de meilleures techniques diagnostiques ces 20 dernières années aurait pu modifier par exemple la manière de coder la localisation dans le cerveau au cours du temps, ce qui aurait exercé une influence sur les évaluations. Il ne semble guère plausible qu'un risque accru ne se limite qu'à un temps de latence de 10 ans. Cela pourrait indiquer un effet de distorsion dû à d'autres tendances à long terme comme l'augmentation de l'espérance de vie de la population. Certes, la répartition des âges a été prise en compte dans la modélisation de la médiane, mais elle n'est pas appropriée pour appréhender l'augmentation de population dans les groupes les plus âgés, qui

présentent le plus grand risque de formation de tumeurs du cerveau. De manière générale, l'étude apporterait davantage d'informations si les résultats étaient présentés pour tous les types de tumeurs du cerveau, car cela permettrait une évaluation systématique des modèles d'évolution dans le temps en ce qui concerne l'exposition de diverses régions du cerveau.

Tests d'exposition personnalisés pour des personnes souffrant d'hypersensibilité électromagnétique (van Moorselaar et al. 2016)

Dans cette étude, van Moorselaar *et al.* (2016) ont testé une nouvelle approche du traitement de l'hypersensibilité électromagnétique (EHS) humaine. Les auteurs ont réalisé des tests de provocation individualisés sur des personnes électrosensibles à leur domicile, ce qui n'était pas le cas dans les études antérieures. 42 personnes (âge moyen : 55 ans) ont participé à l'étude ; elles ont indiqué être en mesure de sentir la présence de rayonnement de haute ou basse fréquence dans un intervalle de quelques minutes. Les participants à l'étude ont été testés dans leur logement au moyen d'un appareil d'exposition mobile. On a tout d'abord déterminé avec eux le type et la durée d'exposition auxquels ils réagissaient. À cet effet, on a indiqué à chaque fois aux participants l'intensité et la fréquence des émissions de l'appareil mobile. Ensuite ont été effectués 10 tests en double aveugle, dont 3 à 7 expositions avec ou sans CEM (15 minutes au maximum par exposition). Ainsi, les participants devaient indiquer si le champ électromagnétique était enclenché ou non. Les résultats ont été fournis aux participants immédiatement après le test. 38 participants ont voulu effectuer le test avec du rayonnement de haute fréquence d'une intensité située entre 0,2 et 6 V/m (médiane : 0,44 V/m). 4 participants ont préféré effectuer le test avec des champs de basse fréquence dans la fourchette de 0,15 à 6,6 μ T. Dans le test en double aveugle, aucun des participants n'a été en mesure de constater s'il était exposé ou non. En moyenne, dans 48 % des cas, l'estimation des participants était correcte. Quatre mois après les tests, les participants ont indiqué que leur degré d'électrosensibilité n'avait pas varié. À ce moment-là, ils étaient cependant moins sûrs de pouvoir déceler une exposition aux CEM dans un intervalle de quelques minutes. Le nombre de symptômes et leur degré de gravité étaient significativement inférieurs à ce qu'ils étaient au début de l'étude. Cela pourrait indiquer que certains participants ont tiré profit de cette méthode individualisée.

Un point fort de cette étude est constitué par le fait qu'un signal de test individuel a été déterminé avec chaque participant grâce à l'appareillage mobile utilisé pouvant émettre des signaux CEM dans une bande de fréquence très large. L'absence d'un groupe de contrôle a pour conséquence qu'il n'est pas possible d'évaluer si la réduction des symptômes constatée en l'espace de quatre mois est due à la participation à l'étude ou non. Il s'agit toutefois d'une approche innovante pouvant aider les personnes électrosensibles réagissant en peu de temps à une exposition CEM selon leurs propres indications. Il pourrait donc être utile de déterminer si de tels tests individualisés sont appropriés à long terme et quels types de personnes concernées pourraient en tirer le plus de profit.

Le groupe BERENIS estime qu'il n'est non seulement important d'étudier les relations de cause à effet mais surtout quelles sont les approches diagnostiques et de traitement pouvant être utiles aux personnes électrosensibles. La souffrance subie par celles-ci est très élevée et un avis médical global serait le bienvenu. En Suisse, on a de l'expérience depuis 2001 avec des diagnostics détaillés des points de vue médical, psychologique et environnemental. Les Médecins en faveur de l'environnement (www.aefu.ch) ont réalisé entre 2008 et 2011 des tests écosanitaires intégrés dans leur pratique quotidienne et offrent depuis lors leurs conseils en matière de médecine environnementale. Du point de vue de BERENIS, il est nécessaire et important de pouvoir soutenir les personnes hypersensibles à l'électromagnétisme avec des concepts thérapeutiques étayés scientifiquement.

Bibliographie

de Vocht F (2016): **Inferring the 1985-2014 impact of mobile phone use on selected brain cancer subtypes using Bayesian structural time series and synthetic controls.** Environ Int. 2016 Dec;97:100-107. Epub 2016 Nov 9. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27835750>

de Vocht F (2017): **Corrigendum to "Inferring the 1985-2014 impact of mobile phone use on selected brain cancer subtypes using Bayesian structural time series and synthetic controls" [Environ. Int. (2016), 97, 100-107].** Environ Int. 2017 Jan 25. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28131518>

Giachello CN, Scrutton NS, Jones AR, Baines RA (2016): **Magnetic Fields Modulate Blue-Light-Dependent Regulation of Neuronal Firing by Cryptochrome.** J Neurosci. 2016 Oct 19;36(42):10742-10749. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27798129>

Kim JH, Yu DH, Huh YH, Lee EH, Kim HG, Kim HR (2017): **Long-term exposure to 835 MHz RF-EMF induces hyperactivity, autophagy and demyelination in the cortical neurons of mice.** Sci Rep. 2017 Jan 20;7:41129. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28106136>

Roser K, Schoeni A, Struchen B, Zahner M, Eeftens M, Fröhlich J, Rösli M (2017): **Personal radiofrequency electromagnetic field exposure measurements in Swiss adolescents.** Environ Int. 2017 Feb;99:303-314. Epub 2016 Dec 27. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28038972>

Sun C, Wei X, Fei Y, Su L, Zhao X, Chen G, Xu Z (2016): **Mobile phone signal exposure triggers a hormesis-like effect in Atm+/+ and Atm-/- mouse embryonic fibroblasts.** Sci Rep. 2016 Nov 18;6:37423. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27857169>

van Moorselaar I, Slottje P, Heller P, van Strien R, Kromhout H, Murbach M, Kuster N, Vermeulen R, Huss A (2016): **Effects of personalised exposure on self-rated electromagnetic hypersensitivity and sensibility - A double-blind randomised controlled trial.** Environ Int. 2016 Dec 9. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27939951>

Personne de contact

Stefan Dongus
Secrétariat BERENIS
Institut tropical et de santé publique suisse (Swiss TPH)
Département Épidémiologie et santé publique
Unité Expositions environnementales et santé
Socinstr. 57, case postale, 4002 Bâle
Tél. : +41 61 284 8111
E-mail : stefan.dongus@unibas.ch

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

[Le groupe consultatif d'experts en matière de RNI \(BERENIS\)](#)

[Lien vers la liste des abréviations](#)