

# Champs électromagnétiques artificiels : quel impact potentiel sur notre santé ? De la présomption d'innocence à l'évidence scientifique.

Revue de la littérature

Version Avril 2020 (Compte-tenu de la nature fortement évolutive du contexte électromagnétique, des mises à jour régulières seront réalisées sur ce document en fonction de l'état de l'art, des publications scientifiques et médicales, et des innovations technologiques.)

## RÉSUMÉ

En ce début d'année 2020, il apparaît que nous ne pouvons plus ignorer la réalité de l'impact sanitaire des champs électromagnétiques artificiels auxquels nous sommes soumis, y compris aux niveaux d'exposition actuels. C'est un sujet controversé car il soulève d'énormes enjeux économiques et sociétaux et car il est complexe à appréhender. Les preuves épidémiologiques en faveur d'un lien de causalité avec certaines pathologies comme les cancers, maladies neurodégénératives, infertilité et troubles neuropsychiques (dépression, insomnie, fatigue...) sont suffisantes pour revoir les normes actuelles d'exposition collective. Ces normes reposent sur des recommandations vieilles de 20 ans et ne tiennent donc pas compte des données scientifiques accumulées depuis. L'hypothèse la plus vraisemblable du mécanisme biologique à l'origine de la nocivité des pollutions électromagnétiques est bien décrite dans la littérature. Ce mécanisme consiste en la perturbation des canaux calciques dépendants du voltage présents dans notre corps, notamment notre cerveau. Cette perturbation pourrait expliquer comment les champs électromagnétiques sont à l'origine d'un stress oxydatif et nitrosatif pouvant induire une génotoxicité, une neurotoxicité, une altération du sperme. La perturbation des canaux calciques dépendants du voltage pourrait aussi interagir avec nos neurotransmetteurs et participer à la genèse de troubles neuropsychiques. Ce document a pour objectif de contribuer à faire évoluer les connaissances des professionnels de santé sur le sujet. Ceci, afin de les sensibiliser à l'intérêt de promouvoir une hygiène électromagnétique auprès de leurs patients. Ce document présente aussi des pistes de réflexion concernant l'hygiène électromagnétique qui pourrait être conseillée. En termes de santé publique, il devient urgent que les normes d'exposition collective soient révisées, comme le demandent plusieurs instances publiques (Anses, Parlement Européen). Dans cette attente, il appartient à chacun de devenir acteur de son environnement électromagnétique et d'agir dans le sens de la prévention individuelle et collective.

# SOMMAIRE

<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>3</b>
<b>I. CONTEXTE ET METHODOLOGIE DE TRAVAIL</b> .....	<b>3</b>
1. QU'EST-CE QU'UN CHAMP ELECTROMAGNETIQUE (CEM) ? .....	4
2. METHODOLOGIE DE TRAVAIL .....	6
<b>II. PRINCIPALES PATHOLOGIES EN LIEN AVEC LES CEM</b> .....	<b>6</b>
1. CANCERS.....	6
a. <i>Leucémies de l'enfant et champs électromagnétiques basses fréquences (CEM BF)</i> .....	6
b. <i>Cancer du sein et champs électromagnétiques basses et hautes fréquences</i> .....	7
c. <i>Tumeurs cérébrales et champs électromagnétiques hautes fréquences (CEM HF)</i> .....	8
2. MALADIES NEURODEGENERATIVES.....	11
a. <i>Maladie d'Alzheimer et CEM BF</i> .....	11
b. <i>Sclérose latérale amyotrophique et CEM BF</i> .....	12
c. <i>Maladies neurodégénératives et CEM HF</i> .....	13
3. INFERTILITE .....	14
a. <i>Etudes montrant un lien entre anomalies du sperme et exposition aux CEM du téléphone portable et du Wifi</i> .....	14
b. <i>Infertilité féminine et CEM BF/HF</i> .....	16
4. SYMPTOMES NEUROPSYCHIQUES ET CEM HF .....	16
a. <i>« Syndrome des micro-ondes » et CEM HF</i> .....	16
b. <i>Céphalées et utilisation du téléphone portable</i> .....	17
c. <i>Troubles de l'attention avec ou sans hyperactivité de l'enfant et exposition au téléphone portable</i> .....	17
d. <i>Activité cérébrale et exposition au téléphone portable</i> .....	19
<b>III. MECANISMES PHYSIOPATHOLOGIQUES DE LA NOCIVITE DES CEM ARTIFICIELS SUR NOS CELLULES</b> .....	<b>19</b>
1. RAPPELS SUR LE STRESS OXYDATIF/NITROSATIF .....	19
a. <i>Qu'est-ce que le stress oxydatif ?</i> .....	19
b. <i>Comment un excès de stress oxydatif participe à la genèse de maladies</i> .....	21
2. ETUDES MONTRANT QUE LES CEM INDUISENT UN STRESS OXYDATIF (NITROSATIF) CELLULAIRE .....	21
3. ORIGINE DU STRESS OXYDATIF INDUIT PAR LES CEM .....	22
a. <i>Dérégulation des canaux calciques dépendants du voltage</i> .....	23
b. <i>Dysfonctionnement mitochondrial</i> .....	25
c. <i>Impact des CEM sur la liaison hydrogène de l'ADN</i> .....	26
4. EFFETS NEUROPSYCHIQUES DE LA DEREGULATION DES VGCC.....	26
5. IMPACT DES CEM SUR LA BARRIERE HEMATO-ENCEPHALIQUE .....	27
<b>IV. DISCUSSION</b> .....	<b>28</b>
1. DE LA NOCIVITE DES CEM, DE L'OBSOLESCENCE DE LA NORME ET DE L'UTILITE D'UNE HYGIENE ELECTROMAGNETIQUE .....	28
a. <i>L'impact des CEM artificiels sur notre santé est réel et sous-estimé</i> .....	28
b. <i>Les normes d'exposition en vigueur sont obsolètes</i> .....	29
c. <i>Les médecins pourraient prendre en compte ces réalités dans leur exercice</i> .....	31
2. COMMENT INTEGRER LA NOCIVITE POTENTIELLE DES CEM DANS NOTRE EXERCICE ? .....	32
a. <i>Quels patients pourraient être ciblés ?</i> .....	32
b. <i>L'hygiène électromagnétique qui pourrait être proposée</i> .....	34
c. <i>Risque de résistance du patient ?</i> .....	35
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>36</b>
<b>ABREVIATIONS</b> .....	<b>36</b>
<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>37</b>

## INTRODUCTION

A l'heure actuelle, une grande majorité de personnes utilisent tous les jours un téléphone portable pour passer des appels ou aller sur internet. Le Wifi permet désormais un accès internet sans fil illimité chez soi et dans de nombreux lieux publics. Les antennes relais se sont multipliées, émettant en 2G puis en 3G, 4G et bientôt en 5G. Nous consomons toujours plus d'électricité pour nos activités courantes et les lignes hautes tensions se multiplient en conséquence.

L'exposition humaine aux champs électromagnétiques (CEM) artificiels générés par les appareils électriques et électroniques a donc augmenté de façon exponentielle au cours des deux dernières décennies. Certains scientifiques tirent la sonnette d'alarme sur les conséquences sanitaires que cela pourrait engendrer et font émerger des controverses au point qu'on ne sait plus quoi penser.

En tant que médecin, cette controverse a suscité mon intérêt et j'ai voulu me faire ma propre opinion sur le sujet, en examinant l'état des connaissances scientifiques disponibles, avec une approche médicale objective. J'en suis venue à la même conclusion que certains scientifiques, à savoir que la nocivité potentielle des CEM artificiels est bien réelle, y compris aux niveaux d'exposition actuelle. Les CEM artificiels sont un facteur de risque potentiel de cancers, maladies neurodégénératives, troubles neuropsychiques (dépression, insomnie, fatigue...) et troubles de la fertilité, le tout, à plus ou moins long terme.

Le contraste entre la somme des connaissances existantes sur le sujet et notre ignorance est déconcertant.

L'objectif de ce document est donc de contribuer à faire évoluer les connaissances des professionnels de santé sur le sujet.

Il comporte trois parties :

- Une revue de la littérature sur les études épidémiologiques analysant le lien statistique entre l'exposition aux CEM artificiels et certaines pathologies

- Une revue de la littérature sur les mécanismes physiopathologiques pouvant expliquer la nocivité des CEM sur nos cellules,
- Une discussion sur les enjeux de ces réalités scientifiques, les résistances qu'elles suscitent et la manière d'intégrer ces données à notre exercice de médecin via la promotion d'une « hygiène électromagnétique ».

Selon Hannah Arendt, « Le progrès et la catastrophe sont l'avant et le revers d'une même médaille ». Ce travail ne remet pas en question le progrès indéniable représenté par l'électricité et les nouvelles technologies de communication. Il en présente juste les limites et les dangers potentiels.

Ma revue de la littérature se veut être dans le même état d'esprit que celle de Pritchard et al. publiée en 2019 et qui fait un lien entre l'augmentation des décès par maladies neurologiques au cours des 25 dernières années et l'augmentation des sources de pollution électromagnétique en interaction avec d'autres polluants environnementaux (1). Les auteurs insistent à plusieurs reprises sur le fait qu'ils ne veulent pas stopper le monde moderne mais le rendre plus sûr.

## I. CONTEXTE ET METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Nous savons que le corps humain a une dimension bioélectrique.

Nos neurones communiquent entre eux via des neurotransmetteurs synaptiques dont le relargage est dépendant d'une dépolarisation de la membrane du neurone, elle-même dépendante du fonctionnement des canaux ioniques membranaires. Nos cellules cardiaques se contractent à la suite d'une dépolarisation membranaire coordonnée. Nos mitochondries produisent de l'ATP (adénosine triphosphate, monnaie d'échange énergétique cellulaire) via une cascade de réactions moléculaires utilisant des électrons et dont l'oxygène (O<sub>2</sub>) est l'accepteur final.

Ainsi, notre constitution nous prédisposerait à être impactés par les champs électromagnétiques artificiels auxquels nous sommes soumis de façon chronique.

## 1. Qu'est-ce qu'un champ électromagnétique (CEM) ?

Les champs électromagnétiques résultent de la combinaison des champs électriques et magnétiques. Tous les appareils électriques qui nous entourent diffusent quotidiennement des champs électromagnétiques artificiels. On les caractérise par leur fréquence en hertz (Hz).

Ces CEM artificiels sont composés d'ondes électromagnétiques de « basse énergie » et sont dits « non ionisants » c'est-à-dire dont l'énergie n'est pas suffisante pour expulser un électron de son orbite péri-atomique. A contrario, les rayons X utilisés pour le radio-diagnostic font partie des rayonnements électromagnétiques ionisants, de fréquence supérieure à 1 Peta Hz soit  $10^{15}$  Hz.

Jusqu'à l'avènement de l'électricité, le corps humain était principalement exposé au champ magnétique de la terre, champ continu dont l'intensité est d'environ  $50 \mu\text{T}$  en France.

Dans le monde actuel, chaque être humain est exposé à toute une gamme de champs électromagnétiques artificiels

variables répartis selon la fréquence du rayonnement utilisé (Figure 1).

Dans les études, ils sont schématiquement classés en basses et hautes fréquences (2) :

- **Basses fréquences** (CEM BF) de 0 à 10 kHz provenant essentiellement des lignes électriques et appareils électriques branchés sur le courant alternatif à la fréquence de 50 Hz en Europe. La littérature anglaise utilise l'abréviation ELF EMF.
- **Hautes fréquences** (CEM HF) de 10 kHz à 3 THz, comprenant les radiofréquences et les micro-ondes et provenant principalement de nos réseaux de télécommunications sans fil. La littérature anglaise utilise l'abréviation RF EMF : antennes de radios (87,5 à 108 MHz pour la FM), télévision numérique terrestre (470 à 694 MHz), téléphone DECT (1885 à 1890 MHz), four micro-onde (2,4-2,5 GHz), Wifi (2,4 GHz + 5 GHz en cours d'extension), WiMax (3,4 à 3,6 GHz), téléphones portables/smartphones/antennes relais (800, 900, 1800, 2100 et 2600 MHz pour les 2, 3 et 4 G actuelles, extension à 3,5 puis 26 GHz pour la 5G). (3,4)

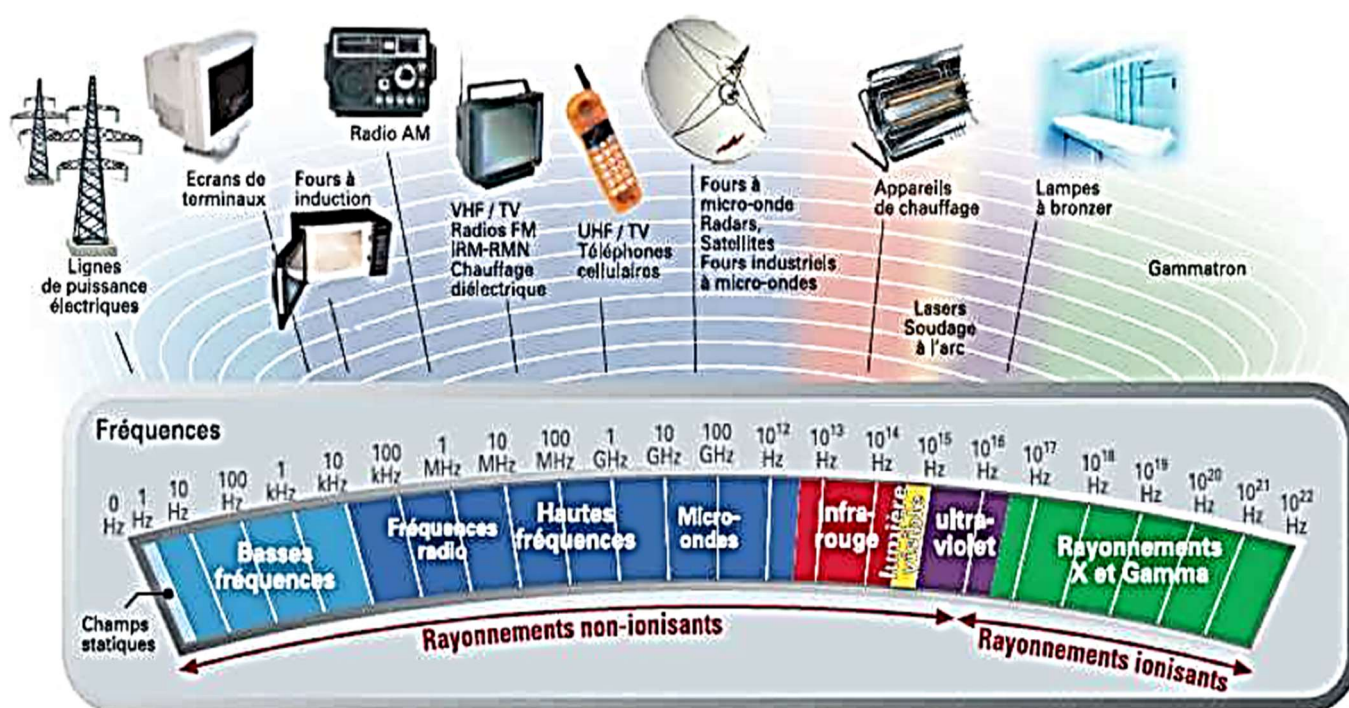


Figure 1. Spectre électromagnétique d'après l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses)

Une particularité des champs basses fréquences de 0 à quelques kHz est que le champ électrique ou le champ magnétique peuvent exister sous forme isolée l'un de l'autre, à la différence des champs hautes fréquences où ils sont liés, justifiant leur qualificatif d'électromagnétiques.

Le réseau électrique 50 Hz émet un champ électrique du fait d'une différence de tension. Ce champ électrique s'exprime en volt/mètre (V/m). Il est perceptible autour d'un appareil électrique sous tension même si celui-ci n'est pas en fonctionnement. Le champ électrique généré par une ligne haute tension est de 383 V/m sous une ligne 90 000 V, de 1639 V/m sous une ligne 225 000 V et de 4420 V/m sous une ligne de 400 000 V. Il décroît avec la distance (5).

Le courant électrique émet un champ magnétique du fait de la circulation des électrons. Le champ magnétique s'exprime en Gauss ou en Tesla (1 G = 100  $\mu$ T). Il est perceptible quand un appareil électrique est en fonctionnement. Le champ magnétique 50 Hz à l'aplomb d'une ligne haute tension dépend de nombreux paramètres et, en premier lieu, du courant transitant dans cette ligne, lui-même fonction de la consommation des usagers. La valeur maximale est de l'ordre de 30  $\mu$ T à l'aplomb d'une ligne 400 kV et de 1  $\mu$ T à une distance de 100 m de cette ligne. La valeur limite d'exposition (VLE) du public actuellement en vigueur est de 100  $\mu$ T (6).

Dans le cas des CEM hautes fréquences, on ne distingue pas la mesure du champ magnétique de celle du champ électrique mais on mesure la résultante des deux, dont l'intensité est exprimée en V/m et la densité de puissance en W/m<sup>2</sup> ou  $\mu$ W/cm<sup>2</sup>. Cette intensité décroît avec le carré de la distance.

**Les CEM HF des communications sans fil sont dits « pulsés » car ils sont émis de façon intermittente et ce, afin d'augmenter leur capacité à transmettre l'information. Cette particularité est importante, en termes d'impact biologique.**

En France, les valeurs limites réglementaires d'exposition du public pour les hautes fréquences, générées notamment par les antennes radios ou les antennes relais sont de 29,1 V/m pour 450 MHz, 41,2 pour 900 MHz,

58,2 pour 1800 MHz et 61 V/m pour la fourchette de 2 à 300 GHz (6). En Italie, cette norme est de 7 V/m toutes fréquences confondues, soit presque dix fois moins élevée. En Autriche, elle est de 0,6 V/m, soit cent fois moins élevée (7).

L'intensité de champ émise par le téléphone portable est encadrée par la valeur limite du DAS (débit d'absorption spécifique) ou SAR en anglais (Specific Absorption Rate). Le SAR est un indicateur d'exposition utilisé pour les CEM de fréquences comprises entre 100 kHz et 10 GHz. Il s'exprime en watt par kg (W/kg). Ce SAR est censé être représentatif de l'intensité d'énergie qui serait absorbée par les tissus humains lors de l'exposition aux CEM HF du téléphone portable pour une durée moyenne d'utilisation de six minutes et pour 10 g de tissus. Sa valeur limite en France est de 2 W/kg (6). Le SAR est calculé en fonction de l'effet thermique des CEM HF sur des échantillons de sérum physiologique, c'est-à-dire, l'élévation de température que le champ génère sur ces échantillons.

**Les CEM HF et BF non ionisants ou de « basse énergie » peuvent induire un stress oxydatif cellulaire, même sans augmentation de température : on parle d'effet « athermique ».** Les effets « athermiques » sont les effets biologiques qui surviennent pour des seuils d'exposition ne générant pas d'élévation de température dans les tissus. Bien qu'ils soient démontrés, ces effets ne sont pas encore communément admis, donc non pris en compte dans la norme et la prévention des risques.

Il existe aussi des pollutions combinées hautes et basses fréquences, notamment via le courant porteur en ligne (CPL) qui véhicule des hautes fréquences transitoires (30-100 kHz) sur le courant alternatif 50 Hz domestique. Dans la littérature, on parle de « dirty electricity » (électricité sale) ou « High Frequency Voltage Transients ». Du fait de l'expansion prévue des compteurs électriques communicants (« smartmeters »), nous risquons d'être de plus en plus exposés à ces CEM combinés HF/BF pulsés rayonnant autour du fil et des appareils électriques. Il n'existe pas de norme française encadrant ce type de CEM.

## 2. Méthodologie de travail

Le nombre d'études sur les effets biologiques des CEM artificiels est important : on recense plus de 20 000 études sur Google Scholar depuis 2009. On y trouve des études épidémiologiques explorant le lien statistique entre maladies et exposition humaine aux CEM. Il y a aussi des études biologiques expérimentales sur l'effet des CEM sur les animaux (in vivo) ou sur des cellules humaines ou animales (in vitro). Il existe donc une très grande source d'informations sur le sujet.

Pour faire la part des choses, j'ai sélectionné les publications de plus haut niveau de preuve épidémiologique (revues, méta-analyses et analyses poolées) examinant le lien statistique entre exposition aux CEM et pathologies actuellement préoccupantes dans notre société (cancers, infertilité, maladies neurodégénératives et troubles neuropsychiques). J'ai concentré mes recherches sur les publications des 10 dernières années. Afin de bien recenser l'ensemble des données, je présente aussi les grandes études parues après la réalisation des méta-analyses citées. Dans un second temps, j'ai recherché la plausibilité biologique du lien statistique, qui est un argument fort en faveur de la causalité de ce lien. J'ai donc cherché les études montrant les effets des CEM sur les tissus humains/animaux afin de comprendre comment les rayonnements électromagnétiques de basse énergie pouvaient interagir avec notre corps.

Mes recherches ont été effectuées via le site « PubMed » qui recense la majorité des publications scientifiques dans le domaine de la santé : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>

## II. PRINCIPALES PATHOLOGIES EN LIEN AVEC LES CEM

### 1. Cancers

#### a. Leucémies de l'enfant et champs électromagnétiques basses fréquences (CEM BF)

La leucémie est le cancer le plus fréquent de l'enfant, avec un pic entre 1 et 5 ans. Son incidence est en augmentation (8).

Concernant l'exposition aux CEM BF qui ont une composante électrique et magnétique, les explorations ont porté sur l'évaluation de l'intensité des champs magnétiques auxquels les enfants sont soumis dans leur quotidien et sa corrélation avec le risque de développer une leucémie.

Le champ magnétique généré par une ligne haute tension de 380 kV à pleine charge peut atteindre 10 milli Gauss (mG) soit 1 micro Tesla ( $\mu\text{T}$ ) à la distance de 60 à 80 m de la ligne ; cette distance est de 40 à 55 m pour une ligne 220 kV. La valeur limite d'exposition du public à ne pas dépasser est de 100  $\mu\text{T}$ .

La très récente revue de David O. Carpenter sur le lien entre CEM BF et cancers permet une vue d'ensemble exhaustive du lien statistique entre leucémies de l'enfant et CEM BF (9).

D'après cette revue, quatre méta-analyses publiées entre 1998 et 2000 montraient déjà un lien statistiquement significatif entre un surrisque de leucémie infantile et des expositions résidentielles élevées avec des Odds ratio (OR) de 1,5 à 2. La méta-analyse de 2000 d'Ahlbom et al. retrouve notamment un OR de 2 avec un intervalle de confiance à 95% (IC) de [1,27-3,13] pour des expositions supérieures ou égales à 4 mG/0,4  $\mu\text{T}$  ou plus. Cela signifie qu'un enfant soumis à des champs magnétiques de 0,4  $\mu\text{T}$  ou plus dans son foyer a en moyenne 2 fois plus de risque d'avoir une leucémie qu'un enfant n'étant pas soumis à ce champ. Un Odds ratio de 1 correspond à l'absence de surrisque, à savoir un risque de maladie équivalent à celui de la population générale (10).

Depuis l'an 2000, une méta-analyse et deux analyses de pool ont été publiées sur le sujet.

L'analyse poolée de Schüz et al. retrouve un surrisque de leucémie infantile en lien avec l'exposition nocturne aux champs magnétiques. Elle retrouve un OR de 1,93 [1,11-3,35] pour les enfants exposés à des champs supérieurs ou égaux à 0,4  $\mu\text{T}$  par rapport aux enfants exposés à des champs de moins de 0,1  $\mu\text{T}$ . Cette analyse poolée est très intéressante car elle montre un effet dose-réponse avec des OR observés croissants selon l'intensité de l'exposition, à savoir 1,11 [0,91, 1,36] pour une exposition entre 0,1 et 0,2  $\mu\text{T}$ , 1,37 [0,99, 1,90] pour une exposition entre 0,2 et 0,4  $\mu\text{T}$  (1,93 significatif pour une exposition supérieure ou égale à 0,4  $\mu\text{T}$ ). L'effet dose-réponse est un argument en faveur de la causalité du lien statistique entre champs magnétiques et surrisque de leucémie infantile (11).

L'analyse poolée de Kheifets et al. montre un surrisque non significatif avec un OR de 1,46 (IC 95% [0,8-2,68]) pour des expositions résidentielles supérieures ou égales à 0,4  $\mu\text{T}$  (12).

La méta-analyse de Zhao et al. est la plus récente : elle date de 2014. Elle retrouve un OR de 1,57 [1,03-2,40] pour les enfants exposés à des champs supérieurs ou égaux à 0,4  $\mu\text{T}$  par rapport aux enfants exposés à des champs de moins de 0,1  $\mu\text{T}$ . En analysant uniquement le surrisque de leucémie aigüe lymphoblastique, leucémie de l'enfant la plus fréquente, l'OR passe à 2,43 [1,30-4,55] (13).

**Bref, il apparaît que les données épidémiologiques de haut niveau de preuve sont actuellement suffisamment consistantes pour conclure à la réalité du lien épidémiologique entre surrisque de leucémie infantile et exposition résidentielle à un champ magnétique supérieur ou égal à 0,4  $\mu\text{T}$ , notamment du fait de la proximité d'une ligne haute tension.** En pratique, ce champ magnétique est très inférieur à celui de la Terre mais il est variable dans le temps et il reflète le plus souvent une exposition à une ligne haute tension qui génère parallèlement de forts champs électriques selon la distance de la ligne : environ 4000 V/m sous une ligne 400 000 V, 1000 V/m à 30m de la ligne et 40 V/m à 100 m de la ligne (5). En 2013, l'Anses

a été saisie par les ministères de la santé, du travail et de l'environnement pour la réalisation d'une expertise relative aux CEM BF. Elle a rendu son avis le 5 avril 2019.

Elle conclut à « un effet possible de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la leucémie infantile ». Elle recommande de « ne plus augmenter, par précaution, le nombre de personnes sensibles exposées autour des lignes de transport d'électricité à très haute tension et de limiter les expositions » (14).

#### b. Cancer du sein et champs électromagnétiques basses et hautes fréquences

L'incidence du cancer du sein est en augmentation non pas seulement du fait de l'effet du vieillissement de la population ni du dépistage (15). C'est le cancer le plus fréquent chez la femme. Aussi, un surrisque de cancer, même faible, est-il susceptible de se traduire par une augmentation notable du nombre de malades.

Cinq méta-analyses ont étudié le lien entre une exposition aux CEM BF et le risque de cancer du sein chez la femme. Cette exposition est hétérogène : il s'agit, soit d'une exposition professionnelle (travail dans le milieu de l'électricité, matrice emploi-exposition), soit domestique (vie à proximité d'une ligne haute tension, utilisation de couvertures électriques chauffantes qui induisent un fort champ électrique). Trois d'entre elles montrent un surrisque statistiquement significatif, une montre un surrisque non significatif tandis qu'une ne montre pas de surrisque.

La méta-analyse de Erren retrouve un risque relatif (RR) de 1,12 [1,09-1,15], soit un surrisque faible (16).

La méta-analyse de Chen et al. portant sur 15 études cas-témoins retrouve un OR de 0,988 [0,898-1,088], soit une absence de surrisque (17). Les auteurs ne concluent pas à l'absence définitive d'un lien entre le cancer du sein et l'exposition aux CEM BF compte tenu de l'hétérogénéité des mesures d'exposition et de la possibilité de biais dans la sélection des témoins. En effet, les études considèrent l'exposition professionnelle liée au

type de travail ou l'utilisation de couvertures électriques (fort champ électrique induit), ou la mesure de champ magnétique au foyer, influencée entre autres, par la présence d'une ligne haute tension à proximité.

La méta-analyse d'un autre auteur nommé Chen lui aussi, et de son équipe, porte sur 23 études et retrouve un surrisque global de 1,07 [1,02-1,13] de cancer du sein chez les femmes exposées aux CEM BF par rapport à celles non exposées (18). Cette méta-analyse retrouve un risque plus élevé en cas d'exposition aux CEM BF pour les cancers présentant des récepteurs aux oestrogènes (OR =1,11 [1,03,1,2]) et les cancers chez les femmes non ménopausées (OR = 1,11 [1-1,2], c'est bien le même OR !) mais ce risque est à la limite de la significativité. Les auteurs évoquent que cette association statistique est possiblement sous-estimée du fait de l'hétérogénéité de l'évaluation de l'exposition et/ou du fait d'un biais de méthodologie.

En 2014, Zhao et al. conduisent une méta-analyse sur 16 études cas-témoins et retrouvent un OR global à 1,10 [1,01-1,2] et un OR à 1,25 [1,05-1,49] pour les femmes non ménopausées. Soit un surrisque global superposable à celui de l'analyse de 2013 faite par Chen et al (19).

La dernière méta-analyse incluant 23 études cas-témoins sur le cancer du sein et conduite par Zhang et al. retrouve aussi des résultats proches : OR à 1,07 [1-1,15] non significatif mais OR à 1,23 [1,01-1,49] chez les femmes non ménopausées (20).

**Bref, si on considère l'ensemble des méta-analyses, le surrisque de cancer du sein en lien avec une exposition aux CEM BF paraît vraisemblable.** Une majorité d'auteurs expliquent que l'hétérogénéité des mesures d'exposition conduit possiblement à une sous-estimation du risque. Ce surrisque est faible mais comme expliqué ci-dessus, vu la fréquence de ce cancer, un surrisque faible peut se traduire par un grand nombre de malades supplémentaires.

La très récente revue de David O. Carpenter (9) recense toutes les méta-analyses étudiant le lien entre cancers et exposition aux CEM BF. Elle plaide aussi pour un lien consistant entre CEM BF et leucémies de l'adulte,

cancers du cerveau de l'adulte. En pratique, les CEM BF pourraient potentialiser tous les cancers. La preuve épidémiologique n'apparaîtrait que pour les cancers les plus fréquents et les plus étudiés. Carpenter évoque le fait que, comme nous sommes tous plus ou moins exposés à des CEM BF, il n'y a plus de réelle population témoin et que le surrisque de cancer est ainsi probablement sous-estimé. Il plaide pour l'application du principe de précaution consistant à diminuer les fortes expositions, comme le recommande l'Anses dans son rapport (14).

**Concernant les CEM HF, West et al. ont publié une étude de cas frappante en 2013.** Ils rapportent 4 cas cliniques de femmes jeunes (moins de 39 ans) ayant porté leur téléphone portable à proximité de leurs seins, notamment dans leur soutien-gorge, à raison de plus de 10 heures par jour pendant plusieurs années. Ces quatre femmes ont présenté le même type de cancer du sein, tous avec des récepteurs à oestrogènes, et situé exactement en regard de la zone où elles ont porté leur téléphone portable. Bien entendu cette publication ne constitue pas une preuve épidémiologique du lien entre CEM HF et cancer du sein mais elle doit nous interpeller et elle vient corroborer le faisceau d'arguments en faveur d'une potentielle carcinogénicité des CEM artificiels (21).

**Cette étude rejoint tout à fait les données des méta-analyses sur les CEM BF qui montrent un OR plus important pour les femmes non ménopausées et les cancers avec récepteurs aux œstrogènes.**

### c. Tumeurs cérébrales et champs électromagnétiques hautes fréquences (CEM HF)

Le surrisque de tumeur cérébrale en lien avec l'utilisation d'un téléphone portable fait débat. Il soulève des enjeux sociétaux et économiques énormes. Il y a beaucoup de littérature sur le sujet et beaucoup de controverse.

Les études ont porté sur les tumeurs malignes (gliomes, astrocytomes) ou bénignes (méningiome le plus fréquemment, et neurinome, notamment de l'acoustique). Le gliome ou glioblastome est la tumeur maligne la plus



fréquente du cerveau. Ce n'est pas un cancer fréquent mais il est de mauvais pronostic. Comme pour le cancer du sein, son incidence est en augmentation (15).

Sur pubmed, depuis 2015, on retrouve 5 méta-analyses explorant le lien entre le fait de présenter un gliome cérébral et le fait d'utiliser un téléphone portable ou pas (22-26). Deux d'entre elles, ont exploré toutes les tumeurs cérébrales.

J'ai synthétisé les résultats de ces méta-analyses dans deux tableaux ci-dessous.

Tableau 1 : Lien entre tumeurs cérébrales et utilisation du téléphone portable – les résultats significatifs sont mis en gras

Auteurs et date	OR et IC 95%	Facteur d'exposition
<b>Bortkiewicz et al. 2017</b>	0,94 [0,86-1,03]	Toute durée d'utilisation
	<b>1,29 [1,06-1,57]</b>	Toute durée – utilisation d'un seul côté de la tête
	<b>1,46 [1,07-1,98]</b>	>ou = 10 ans d'utilisation
<b>Prasad et al. 2017</b>	1,03 [0,92-1,14]	Toute durée d'utilisation
	<b>1,33 [1,07-1,66]</b>	>ou = 10 ans d'utilisation

Les deux méta-analyses dédiées retrouvent un lien statistique significatif pour les tumeurs intracrâniennes avec des OR moyens de 1,3 pour une durée d'utilisation de 10 ans ou plus, soit 30% de risque de tumeur en plus selon la façon dont on présente les choses, et ce par rapport à une personne n'utilisant pas son téléphone portable. Il est logique que le lien statistique soit plus fort pour une durée d'utilisation plus longue non pas seulement du fait de l'augmentation cumulative de l'exposition mais aussi du fait de la nécessité d'un certain laps de temps pour la genèse et le diagnostic d'une tumeur.

Un lien du même ordre de grandeur est retrouvé pour le gliome et pour les mêmes durées d'utilisation. Le gliome étant rare, les données sont moins nombreuses. Ainsi, certains auteurs ne retrouvent pas de lien avec l'utilisation du téléphone portable mais n'ont

pas fait d'analyses du sous-groupe « utilisation depuis plus de 10 ans » argumentant que les données sont trop peu nombreuses pour atteindre une puissance statistique satisfaisante.

Tableau 2 : Lien entre gliome et utilisation du téléphone portable

Auteurs et date	OR et IC 95%	Facteur d'exposition
<b>Wang et al. 2016</b>	<b>1,35 [1,09-1,62]</b>	Utilisation pendant plus de 5 ans
<b>Bortkiewicz et al. 2017</b>	0,92 [0,83-1,03]	Toute durée d'utilisation
	Pas d'analyse faute de faible puissance statistique	>ou = 10 ans d'utilisation
<b>Prasad et al. 2017</b>	1,08 [0,94-1,25]	Toute durée d'utilisation
	Pas d'analyse	>ou = 10 ans d'utilisation
<b>Yang et al. 2017</b>	0,98 [0,88-1,10]	Toute durée d'utilisation
	<b>1,44 [1,08-1,91]</b>	>ou = 10 ans d'utilisation
<b>Wang et al. 2018</b>	<b>1,33 [1,05-1,67]</b>	>ou = 10 ans d'utilisation

Une étude souvent citée dans la presse comme argument pour dire qu'il n'y pas de lien statistique significatif entre le risque de tumeur cérébrale et l'utilisation d'un téléphone portable est l'étude INTERPHONE. Cette étude est une source énorme de polémique. C'est une grande étude cas -témoin multicentrique conduite dans 13 pays publiée il y a 10 ans. Et en effet, elle retrouve un OR significatif négatif de 0,81 pour le gliome et de 0,79 pour le méningiome qui pourrait même faire extrapoler que l'utilisation du téléphone portable est un facteur protecteur de tumeurs cérébrales (27).

Dans cette même étude, en analysant les personnes ayant téléphoné pendant 1640 h ou plus, les auteurs retrouvent un OR significatif de 1,40 pour le gliome et non significatif de 1,15 pour le méningiome, ce qui suggère plutôt un effet délétère du téléphone portable.

En 2017, Momoli et al. ont repris les chiffres de cette étude et fait des ajustements tenant compte des biais possibles, ils retrouvent un OR significatif de 2,2 pour les personnes ayant utilisé un téléphone portable pendant plus de 558 heures par rapport à des non utilisateurs (28). La qualité des études est un point très important influençant la force d'une association statistique.

Dans leur méta-analyse citée ci-dessus, Prasad et al. ont évalué la qualité des études incluses. Il existe une tendance significative entre la qualité des études et l'OR du lien tumeurs cérébrales/utilisation du téléphone portable : les études de moins bonne qualité retrouvent un OR significatif à 0,8 tandis que l'étude de meilleure qualité retrouve un OR significatif de 1,64. Pour le sous-groupe d'utilisation supérieure ou égale à 10 ans, les études de moins bonne qualité retrouvent un OR non significatif de 1,13 tandis que l'étude de meilleure qualité retrouve un OR significatif de 2,58. L'OR global retrouvé dans leur méta-analyse pour les durées d'utilisation de 10 ans et plus est de 1,33 : il est affaibli par les études de moins bonne qualité.

Bref, si on analyse les données de façon rigoureuse, il apparaît que l'association statistique entre tumeurs cérébrales/gliome et utilisation du téléphone portable est consistante. Peut-on en déduire que le téléphone portable induit des tumeurs cérébrales dont des gliomes ?

La réalité de ce lien de causalité est très bien discutée dans la revue de 2017 de Carlberg et Hardell et semble difficilement réfutable : en plus d'une association statistique consistante et forte, **les gliomes retrouvés en lien avec l'utilisation du téléphone mobile sont le plus souvent situés dans la région temporale du cerveau (la plus exposée puisque située derrière l'oreille), le risque de gliome croît avec le degré d'exposition et les études animales montrent aussi une augmentation du risque de gliome chez les rats en cas d'exposition aux CEM HF (29).**

Pour les téléphones sans fil (DECT), on retrouve aussi un surrisque de gliome dans l'étude de Hardell et Carlberg avec un Odds ratio à 1.4 [1.1-1,9]. C'est logique puisque le

DECT (et sa base) émettent des CEM HF au même titre que les téléphones portables (30).

En 2018, Miller et al. ont publié une revue très complète dans le Journal of Environmental Research (31). Cette revue recense une très grande partie de la littérature mettant en lien l'utilisation du téléphone portable avec le risque de gliome et de tumeur cérébrale bénigne. Cette revue ne laisse pas vraiment de place au doute. Le CIRC, centre international de recherche sur le cancer a classé les CEM HF en cancérogènes possibles (groupe 2B). Miller et al. considèrent que le CIRC devrait revoir cette classification et catégoriser les CEM HF en catégorie A : cancérigènes avérés pour l'homme.

À ce jour, aucune revue accessible via pubmed n'est venue contredire leurs propos.

**Il apparaît donc que les données disponibles actuellement sont suffisamment consistantes pour affirmer que les CEM HF générés par l'utilisation du téléphone portable peuvent participer à la genèse d'une tumeur cérébrale, y compris de cancer comme le gliome.** La plausibilité biologique de ce lien tient vraisemblablement au stress oxydatif induit par les CEM HF, source de génotoxicité, comme nous le verrons dans le chapitre dédié à ce sujet.

Quel sera le surrisque de tumeur cérébrale après 20, 30, 40 ans de téléphonie mobile quotidienne ? Quid des appels via les smartphones quand ils sont à la fois connectés en Bluetooth, Wifi en plus des données mobiles, et sont donc susceptibles d'émettre davantage de champ électromagnétique ?

## 2. Maladies neurodégénératives

### a. Maladie d'Alzheimer et CEM BF

La maladie d'Alzheimer est la plus fréquente des maladies neurodégénératives, elle touche 15% des personnes âgées de plus de 80 ans en France. Elle représente un enjeu majeur de santé publique, avec des conséquences économiques et sociales considérables (32).

Sur pubmed, dans les publications des 5 dernières années, on retrouve deux méta-analyses portant sur le lien entre CEM BF et maladie d'Alzheimer.

La méta-analyse de Jalilian et al., publiée en 2018, recense 20 études portant sur le lien statistique entre exposition professionnelle à des CEM BF et risque de maladie d'Alzheimer. Elle retrouve un OR de 1,80 [1,40-2,32] pour les études cas-témoins et un risque relatif (RR) de 1,42 [1,08-1,87] pour les études de cohorte (33).

La méta-analyse publiée en 2019 par Gunnarsson et al. visait aussi à évaluer le surrisque de développer une maladie d'Alzheimer en cas d'exposition professionnelle à des CEM BF. Elle se base sur 13 études et retrouve un RR de 1,33 [1,07-1,64]. En ne retenant que les études publiées après 2005 afin d'éviter un biais de publication (le biais de publication vient du fait que les études positives sont d'avantage publiées que les études négatives, ou le contraire selon les cas), les auteurs retrouvent un RR moindre de 1,12 [1,04-1,2]. C'est probablement ce biais de publication qui explique que le surrisque retrouvé dans la méta-analyse précédente est plus important (34).

Dans une grande étude conduite sur 4,7 millions de suisses, le risque de mourir d'une maladie d'Alzheimer est corrélé au fait de vivre à 50 m ou moins d'une ligne à haute tension par rapport aux personnes vivant à plus de 600 m. Ce risque augmente avec le temps d'exposition : HR (Hazard ratio) de 1,51 [0,91-2,51] pour 5 années d'exposition passant à 1,78 [1,07- 2,96] pour plus de 10 ans et à 2,00 [1,21-3,33] pour plus de 15 ans. L'analyse porte sur les lignes de 220-380 kV et le risque est comparé à celui de personnes vivant à

600 m ou plus de la ligne. Selon les auteurs, à pleine charge, le champ magnétique peut atteindre 1  $\mu$ T à la distance de 60–80 m d'une ligne 380 kV ou 40–55 m d'une ligne 220 kV. On voit qu'il existe un effet dose-réponse (ou dose-effet) : plus on est exposé longtemps, plus on a de risque. L'étude retrouve aussi un surrisque de démence sénile avec le même effet d'augmentation du risque en parallèle de la durée d'exposition (35).

Compte-tenu des résultats importants de cette étude, Frei et al. ont conduit leur propre étude cas-témoin sur le sujet et répertorié toutes les personnes hospitalisées au Danemark pour un premier diagnostic de maladie neurodégénérative entre 1994 et 2010 qu'ils ont comparées à 6 témoins par cas (36).

Ils retrouvent un HR à 1,04 non significatif [0,69-1,56] pour les personnes vivant à moins de 50 m de la ligne versus plus de 600 m. Ils concluent que les données sont rassurantes sur le risque d'Alzheimer en lien avec le fait de vivre à proximité d'une ligne haute tension. Fait notable, ils retrouvent un HR de 2,59 significatif [1,17-5,76] pour les personnes de la tranche d'âge 65-75 ans ayant vécu dans les 50 m d'une ligne haute tension 132 à 400 kV mais ils ne discutent pas ce résultat qui va pourtant dans le sens de l'étude Suisse.

Ils ne retrouvent pas d'effet dose-réponse mais l'analyse n'a pas isolé les personnes ayant vécu plus de 15 ans à côté de la ligne qui ont été mis dans le groupe « plus de 10 ans ». De plus, le fait de sélectionner les cas hospitalisés pour une maladie (étude Danoise) est-il plus fiable que la sélection de cas via les données des certificats de décès (étude Suisse), sachant que toutes les personnes présentant un Alzheimer ne sont pas hospitalisées ?

L'étude Suisse prend en compte uniquement les lignes haute tension de plus de 220 kV tandis que l'étude danoise prend aussi en compte les lignes 132 kV et donc générant un CEM BF de moins forte intensité. L'inclusion d'expositions plus faibles dilue l'effet des plus fortes expositions et peut venir fausser l'analyse de l'effet dose-réponse. Bref, il est possible que des biais méthodologiques

aient conduit à minorer le lien statistique dans l'étude Danoise.

Gervasi et al. ont conduit le même type d'étude en Italie et retrouvent un HR global non significatif de 1,11 [0,95-1,30] pour les personnes vivant à moins de 50 m des lignes vs 600 m. Cette étude est moins informative car elle n'a pas évalué les expositions longues de plus de 15 ans et n'a pas fait les calculs de risque par tranche d'âge. Les auteurs concluent que leur étude ne disqualifie pas l'hypothèse selon laquelle les CEM BF générés par les lignes haute tension pourraient augmenter le risque de maladie d'Alzheimer (37).

**Au total, les deux méta-analyses publiées dans les 5 dernières années montrent toutes deux un lien statistique significatif entre CEM BF et maladie d'Alzheimer dans le cadre d'une exposition professionnelle.** Même si les RR sont faibles, ils doivent interpeller, compte-tenu de l'incidence de la maladie d'Alzheimer et de son retentissement sociétal. Nous avons aussi des arguments en faveur de ce lien lors d'une exposition domestique via les lignes haute tension. L'association statistique est donc consistante et l'existence d'un effet dose-réponse dans l'étude de Huss et al. plaide en faveur d'un lien de causalité.

#### b. Sclérose latérale amyotrophique et CEM BF

La sclérose latérale amyotrophique (SLA), une maladie du motoneurone, est rare mais létale dans les 15 à 20 mois après la pose du diagnostic (38).

Il existe trois méta-analyses parues dans les 5 dernières années mettant en évidence un lien avec les CEM BF.

Une méta-analyse parue en 2018, montre un lien entre une exposition professionnelle aux CEM BF 50 Hz et le risque de développer une SLA. L'évaluation de l'exposition aux CEM est hétérogène (travail d'électricien ou en lien avec des machines électriques et/ou exposition évaluée par une matrice emploi/exposition). En stratifiant les analyses pour limiter les biais liés à l'hétérogénéité des études,

les auteurs retrouvent un RR (risque relatif stratifié) de 1,41 [1,05-1,92] chez les personnes travaillant dans le domaine de l'électricité et un RR de 1,89 [1,31- 2,73] pour les personnes les plus exposées au cours de leur carrière, le tout par rapport aux personnes les moins exposées, en termes de durée et d'intensité (39).

La méta-analyse de Gunnarsson et al. repose sur 16 études et retrouve un RR de 1,18 [1,07-1,50] en lien avec une exposition professionnelle aux CEM BF (40).

La récente méta-analyse du même auteur repose sur 19 études et retrouve un surrisque de SLA en lien avec une exposition professionnelle aux CEM BF : RR de 1,26 [1,07-1,50] (34).

**Nous avons donc suffisamment d'arguments épidémiologiques pour attester d'un lien statistique consistant entre une exposition professionnelle aux CEM BF et un surrisque de SLA.**

D'après la méta-analyse de Huss et al., un argument en faveur de la causalité de ce lien statistique est la présence d'un effet dose-réponse. En faveur de cette causalité, nous avons aussi et surtout un mécanisme physiopathologique expliquant ce lien statistique : les maladies neurodégénératives sont liées à un stress oxydatif cellulaire avec une perte neuronale excessive et nous allons voir dans le chapitre dédié à ce sujet, que les CEM BF et HF induisent un stress oxydatif cellulaire. Concernant la maladie de Parkinson, il existe aussi des preuves intéressantes d'un lien avec les CEM BF mais la méta-analyse sur le sujet retrouve un OR positif non significatif (1,31 [0,97, 1,78] pour les études de meilleure qualité). Des études supplémentaires de bonne qualité méthodologique permettraient probablement de mettre en évidence ce lien (41).

### c. Maladies neurodégénératives et CEM HF

Nous avons peu de données épidémiologiques concernant le lien entre maladies neurodégénératives et exposition aux CEM HF mais certaines études très récentes peuvent nous interpeller.

Une étude française tout à fait remarquable vient de paraître et montre une association statistique entre l'exposition résidentielle aux CEM HF des antennes relais GSM (900-2600MHz) et le risque de SLA (42).

Les auteurs ont comparé les cas de SLA observés par rapport aux cas attendus selon le taux d'incidence de SLA dans le Limousin, en fonction de l'exposition résidentielle des cas observés aux CEM HF des antennes relais. L'intensité de CEM HF au domicile résultant des émissions des antennes relais qui en sont proches a été estimée via un modèle considérant leur distance avec le domicile et la puissance de CEM HF qu'elles émettent. Les auteurs retrouvent un RR significatif de 1,78 [1,28-2,48] pour les personnes du groupe le plus exposé (CEM HF estimé entre 0,63 V/m et 2,81 V/m) par rapport à celles non exposées. Le RR croît avec le degré d'exposition (tendance significative) et un RR de 1,53 significatif est retrouvé à partir de la catégorie d'exposition située entre 0,14 et 0,31 V/m.

Les auteurs soulignent que l'association statistique retrouvée présente de nombreux critères de causalité : effet dose-réponse, temporalité, congruence avec les études sur les CEM BF et existence d'études montrant un effet biologique des CEM HF. Les auteurs évoquent que leur estimation des CEM HF est possiblement surestimée car le modèle utilisé considère que toutes les antennes relais émettent en même temps et à puissance maximale. Ils expliquent que leur estimation de CEM HF est cependant bien inférieure aux valeurs limites d'exposition françaises qui sont respectivement de 41 V/m et 61 V/m pour les fréquences de 900 et 2600 MHz. **Ils concluent que « les CEM pourraient déclencher une dégénérescence neuronale chez des personnes présentant une susceptibilité génétique à la SLA ».** En effet, la SLA est favorisée par une mutation du gène de la

superoxyde dismutase 1, enzyme antioxydante (voir chapitre sur le stress oxydatif).

Les histogrammes présentés dans cette publication sont frappants : le nombre de cas incidents de SLA croît parallèlement au nombre d'antennes GSM entre 2000 et 2012.

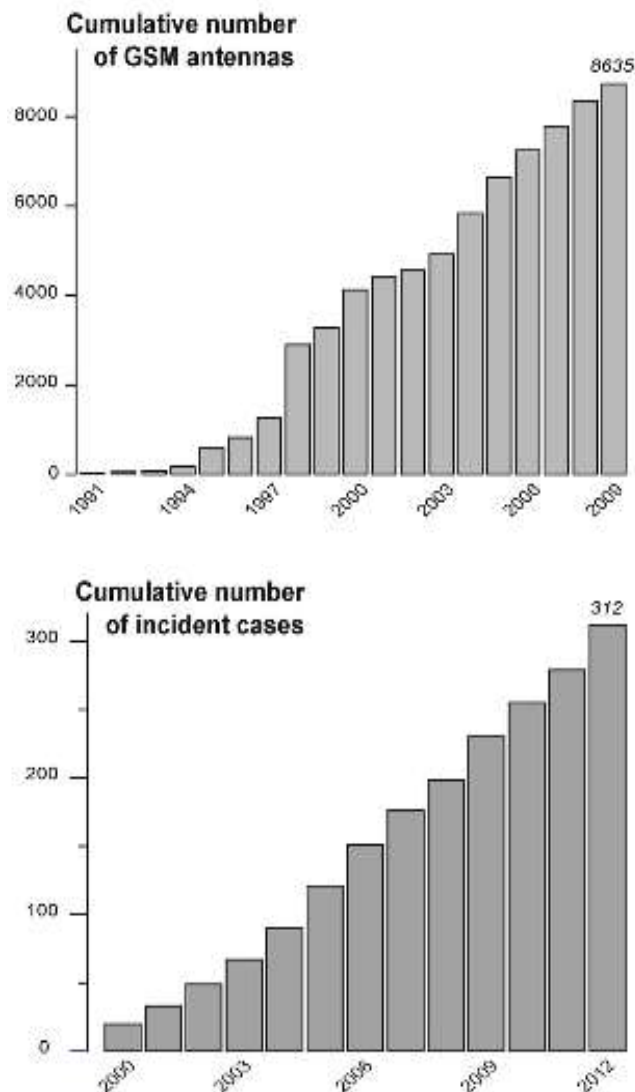


Figure 2. « Nombre cumulé d'antennes GSM et de cas de SLA dans la région » (42)

Stefi et al. ont étudié l'impact potentiel du téléphone portable sur le risque de développer une maladie d'Alzheimer ou de Parkinson. Ils ont exposé des cellules de neuroblastome humain (cellules généralement utilisées pour étudier les maladies neurodégénératives) à raison de 10 min, trois fois par jour pendant 2 jours à un CEM HF 1800 MHz pulsé (intensité moyenne = 10 V/m, SAR = 0,23W/kg). Comparativement aux échantillons non exposés à ce champ, les cellules exposées ont présenté des altérations de la protéine précurseur de l'amyloïde (impliquée dans la genèse de la

maladie d'Alzheimer) et de l'alpha-synucléine (impliquée dans la maladie de Parkinson) ainsi qu'un excès de stress oxydatif. Le pourcentage de mort cellulaire était significativement accru dans l'échantillon exposé au CEM HF. Les auteurs ont mesuré les températures des échantillons exposés et non exposés et excluent catégoriquement la présence d'un effet thermique. **Ils concluent que l'utilisation des communications sans fil pourrait constituer un facteur de risque de maladies neurodégénératives** (43).

### 3. Infertilité

Il est estimé que 14 % des couples des pays industrialisés ont des difficultés à concevoir à un moment de leur vie. L'infertilité masculine est impliquée dans 40 % des cas et une grande proportion des cas reste souvent inexploquée (44).

**Les trois revues publiées sur le sujet dans les 5 dernières années concluent à un lien entre l'exposition aux CEM HF (notamment du téléphone portable et du Wifi) et le risque d'infertilité, notamment masculine.** Le mécanisme biologique principal évoqué par les auteurs est le stress oxydatif occasionné par les CEM HF sur le sperme. Le deuxième mécanisme évoqué est la perturbation de la production de LH/FSH dans la glande hypophysaire. Ces deux mécanismes ne sont pas exclusifs l'un de l'autre (45-47).

La seule publication contradictoire sur le sujet classée en « revue » sur Pubmed date de 2013 (48). L'auteur déclare que la majorité des études sont négatives sur le sujet ; or les trois méta-analyses parues sur le sujet en 2013 et 2014 montrent exactement le contraire (cf. chapitre suivant). Il ne cite qu'une étude positive, dont il pointe les faiblesses méthodologiques et ne cite aucune étude négative. Il nie l'existence d'effets athermiques et cite l'étude Interphone comme preuve de l'absence de lien entre téléphone mobile et tumeurs cérébrales. Bref, cette publication relève d'un parti pris et non d'une analyse scientifique objective du sujet.

- a. Etudes montrant un lien entre anomalies du sperme et exposition aux CEM du téléphone portable et du Wifi

**Il existe trois méta-analyses étudiant le lien entre exposition aux CEM HF du téléphone portable et anomalies du sperme. Elles retrouvent toutes une association statistique significative.**

La méta-analyse d'Adams et al. (44) publiée en 2014 porte sur 10 études publiées entre 2000 et 2012, soit 1492 échantillons de sperme humain. Elle excluait les études comportant une exposition professionnelle aux CEM HF pour étudier l'impact de l'exposition au téléphone portable sur le sperme humain in vitro pour 6 des études (les échantillons de sperme sont expérimentalement exposés à des CEM HF émis par téléphone portable ou dans une chambre d'exposition aux ondes dédiée à cet effet) et in vivo pour les 4 études restantes (les hommes dont le sperme a été analysé, ont été questionnés sur leur utilisation du téléphone portable).

Pour les études in vitro, l'exposition consiste en un CEM HF de SAR max 2 W/kg et pour une fréquence de 800 à 2200 MHz. In vitro, l'exposition dure 1h par jour pour 4 des études, 16 h pour une étude et 5 minutes pour une autre. Sauf une étude, nous sommes donc dans des conditions d'exposition superposables à celles de nos utilisations courantes. Au total, l'exposition au téléphone portable est liée à une diminution significative de la mobilité du sperme de - 8% [-13,1 ; -3,2] et non significative de sa viabilité de - 9% [-18,4 ; 0,2]. Les résultats sont plus équivoques pour la concentration du sperme. Les auteurs évoquent un effet non thermique des CEM HF : dommages sur l'ADN par stress oxydatif, l'intégrité de l'ADN étant corrélée à la viabilité et à la mobilité du sperme.

La méta-analyse de Dama et al. publiée un peu avant celle d'Adams et al. avait pris en compte 11 études publiées avant 2012 (49). Elle montre une diminution significative de la qualité du sperme (concentration, morphologie et mobilité) en lien avec l'utilisation du téléphone portable. Les auteurs concluaient à la possibilité d'une recrudescence future de

l'infertilité masculine en lien avec l'exposition des CEM HF du téléphone portable, à la nécessité d'éduquer les utilisateurs aux risques liés au téléphone mobile et à la nécessité de conduire des études sur les smartphones.

La méta-analyse de Liu et al. parue sur le sujet prenait aussi en compte les études portant sur les animaux (50). Elle a sélectionné 12 études au total. Les 4 études in vitro montrent une altération significative de la mobilité et de la viabilité du sperme suite à l'exposition au téléphone portable. Les 4 études animales (rats, souris, lapins) montrent une altération de la mobilité et de la concentration en spermatozoïdes du sperme après exposition au téléphone portable. Les 4 études humaines in vivo montrent une altération de tous les paramètres observés (mobilité, viabilité et concentration) mais aucune n'atteint le degré de significativité. Les auteurs évoquent que les études humaines sont très hétérogènes et biaisées notamment via le facteur d'exposition : durée d'utilisation du téléphone portable approximative évaluée par auto questionnaire. Ils concluent à la nécessité d'études humaines in vivo avec une meilleure appréciation du facteur d'exposition (nécessité d'un dosimètre permettant d'évaluer l'intensité et la durée d'exposition à un CEM HF au niveau du testicule). Ils évoquent l'effet du stress oxydatif sur les cellules testiculaires comme mécanisme d'altération du sperme et conseillent aux utilisateurs de téléphone portable de ne pas porter leur téléphone à proximité de leurs testicules.

**Depuis ces méta-analyses, la plus grande étude publiée sur le sujet est une étude de cohorte réalisée en Chine sur plus de 1500 hommes sains de 2013 à 2015 (51).** Leur moyenne d'âge était de 20 ans. Les résultats sont éloquentes : la concentration du sperme en spermatozoïdes diminue à mesure que le temps de conversation via un téléphone portable augmente. La concentration du sperme et le nombre total de spermatozoïdes diminuent à mesure que la durée d'utilisation d'internet via le téléphone portable augmente. Le volume du sperme diminue même quand la quantité de données téléchargées sur le smartphone augmente (en Gigabytes par mois). **Les auteurs concluent que les CEM HF corrélés à l'utilisation du téléphone portable favorisent l'altération**

**du sperme et donc, des capacités reproductives.** Ils évoquent trois mécanismes ; augmentation de chaleur locale, dommages liés au stress oxydatif sur les cellules testiculaires et modifications des taux d'hormones sexuelles altérant la production de sperme. Ils recommandent aux hommes désirant concevoir, d'éviter l'utilisation abusive de leur téléphone portable.

Il existe moins d'études étudiant l'impact du Wifi sur le sperme humain. Les résultats vont dans le même sens que pour le téléphone portable, ce qui est logique, puisqu'il s'agit aussi d'une exposition à un CEM HF.

En 2012, Avendano et al. ont étudié 29 échantillons de sperme de donneurs sains. Ces échantillons ont été répartis en un groupe exposé pendant 4 heures à un ordinateur connecté en Wifi (2,4 GHz, densité de puissance mesurée en temps réel pendant l'exposition variant de 0,5 à 1  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) et un groupe non exposé. Le sperme exposé aux CEM HF du Wifi est significativement moins mobile et son ADN est significativement plus fragmenté. Les auteurs évoquent l'hypothèse d'un effet athermique des CEM HF puisque les échantillons exposés et non exposés ont été ventilés de sorte à être dans les mêmes conditions de température. Ils extrapolent les résultats de cette étude à une diminution prévisible de fertilité pour les hommes utilisant leur ordinateur portable en Wifi proche de leurs testicules (52).

En 2017, Kamali et al. ont étudié 40 échantillons de sperme de donneurs sains exposés à un CEM Wifi pendant 50 minutes versus échantillons non exposés. L'exposition consiste à placer les échantillons entre un modem (à 10 cm) et un ordinateur portable (à 50 cm) téléchargeant des données pendant 50 minutes. Le SAR maximum du modem est de 1,3 W/kg et la fourchette de fréquence du CEM est de 2400 à 2446,5 MHz avec une densité de puissance de 10 mW. A ces seuils inférieurs à la norme du SAR, les auteurs retrouvent aussi une diminution significative de la mobilité du sperme exposé (53).

Ces deux études sont des études in vitro qui ne peuvent être généralisées à des conditions in vivo mais devraient susciter notre vigilance. Notons aussi, qu'il n'existe

actuellement pas d'études sur le Wifi 5 GHz en cours d'extension dans les modems.

#### b. Infertilité féminine et CEM BF/HF

Le lien statistique entre le risque d'infertilité féminine et une exposition aux CEM artificiels a été moins étudié. Pour les CEM HF, une méta-analyse est en cours (54).

Pour les CEM BF, on retrouve une seule étude cas-témoin montrant un lien statistique important entre le fait de vivre à proximité d'une ligne Haute Tension (240-400 kV) et le risque d'infertilité. Dans cette étude publiée en 2019, les auteurs retrouvent un OR significatif de 4,44 [2,77 – 7,11], soit 4 fois plus de risque de présenter une infertilité féminine quand on vit à moins de 500 m d'une ligne haute tension en comparaison à une femme vivant à plus de 1000 m de la ligne (55).

### 4. Symptômes neuropsychiques et CEM HF

Le cerveau est un organe bioélectrique par excellence. On ne sera donc pas surpris que les CEM puissent en affecter le fonctionnement.

#### a. « Syndrome des micro-ondes » et CEM HF

Par « syndrome des micro-ondes », on entend un ensemble de symptômes corrélés à une exposition aux CEM HF et non l'exposition au four « micro-ondes » (!).

Les premières études faisant état d'un « syndrome des micro-ondes » chez des personnes exposées professionnellement à des CEM HF datent des années 70. Elles proviennent de Russie et des Etats-Unis et concernent des militaires exposés à des radars ou à des antennes radios. Ce syndrome des micro-ondes combine différents symptômes neuropsychiques : fatigue, maux de tête, insomnies, dysesthésies, irritabilité, manque de concentration... (56)

Dans sa revue portant sur les études humaines, Martin L. Pall a recensé 22 études

retrouvant les symptômes du syndrome des micro-ondes en cas d'exposition aux CEM HF (56).

Ces 22 études concernent différents types d'exposition aux CEM HF :

- le fait de vivre à proximité d'une antenne relais de téléphonie mobile (7 études), ou d'une antenne radio
- l'utilisation du téléphone portable (7 études)
- une exposition professionnelle (travail dans la diffusion des ondes radio ou de télévision)

Tableau 3. « Symptômes neuropsychiques communément rapportés suivant une exposition aux CEM HF ». Traduction du tableau de Martin L. Pall (56)

Symptômes	Nombres d'études rapportant ces symptômes
Troubles du sommeil/Insomnies	17 études
Céphalées	14
Fatigue	11
Symptômes dépressifs	10
Dysesthésies - dysfonction visuelle/auditive/olfactive	10
Troubles cognitifs, de l'attention, de la concentration	10
Etourdissements, vertiges	9
Troubles de la mémoire	8
Tension nerveuse, stress, anxiété, agitation, sensation d'inconfort	8
Irritabilité	7
Perte d'appétit, perte de poids	6
Sensations de tiraillement cutané, brûlure, inflammation, dermatoglyphisme	6
Nausées	5

Dans cette revue, Martin L. Pall montre que le lien entre CEM HF et effets neuropsychiques remplit tous les critères de causalité épidémiologique :

- force de l'association épidémiologique au sein des différentes études,
- consistance au sein des études de différents pays et pour différents types d'exposition (professionnelle ou privée),
- temporalité (les effets surviennent après l'exposition),



- effet dose-réponse (plus l'exposition est importante, plus les effets sont fréquents ou intenses),
- forte crédibilité biologique : activation des canaux calciques dépendants du voltage à l'origine d'un stress oxydatif cellulaire et d'une dérégulation dans le relargage des neurotransmetteurs par les neurones (voir chapitre dédié ci-après).

Je n'ai pas trouvé d'autres revues de la littérature sur le sujet en dehors de celle de Wang et al. explicitée dans le chapitre suivant et portant sur les céphalées en lien avec l'utilisation d'un téléphone portable.

Il existe une revue très récente recensant les études sur le comportement de rats ou de souris exposés aux CEM HF de la fréquence d'un téléphone portable (900 et 1800 MHz) à des niveaux comparables à nos expositions quotidiennes (57). Une majorité d'études montre une altération des capacités d'apprentissage et une majoration de l'anxiété chez les rongeurs. Les auteurs concluent à l'urgence de conduire d'avantage d'études sur les humains, compte-tenu d'un risque possible de troubles comportementaux en lien avec notre exposition aux CEM HF.

De nos jours, nous assistons à une recrudescence de patients consultant pour un syndrome anxiodépressif ou des symptômes plus généraux de fatigue, irritabilité et insomnies. Ces symptômes sont aspécifiques et multifactoriels, et sont souvent mis sur le compte du stress psychosocial actuel. Comme nous sommes tous exposés aux CEM HF, il est difficile de déterminer quelle part de ces symptômes est à attribuer aux pollutions électromagnétiques... **L'EUROPAEM (European Academy for Environmental Medicine), fait un parallèle entre l'augmentation des pollutions électromagnétiques environnementales et l'augmentation de l'incidence des troubles mentaux : hyperactivité de l'enfant, dépression et « burn out ».** L'incapacité au travail liée aux troubles mentaux a été multipliée par 7 en Allemagne entre 2004 et 2011 (58).

## b. Céphalées et utilisation du téléphone portable

La méta analyse de Wang et al. (59) retrouve une association statistique significative franche entre l'utilisation du téléphone portable et l'apparition de céphalées.

Les auteurs évoquent deux mécanismes physiopathologiques en lien avec ces céphalées : ouverture de la barrière hémato-encéphalique et perturbation du système dopamine-opiacés.

C'est la seule méta-analyse sur le sujet.

Chu et al. ont étudié le risque de céphalée imputable à l'utilisation du téléphone portable, c'est-à-dire, de céphalées survenues au bout de 10 min d'utilisation du téléphone portable et/ou dans l'heure suivant cette utilisation (60). Ils estiment que le lien de causalité entre téléphone portable et céphalées remplit les critères de causalité suivants :

- temporalité,
- effet dose-réponse (plus la conversation téléphonique est longue et plus le risque de céphalée est important),
- traits cliniques communs de ces céphalées (intensité modérée, impression de pression ou de brûlures, survenue du côté de la tête où le téléphone portable est apposé).

Dans cette étude, réalisée auprès d'étudiants en médecine coréens, 19% des étudiants présentaient des céphalées en lien avec l'utilisation du téléphone portable et ils les avaient expérimentées plus de 10 fois dans l'année précédant l'étude.

## c. Troubles de l'attention avec ou sans hyperactivité de l'enfant et exposition au téléphone portable

Il s'agit d'un sujet d'actualité car l'incidence de ces troubles augmente. La réponse actuelle du corps médical repose sur la prescription de médicaments et sur l'accompagnement éducatif et psychothérapeutique de l'enfant. Il est admis que cette pathologie puisse avoir des sources génétiques et environnementales, notamment via une exposition prénatale au plomb (61).

Une étude de qualité a été réalisée chez 2422 enfants par Byun et al. (62). Elle montre que plus l'enfant passe de temps à utiliser un téléphone portable pour jouer à des jeux vidéo, plus le risque d'hyperactivité chez cet enfant est élevé, le tout avec un effet dose-réponse. Elle montre aussi que plus l'enfant téléphone longtemps avec un téléphone portable, plus il présente un risque d'hyperactivité, mais les résultats ne sont significatifs que pour les enfants présentant les taux de plomb les plus élevés dans le sang ( $>$  ou  $=$  à 2,35 mg/dl). **Les auteurs discutent la possibilité d'un effet direct des CEM HF sur le cerveau de l'enfant à l'origine des troubles de l'attention, effet potentialisé par la neurotoxicité du plomb.** Concernant les jeux sur le téléphone portable, les auteurs évoquent plutôt l'effet du jeu vidéo en tant que tel qui ne stimule que certaines zones du cerveau. Les auteurs conseillent de limiter l'exposition des enfants au téléphone portable, qu'il s'agisse de jouer à des jeux ou de téléphoner.

Je n'ai pas trouvé d'études venant infirmer ou confirmer ces résultats. Il existe une grande étude chinoise réalisée sur plus de 7000 adolescents montrant que le risque d'inattention augmente significativement si l'adolescent possède un téléphone portable ou s'il joue plus d'une heure par jour sur un téléphone portable (63). Il existe aussi un surrisque d'inattention en lien avec la durée des appels mais il n'est pas significatif. Les auteurs concluent que l'effet du téléphone portable sur l'attention n'est pas lié aux CEM HF qu'il émet, mais à un impact psychologique du jeu sur le téléphone. Cette étude retrouve aussi que les adolescents qui éteignent leur portable la nuit sont significativement moins inattentifs que ceux que le laissent allumé et proche de leur tête. Les adolescents jouent-ils pendant la nuit ? Les auteurs n'ont pas discuté ce résultat qui soulève pourtant la possibilité d'un impact des CEM HF du téléphone sur la qualité du sommeil en lien avec le risque d'inattention.

Les résultats de l'analyse multicentrique de Birks et al., montrent que plus les femmes enceintes utilisent un téléphone portable pendant leur grossesse, plus le risque que leur bébé à naître présente des troubles de l'attention avec ou sans hyperactivité augmente (64). C'est la plus grande étude sur le sujet.

Sage et Burgio ont publié une revue sur le lien entre les technologies sans fil et les troubles développementaux de l'enfant (65). Ils pensent que ce lien est le fait de perturbations épigénétiques induites par les CEM HF, perturbations pouvant induire des modifications du développement et de l'activité neuronale. **Les auteurs plaident pour l'utilisation d'outils numériques câblés plutôt que sans fil, afin de bénéficier du progrès technologique sans mettre en danger la santé des enfants.** Il n'y a pas d'autres revues sur le sujet.

Cette revue a donné lieu à un article critique de Grimes et Bishop dans le même journal (66). Les auteurs considèrent que la revue de Sage et al. relève de la désinformation au motif que les CEM HF étant non ionisants, ils ne peuvent pas causer de dommages sur l'ADN. Grimes et al. ne discutent pas la qualité des études mettant en évidence un effet des CEM HF sur l'épigénétique, qu'ils ne citent pas. Ils considèrent que la revue de Sage et Burgio est dommageable pour les familles ayant des enfants hyperactifs car c'est leur faire porter un poids que de les « inciter à éviter certaines technologies ».

Dans les faits, Sage et Burgio ne conseillent pas de limiter les nouvelles technologies mais d'éviter les technologies sans fil en attendant que de futures recherches puissent identifier des niveaux d'exposition aux CEM HF du « sans fil » non dommageables pour la santé de l'enfant.

Nous verrons que les troubles neuropsychiques induits par les CEM HF sont vraisemblablement liés, entre autres, à leur capacité de perturber les canaux calciques dépendants du voltage de notre cerveau. Cette capacité ne nécessite pas de pouvoir « ionisant ». Le caractère non ionisant des ondes électromagnétiques générées par les technologies sans fil n'est donc pas un argument scientifique valide pour infirmer la possibilité qu'elles aient un effet biologique à des niveaux athermiques.

#### d. Activité cérébrale et exposition au téléphone portable

Les études citées ci-dessus portent sur des évaluations subjectives des troubles neuropsychiques en lien avec les CEM HF puisqu'elles reposent sur l'emploi de questionnaires. L'étude de l'activité cérébrale est une analyse objective de la réaction du système nerveux exposé à un CEM HF.

La revue de 2017 de Zhang et al. a analysé 16 études parues entre 2011 et 2016 portant sur les modifications de l'activité cérébrale en cas d'exposition au téléphone portable (67). Une majorité de ces études utilisent l'électro-encéphalogramme (EEG), une minorité utilisent le PET scan (scanner couplé à une tomographie par émission de positons) et l'IRM fonctionnelle (imagerie par résonance magnétique).

Cette revue pointe des résultats divergents liés à l'hétérogénéité des protocoles d'études. Néanmoins, plusieurs études sont en faveur d'une augmentation de l'excitabilité corticale pendant l'exposition au téléphone portable : augmentation du métabolisme cérébral sur le PET scan dans les régions orbito-frontale et temporale (proches du téléphone portable) ; modifications des ondes alpha, bêta et gamma à l'EEG. Une étude montre que l'EEG de sommeil est perturbé après l'utilisation d'un téléphone mobile pendant 3 heures (SAR 1,4 W/kg, fréquence 884 MHz). Les auteurs évoquent que l'augmentation de l'excitabilité corticale peut avoir un effet bénéfique durant la veille avec des délais de réponse cognitive plus rapides. En contrepartie, cette hyperexcitabilité peut induire des altérations du sommeil réparateur. Selon les auteurs, les CEM HF du téléphone portable pourraient induire une modulation des neurotransmetteurs et notamment de la sérotonine, à l'origine de ces perturbations (la sérotonine est le précurseur de la mélatonine). Ils concluent à la nécessité d'études complémentaires sur les effets neurophysiologiques de l'utilisation du téléphone portable, notamment à long terme. **En attendant la réalisation de ces études, ils recommandent de diminuer l'utilisation du téléphone portable.**

Si les CEM HF du téléphone portable induisent une hyperexcitation corticale et des

altérations du sommeil visibles sur les explorations fonctionnelles, il paraît vraisemblable que ces CEM puissent participer aux troubles de l'attention de l'enfant avec ou sans hyperactivité et aux symptômes d'insomnies ou de fatigue du syndrome des micro-ondes.

Depuis cette revue, une autre revue a été publiée en 2019 sur le sujet : elle est plus partielle car elle n'a analysé que les études portant sur l'EEG de veille (68). Elle relate que la majorité des études montre des modifications des ondes alpha en lien avec une exposition au téléphone portable mais avec des résultats divergents liés à des protocoles d'études différents. Les auteurs concluent à la nécessité d'études mieux standardisées afin de pouvoir tirer des conclusions dans le cadre de l'EEG de veille. Elle n'infirme donc pas les conclusions de la précédente revue de Zhang et al. qu'elle ne cite d'ailleurs pas.

### III. MECANISMES PHYSIOPATHOLOGIQUES DE LA NOCIVITE DES CEM ARTIFICIELS SUR NOS CELLULES

D'après les données publiées à ce jour, il apparaît que la base physiopathologique de la nocivité potentielle des CEM sur nos cellules repose majoritairement sur un excès de stress oxydatif, c'est-à-dire un déséquilibre entre la production de radicaux libres et les défenses antioxydantes (69). Ce stress oxydatif pourrait être une conséquence de la perturbation, par les ondes électromagnétiques artificielles, des canaux calciques dépendants du voltage présents dans les membranes cellulaires. Cette perturbation apparaît en l'absence d'augmentation de la température locale (effet « athermique » des CEM).

#### 1. Rappels sur le stress oxydatif/nitrosatif

##### a. Qu'est-ce que le stress oxydatif ?

Voir la très riche publication de Sies et al. (70) que j'ai résumé dans ce paragraphe.

Le « stress oxydatif » consiste en une attaque par des radicaux libres d'une structure

moléculaire, faute de défenses antioxydantes suffisantes.

Un radical libre est une espèce chimique possédant un électron célibataire sur sa couche périphérique. Cela lui confère une instabilité : il n'aura de cesse de chercher un autre électron célibataire pour former une paire et va agir sur une autre structure chimique pour récupérer cet électron. Il existe plusieurs radicaux libres, notamment, l'anion superoxyde ( $O_2^{\cdot-}$ ) et le radical hydroxyl ( $OH^{\cdot}$ ). Un anion superoxyde peut réagir avec du monoxyde d'azote (également appelé oxyde nitrique ou NO) et former du peroxy-nitrite ( $ONOO^{\cdot}$ ), qui n'est pas un radical libre mais une espèce réactive de l'oxygène (ROS). On parle alors de stress nitrosatif. Le peroxy-nitrite ira à son tour interagir avec une autre molécule.

Il existe une formation « physiologique » de radicaux libres dans nos mitochondries lors de la production d'énergie à partir des métabolites de notre alimentation. Dans les replis dits « cristae » de la membrane interne de la mitochondrie, la cellule produit de l'adénosine triphosphate (ATP, monnaie d'échange énergétique cellulaire) en soumettant un substrat énergétique à une cascade de réactions d'oxydo-réduction dite « chaîne respiratoire ». Au bout de cette chaîne, les électrons ayant participé aux réactions d'oxydo-réduction sont récupérés par l'atome d'oxygène et se combinent à des protons pour former de l'eau. Environ 1% de l'oxygène consommé par cette chaîne est transformé en radicaux superoxydes  $O_2^{\cdot-}$ .

Une autre source de production de radicaux libres provient des NADPH oxydases (71).

Les NADPH Oxydases sont une famille d'enzymes de la membrane cellulaire qui convertissent l'oxygène en anion superoxyde. Ces enzymes interviennent, entre autres, dans la réponse immunitaire, la fonction endothéliale, la prolifération vasculaire, la réponse des kératinocytes aux UVA.

Physiologiquement, les radicaux libres et les espèces réactives de l'oxygène sont réduits via un système antioxydant :

- Enzymatique: superoxyde dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathion peroxydase (GPx) pour les trois principales,
- Non enzymatique: Glutathion réduit (GSH), coenzyme Q 10, acide alpha lipoïque, vitamines A, C, E, polyphénols, caroténoïdes, etc.

L'association de deux radicaux superoxydes via la superoxyde dismutase donne naissance à du peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ), une espèce réactive de l'oxygène importante en termes de signalisation cellulaire puisqu'elle module l'activation du NF- $\kappa$ B (nuclear factor kappa B). Le NF- $\kappa$ B est un facteur de transcription très important qui induit l'expression des gènes impliqués dans l'inflammation et la réponse immunitaire.

Le Nrf2 (Nuclear factor -E2-related factor 2) est lui aussi dépendant de l'équilibre rédox de la cellule. Le Nrf2 induit l'expression de gènes codant pour des enzymes antioxydantes et de détoxication. En cas de stress oxydatif, son activation est protectrice mais une suractivation peut être contreproductive avec un effet protecteur des cellules cancéreuses et une résistance à la chimiothérapie (72). Si le système rédox est en équilibre, on parlera d'« eustress » oxydatif nécessaire au bon fonctionnement cellulaire.

En cas d'agression de l'organisme par des toxiques chimiques (pesticides, métaux lourds, alcool, tabac, gaz d'échappement, nanoparticules...), ou par une exposition à des radiations ionisantes (rayons X...) et non ionisantes (photons du soleil), la cellule produit plus de radicaux libres. Elle peut se retrouver débordée du fait d'une insuffisance de défenses antioxydantes. Ce déséquilibre va générer des dommages moléculaires venant interférer avec le bon fonctionnement cellulaire.

S'il s'agit d'une structure lipidique (« peroxydation lipidique »), les phospholipides oxydés induisent une modification de la fluidité membranaire et une altération de l'activité des récepteurs. Les principaux déchets de cette peroxydation sont le malondialdéhyde (MDA) et les ThioBarbituric Acids Reactive Substance (TBARs). Ils peuvent former des adduits avec les protéines, soit des pontages intra ou intermoléculaires, ce qui rend la protéine en question non fonctionnelle (les adduits sont les produits d'une réaction

d'addition entre deux unités moléculaires distinctes).

S'il s'agit de protéines, il peut y avoir fragmentation de la protéine, formation de liaisons croisées entre les protéines ce qui aboutit à une perte ou modification de la fonction de cette protéine. A titre d'exemple, l'oxydation de l'acide aminé tyrosine donne de la nitrotyrosine (NTT).

Dans le cas des glucides, l'oxydation du glucose génère des céto-aldéhydes formant des complexes avec les protéines appelés en anglais Advanced Glycation End product (AGE) et qui sont toxiques pour les cellules.

Dans le cas de l'ADN, il peut y avoir oxydation de bases nucléotidiques, formation de site abasiques, et cassure de brin. La guanine est très sensible à l'oxydation et se transforme en déchet : 8-oxo-guanine, 8-nitro-guanine. Les déchets de peroxydation lipidique ou protéique forment aussi des adduits avec l'ADN.

#### b. Comment un excès de stress oxydatif participe à la genèse de maladies

En dénaturant notre ADN, un excès de stress oxydatif peut induire des mutations génétiques. Si les capacités de réparation de l'ADN sont saturées, ces mutations génétiques peuvent persister. On sait que les mutations de la molécule d'ADN nucléaire peuvent favoriser les cancers en permettant l'expression d'un proto-oncogène ou au contraire, en faisant taire un gène suppresseur de tumeur, un gène de réparation de l'ADN ou un gène de l'apoptose, chargé de donner l'ordre à une cellule cancéreuse de se suicider. C'est un mécanisme connu expliquant comment le tabac, l'alcool, les UV, certains virus et xénotoxiques sont à l'origine de cancers. L'activation des facteurs de transcription NF-kB et Nrf2 peut aussi participer aussi à la cancérogenèse (73).

En sus, certaines approches pathogénétiques du cancer évoquent l'importance de la mitochondrie, notre usine énergétique, qui serait alors dysfonctionnelle. Au même titre que l'ADN nucléaire, l'ADN mitochondrial,

composé de 37 gènes peut être endommagé par les radicaux libres (74).

Le stress oxydatif participe au développement d'une maladie neurodégénérative en dénaturant les membranes lipidiques des neurones, et certaines protéines clés du fonctionnement neuronal. Il peut induire une neuro-inflammation et la mort des neurones ou apoptose (75).

La dénaturation excessive de l'ADN de la tête des spermatozoïdes induit aussi leur entrée en apoptose via la voie des caspases. Le sperme contiendra alors moins de spermatozoïdes vivants, ce qui peut conduire à l'infertilité (47).

## 2. Etudes montrant que les CEM induisent un stress oxydatif (nitrosatif) cellulaire

Les données scientifiques actuelles sont suffisantes pour affirmer que les CEM artificiels BF et HF peuvent induire un stress oxydatif cellulaire sans augmentation de température locale.

**Toutes les revues de la littérature publiées sur le sujet dans les 5 dernières années tirent cette conclusion.** Les fréquences étudiées sont les plus couramment utilisées (50 Hz, 900 et 1800 MHz) et pour des durées d'exposition de quelques heures à plusieurs jours (45-47,76-79).

Concernant les CEM HF liés aux communications sans fil, j'explique brièvement la revue de Dasdag et al., qui reprend les études in vitro, in vivo, animales et humaines sur le sujet (79). La majorité d'entre elles met en évidence un stress oxydatif cellulaire avec des cassures de l'ADN :

- fragmentation de l'ADN d'échantillons de sperme humain, et de l'ADN de neurones ou de cellules gliales animales,
- augmentation des paramètres d'oxydation lipidique (MDA), diminution des taux de SOD et de GPx dans les érythrocytes de volontaires sains exposés à des CEM HF ou diminution du GSH chez les personnes exposées professionnellement aux CEM HF de radars.

Xu et al. et Sun et al. montrent que les CEM HF créent un stress oxydatif avec des dommages sur l'ADN mitochondrial (80,81).

La revue de Saliev et al. est très intéressante car elle liste toutes les études qui montrent un effet péjoratif des CEM sur la santé mais aussi celles qui montrent un effet thérapeutique des CEM (82).

Dans cette revue sont listées les études sur l'ADN et le stress oxydatif parues entre 1990 et 2018 : sur 10 études concernant les CEM BF (50 Hz pour 9 d'entre elles et 60 Hz pour une d'entre elle), 8 études montrent un effet génotoxique et/ou un excès de stress oxydatif sur les animaux ou les cellules humaines. Les auteurs discutent le fait que les effets biologiques dépendent du type de CEM (pulsé ou non) et du type de cellules (certaines pouvant être plus sensibles que d'autres). Sont aussi listées 21 études montrant un effet thérapeutique des CEM : prolifération cellulaire, formation d'os, cicatrisation. Ces effets thérapeutiques sont démontrés pour les basses fréquences et non pour les hautes fréquences (toujours inférieures à 150 Hz sauf une étude à 27 MHz).

Sur Pubmed, on trouve une revue publiée en 2016 plaidant pour la pertinence d'un traitement de la maladie d'Alzheimer via l'exposition du cerveau à des CEM HF par extrapolation d'études menées sur le cerveau de souris (83). Dans les études présentées dans cette revue, les souris génétiquement modifiées et porteuses d'un gène prédisposant à la maladie d'Alzheimer ont été exposées à des CEM pulsés de fréquence 900 MHz avec un SAR de moins de 1,6 W/kg à raison de deux périodes de 1 heure par jour pendant 1 à 9 mois. Les souris exposées présentent une augmentation significative de leur activité neuronale, du fonctionnement mitochondrial neuronal et la désagrégation des polymères amyloïdes Béta, le tout en l'absence d'augmentation de température.

L'augmentation du fonctionnement mitochondrial est mise sur le compte d'une modification du potentiel de membrane mitochondrial par le CEM permettant d'activer la chaîne respiratoire. L'auteur fait l'hypothèse que la désagrégation des polymères amyloïdes Béta est liée à la rupture des liaisons hydrogènes entre les monomères. Dans la discussion,

l'auteur cite l'étude INTERPHONE comme preuve de l'absence de lien entre les CEM HF et le risque de tumeurs cérébrales, ce qui garantirait la sécurité de ce type de traitement sur l'homme.

Dans les faits, le lien épidémiologique entre cancer du cerveau et tumeurs cérébrales est suffisamment consistant pour évoquer la prudence concernant l'exposition du cerveau à des CEM HF lors de protocoles thérapeutiques. Si les CEM peuvent casser les liaisons hydrogène entre les molécules pathologiques, ils le peuvent aussi sur des molécules saines, et notamment les liaisons hydrogène de notre ADN (voir chapitre suivant).

Les CEM de nos communications sans fil ou de notre réseau électrique ont donc bien des effets biologiques en dehors de toute augmentation de température. Les effets athermiques des CEM artificiels ne sont pas forcément péjoratifs : nous venons de voir que tout est une question de dose (intensité et durée d'exposition) et de fréquence de l'onde électromagnétique. Le caractère pulsé ou non du CEM est très important, car les CEM pulsés sont plus actifs/délétères sur le plan biologique. Le fait que certaines études utilisent un CEM simulé (souvent peu variable) quand d'autres études utilisent un CEM en condition réelle d'utilisation (variabilité importante) participe aussi à l'hétérogénéité des résultats (84).

Un petit niveau de stress oxydatif peut stimuler une cellule et l'inciter à se multiplier, ce qui peut produire des effets bénéfiques réparateurs. Cependant, des niveaux importants de stress oxydatif peuvent épuiser les défenses de la cellule et l'endommager, l'amenant à l'apoptose ou à la cancérisation. C'est la caractéristique « double tranchant » du stress oxydatif. Cette caractéristique pourrait aussi expliquer pourquoi les données sur les effets des CEM semblent parfois contradictoires.

### 3. Origine du stress oxydatif induit par les CEM

Les questions cruciales sont les suivantes : comment une onde électromagnétique de basse énergie (non ionisante) peut-

elle induire un stress oxydatif sans élévation de température ? Quelle structure moléculaire constitue la cible initiale de cette onde ?

a. Dérégulation des canaux calciques dépendants du voltage

**Dans sa revue de 2013, Martin L. Pall recense 23 études sur des cellules humaines ou animales montrant que les CEM BF (50 Hz et 60 Hz) et HF (700-1100 MHz) impactent les canaux calciques dépendants du voltage (VGCC), notamment les VGCC de type L (85).**

Cet effet sur les VGCC est aussi explicité dans la revue de Kim et al. concernant les CEM HF (76).

Un canal calcique est une structure protéique située dans la membrane des cellules et permettant le transport de l'ion calcium à travers cette membrane. Une partie des canaux calciques sont dits «dépendants du voltage», car leur ouverture se produit lorsque le potentiel de membrane atteint un certain seuil. Les canaux calciques dépendants du voltage sont très nombreux dans le myocarde, le système nerveux, le testicule.

L'activation des canaux calciques induit l'entrée de calcium dans la cellule. La concentration intracellulaire en calcium est un élément très important de l'homéostasie cellulaire et elle conditionne le relargage des neurotransmetteurs dans la synapse et donc le fonctionnement cérébral. L'entrée de calcium dans la cellule neuroendocrine induit le relargage d'hormones.

Dans certaines études recensées par Martin L. Pall, l'emploi d'inhibiteurs spécifiques des canaux calciques a bloqué les effets des CEM sur les structures moléculaires des cellules.

Par ailleurs dans la revue de 2015 de Martin L. Pall, cinq études montrent un effet des CEM sur la concentration de calcium intracellulaire, conséquence de cette dérégulation du VGCC (86).

Tekieh et al. ont publié une étude très importante étudiant le fonctionnement du canal calcique in vitro lors d'une exposition à des CEM HF de fréquence, d'intensité et d'orientation différentes. On y voit que le canal

calcique augmente sa conductance pour différents types de CEM : 900 MHz (à 7 V/m et 100 V/m), 2,1 GHz (1,1 V/m), 2,3 GHz (32 V/m) et 40 GHz (20 V/m). Bien qu'il s'agisse d'une étude in vitro et non in vivo, cette étude est très importante car elle est un argument solide en faveur de la sensibilité des canaux calciques aux CEM HF pour des niveaux d'intensité inférieurs aux valeurs limites d'exposition actuelles (87).

Selon Martin L. Pall, les CEM dérégulent les canaux calciques en agissant sur leur capteur de tension (88). En effet, ce capteur a une conformation particulière : il est composé de 4 hélices contenant chacune 5 charges positives. Ce capteur pourrait amplifier plusieurs millions de fois les forces qui s'y exercent, ce qui le rendrait hypersensible à une modification de CEM ambiant, y compris de faible intensité. D'autres canaux ioniques dépendants du voltage pourraient aussi être impactés par les CEM mais ils ont été moins étudiés.

La dérégulation des VGCC peut induire une augmentation de calcium intracellulaire quasi immédiate.

Or, la concentration de calcium intracellulaire est un élément très important dans la formation des ROS cellulaires via la mitochondrie et la famille des NADPH oxydases (71).

Une suractivation des NADPH oxydases via une concentration de calcium intracellulaire aberrante peut induire un excès de stress oxydatif. Dans une publication de 2007, Friedman et al. avaient soumis des cellules de rats à un champ de 875 MHz de 0,07 mW/cm<sup>2</sup> et montraient que l'activité de la NADPH oxydase était augmentée suite à cette exposition (89). Ils en concluaient que cette enzyme membranaire était la cible première des CEM HF, ce qui créait une surproduction de radicaux libres.

En pratique, à ce jour, on pourrait dire que ce n'est pas la NADPH oxydase qui est la cible première des CEM mais que la perturbation des VGCC et l'augmentation de calcium qui en découle, induit l'activation de la NADPH oxydase.

Par ailleurs, l'augmentation du calcium intracellulaire stimule les enzymes synthétisant de l'oxyde nitrique (NO) comme l'oxyde nitrique synthase.

Pilla et al. ont montré que des neurones et fibroblastes humains exposés à un CEM HF pulsé de 27,12 MHz à une intensité moyenne de 41 V/m augmentent en moins de 5 secondes leur concentration de NO par une voie dépendante de la concentration en calcium (oxyde nitrique synthases dépendantes du calcium ou de la calmoduline) (90).

Dans sa revue de 2013 (85), Martin L Pall explique que :

- Le NO, en réagissant avec un anion superoxyde peut former du peroxyde de nitrite, un oxydant biologique puissant et attaquer d'autres structures cellulaires s'il n'est pas suffisamment contrôlé par les défenses antioxydantes. Cela crée un excès de stress oxydatif et une inflammation via le NF kappa B,
- Le NO peut se lier aux cytochromes et inhiber leur activité, notamment le P 450 qui abaisse la synthèse des hormones stéroïdes (oestrogènes, progestérone et testostérone) et l'activité de la vitamine D, qui a une action immunorégulatrice et anti-cancer (91),
- Le NO peut activer la guanylate cyclase soluble, entraînant une augmentation de la concentration du GMP cyclique (cGMP sur le schéma ci-dessous). Le cGMP active une protéine kinase G, enzyme de signalisation cellulaire. Cette voie du cGMP peut moduler le flux sanguin cardiaque et périphérique, le relargage de cytokines pro-inflammatoires (Interleukine-1 B) et des facteurs de croissance des fibroblastes ou de cellules endothéliales (FGF-2, VEGF). Ceci explique comment certaines expositions aux CEM peuvent

agir de façon thérapeutique, par exemple par activation des ostéoblastes, responsables de la croissance osseuse. La protéine kinase G module aussi le Nrf2 (Nuclear factor erythroid 2-related factor2) dont nous avons vu plus haut qu'il intervient dans la défense antioxydante et a un rôle anti-inflammatoire mais qu'en cas de suractivation, il peut aussi avoir un effet protecteur sur les cellules cancéreuses.

Via leur action sur le VGCC, on voit ainsi comment les CEM pourraient agir sur la signalisation cellulaire, et donc, modifier l'épigénétique, c'est-à-dire la façon dont la cellule choisit de lire ou non telle partie de son ADN pour produire telle protéine responsable de telle fonction cellulaire.

**L'implication physiopathologique des VGCC pourrait aussi expliquer pourquoi les CEM variables/pulsés ont des effets biologiques plus importants que les CEM continus.** En effet, si pour maintenir une concentration de calcium stable, la cellule peut adapter son canal calcique dépendant du voltage à un changement lent, faible ou peu fréquent de CEM ambiant, on peut imaginer qu'il lui soit plus difficile de s'adapter à des changements de CEM ambiant, intempestifs et répétés comme ceux générés par nos appareils de télécommunications sans fil. Le champ électromagnétique naturel de notre environnement terrestre ne varie pas de cette façon. Ses faibles et rares variations, en lien avec l'activité solaire, sont d'ailleurs corrélées à une augmentation d'événements pathologiques humains et animaux (84).



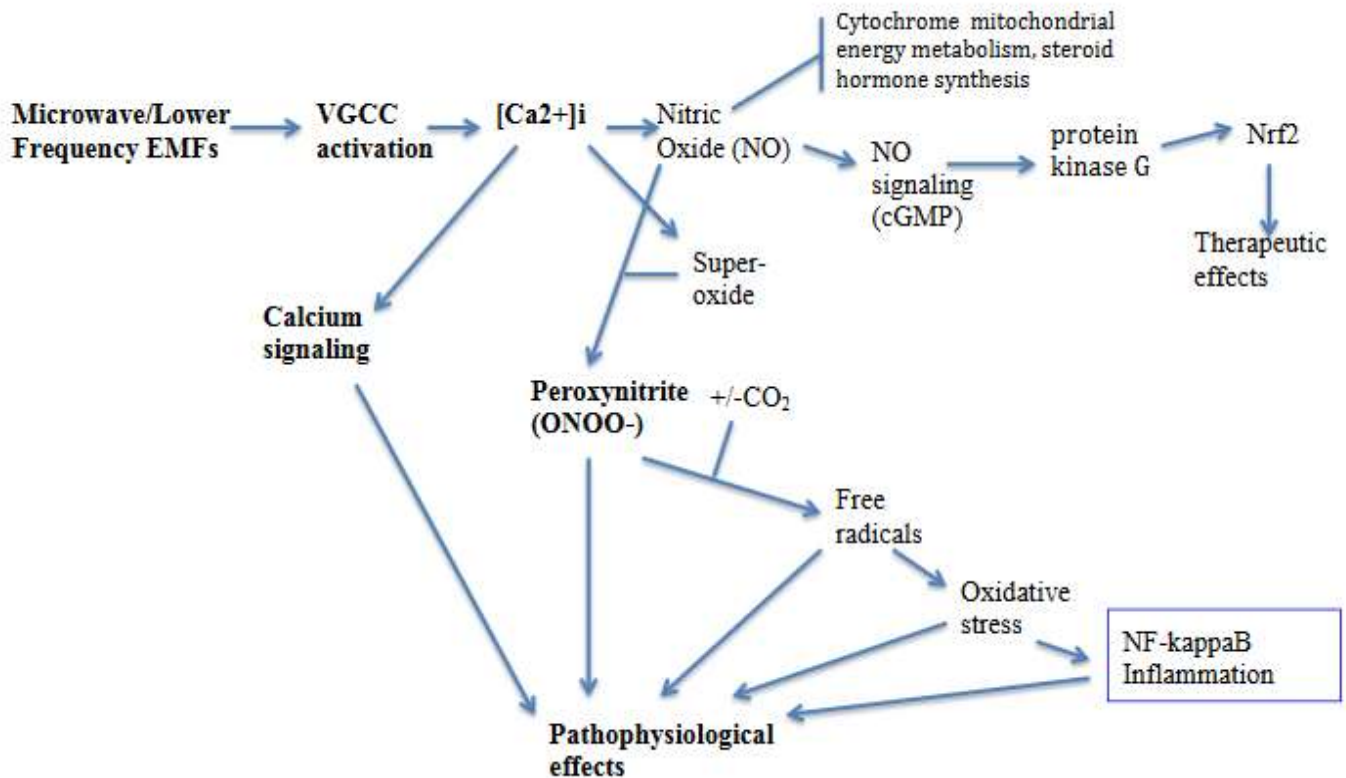


Figure 3. « Comment les CEM agissent via l'activation du VGCC pour produire des effets variés ». Schéma synthétique de Martin L Pall (88)

## b. Dysfonctionnement mitochondrial

Dans leur revue sur l'infertilité, Santini et al. évoquent l'atteinte de la mitochondrie comme cause et conséquence du stress oxydatif généré par un « stress électromagnétique » (47). Les auteurs recensent les études montrant que les CEM HF et BF créent un stress oxydatif susceptible d'induire la cascade de signalisation Bcl-2, Bax, caspase 3 qui provoque l'apoptose du spermatozoïde. Ils recensent plusieurs études montrant que **les espèces réactives de l'oxygène (ROS) induites par les CEM proviennent des mitochondries du spermatozoïde.**

La membrane de la mitochondrie contient des canaux ioniques qui régulent son potentiel électrique. Ce potentiel de membrane est un élément crucial du fonctionnement de la chaîne respiratoire. Une concentration intracellulaire excessive de calcium peut modifier le potentiel de membrane, perturber la chaîne

respiratoire mitochondriale et déclencher une surproduction de ROS (71).

Par cette voie calcium dépendante, la perturbation des VGCC pourrait induire un dysfonctionnement mitochondrial. Une fois l'ADN de la mitochondrie endommagé par un excès de ROS, la dysfonction mitochondriale s'aggrave et la mitochondrie peut entrer dans un véritable cercle vicieux de stress oxydatif.

L'effet des CEM sur le potentiel de membrane de la mitochondrie a été évoqué dans les études d'Arendash et al. sur les neurones (83) et dans une étude très récente de Tsoy et al. après une exposition d'astrocytes de rats à un CEM HF pulsé de 918 MHz avec un SAR moyen de 0,20 W/kg pendant 10 minutes (92).

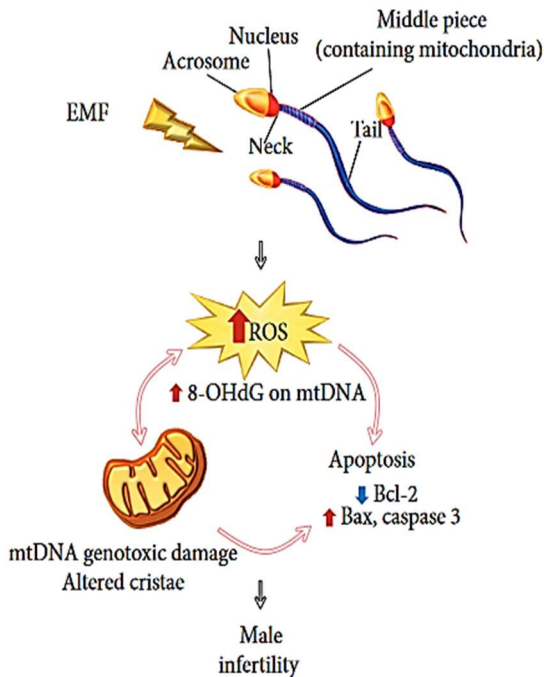


Figure 4. Croquis extrait de la revue de Santini et al. : « Implication du stress oxydatif et de la dysfonction mitochondriale après exposition du système reproducteur masculin à des CEM ».

Légende : EMF : champs électromagnétiques ; ROS : espèces réactives de l'oxygène ; 8-OHdG : 8-hydroxy-2'-désoxyguanosine (marqueur de stress oxydatif) ; mtDNA : ADN mitochondrial ; Bcl-2 : régulateur d'apoptose ; Bcl-2 ; Bax : protéine Bcl-2-associated X (47)

**Pour résumer, les ondes électromagnétiques de basse énergie générées par nos appareils domestiques pourraient agir sur la cellule par ouverture intempestive des VGCC de la membrane cellulaire et dysfonction mitochondriale.** Ceci pourrait induire la perturbation de l'équilibre cellulaire en calcium et en ROS et donc jouer un rôle dans de nombreuses pathologies (infertilité, maladies neurodégénératives, maladies inflammatoires, maladies cardiovasculaires, cancer, diabète) (71).

#### c. Impact des CEM sur la liaison hydrogène de l'ADN

Nous avons vu qu'un excès de stress oxydatif peut induire une dénaturation de l'ADN, les radicaux libres pouvant oxyder des bases ou casser des brins d'ADN. Certains auteurs évoquent le fait que l'ADN pourrait aussi être directement impacté par les CEM par

perturbation du déplacement des électrons sur la molécule d'ADN et rupture des liaisons hydrogènes, le tout indépendamment d'un excès de stress oxydatif et pour de faibles niveaux de CEM ambiant (93). Si l'énergie des CEM artificiels n'est pas suffisante pour casser une liaison covalente, elle serait suffisante pour perturber la liaison hydrogène qui est de plus faible énergie, avec une altération de l'intégrité de l'ADN et de sa géométrie spatiale. Cette hypothèse est avancée comme étant valable dans les revues d'Arendash et de Saliiev et al. (82,83)

#### 4. Effets neuropsychiques de la dérégulation des VGCC

Dans la revue de Narayanan et al., les auteurs considèrent qu'il est vraisemblable que la perturbation des neurotransmetteurs engendrée par les CEM participe à l'induction des troubles comportementaux observés chez les rats exposés à des CEM HF : apprentissage, mémoire, anxiété (57).

Le relargage des neurotransmetteurs au sein de la synapse est très finement régulé par les concentrations de calcium intracellulaire (94). La dérégulation des VGCC liée aux CEM pourrait donc induire un déséquilibre des neurotransmetteurs du cerveau (dopamine, noradrénaline, sérotonine, mélatonine...) à l'origine de troubles neuropsychiques.

La revue de 2016 de Martin L. Pall consacrée aux risques des CEM HF sur la santé mentale évoque l'impact d'une modification génétique du VGCC type L (56). Il y décrit sept études parues entre 2010 et 2014 sur le polymorphisme génétique de l'allèle du gène CACNA1C. Ce polymorphisme produit une surexpression du VGCC type L et il est associé à un surrisque de troubles bipolaires, dépressions, schizophrénie, troubles du spectre autistique. L'activation artificielle des VGCC via les CEM pourrait avoir le même effet que la surexpression du VGCC type L liée au polymorphisme et expliquerait certains symptômes psychiques du syndrome des microondes : anxiété, stress, dépression.

Dans la revue de Kim et al., les auteurs évoquent que la dérégulation des VGCC par les CEM HF pourrait favoriser les troubles à type d'hyperactivité chez les enfants (76).

De fait, plusieurs études montrent que les CEM induisent des modifications des neurotransmetteurs.

Concernant la mélatonine, les résultats des études sont une fois de plus sujets à controverse du fait de l'hétérogénéité des expositions et de la possibilité de facteurs de confusion non contrôlés. La revue de 2014 de Lewczuk et al. recense toutes les études animales et humaines sur la sécrétion de mélatonine dans le cadre d'une exposition aux CEM (95).

Les auteurs concluent qu'en dépit des divergences entre les études, les CEM artificiels HF et BF peuvent avoir un impact péjoratif sur la sécrétion de mélatonine en lien avec des perturbations du sommeil. Soit les CEM perturbent la sécrétion de mélatonine dans la glande pinéale, soit ils induisent sa surconsommation car la mélatonine est un antioxydant (96), soit ces deux mécanismes coexistent.

Dans la deuxième revue sur le sujet (97), les auteurs sont moins formels : ils concluent à la possibilité d'un effet des CEM HF et BF sur la sécrétion de mélatonine mais à la nécessité d'études supplémentaires sur le sujet, compte-tenu des résultats contradictoires. Cette revue est moins complète que la précédente car elle ne tient pas compte des études sur les animaux qui sont plus nombreuses que celles consacrées aux humains.

Je n'ai pas trouvé de revue dédiée aux autres neurotransmetteurs mais toutes les études que j'ai trouvées via Pubmed montrent une modification des taux de dopamine, de noradrénaline, de sérotonine et/ou de neurotransmetteurs aminoacides (acide gamma aminobutyrique (GABA), glycine...) chez des rats exposés à des CEM HF de la fréquence des téléphones portables (900 et 1800 MHz) ou à des CEM BF (10 et 50 Hz). Certains auteurs concluent à un impact des CEM étudiés sur les fonctions cérébrales : mémoire, apprentissage et stress (98-104).

**La dérégulation des VGCC induite par les CEM pourrait donc impacter directement notre fonctionnement cérébral via la**

**perturbation du relargage des neurotransmetteurs sans passer par un stress oxydatif. Comme cela a été exposé par Martin L. Pall, le syndrome des micro-ondes aurait donc deux portes d'entrée : une dérégulation directe des neurotransmetteurs par perturbation des VGCC et une dérégulation indirecte via le stress oxydatif et la neuro-inflammation qui peut en découler.**

## 5. Impact des CEM sur la barrière hémato-encéphalique

La barrière hémato-encéphalique (BHE) est un filtre entre la circulation générale et le système nerveux central garantissant l'intégrité de nos neurones : elle évite que nos neurones ne soient mis en contact avec certaines molécules toxiques circulant dans notre sang (métaux lourds, pesticides et autres xénobiotiques).

Si les études sont contradictoires, plusieurs études sur les animaux montrent un effet des CEM sur la perméabilité de la BHE. Les études concernent majoritairement les CEM HF. Elles sont recensées dans la revue de Stam et al. (105). L'auteur explique que les résultats contradictoires des études sont liés à la grande hétérogénéité des EMF étudiés (intensité, fréquence, durée d'exposition) et à l'hétérogénéité des méthodes d'évaluation de la perméabilité de la BHE. Cette revue date de 2010 et d'autres études ont été réalisées depuis.

Dans sa revue de 2016 sur les troubles liés aux CEM, l'EUROPAEM conclut que l'ensemble des preuves penche en faveur d'un effet des CEM sur la perméabilité de la BHE dans certaines conditions d'exposition (58). L'académie américaine de médecine environnementale (AAEM) considère que cet effet des CEM HF sur la BHE est bien documenté (106). La concentration de calcium intracellulaire est un élément clé de la perméabilité de la BHE. La perméabilité de la BHE peut être perturbée par des flux inappropriés de calcium (107).

L'ouverture de la BHE dans certaines conditions d'exposition aux CEM pourrait donc s'expliquer par leur capacité à perturber les VGCC et donc à induire des modifications de

la concentration intracellulaire de calcium. De plus, un excès de stress oxydatif peut induire une neuro-inflammation avec ouverture de la BHE (108).

Si les capacités de compensation de l'organisme exposé sont dépassées, les CEM pourraient donc augmenter la perméabilité de la BHE par un mécanisme direct sur le VGCC

et/ou par un mécanisme indirect de stress oxydatif et de neuro-inflammation.

Cela pourrait-il signifier que dans certaines conditions d'exposition, les CEM artificiels potentialisent la neurotoxicité de substances telles que les pesticides ou les métaux lourds en facilitant leur passage à travers la BHE ?

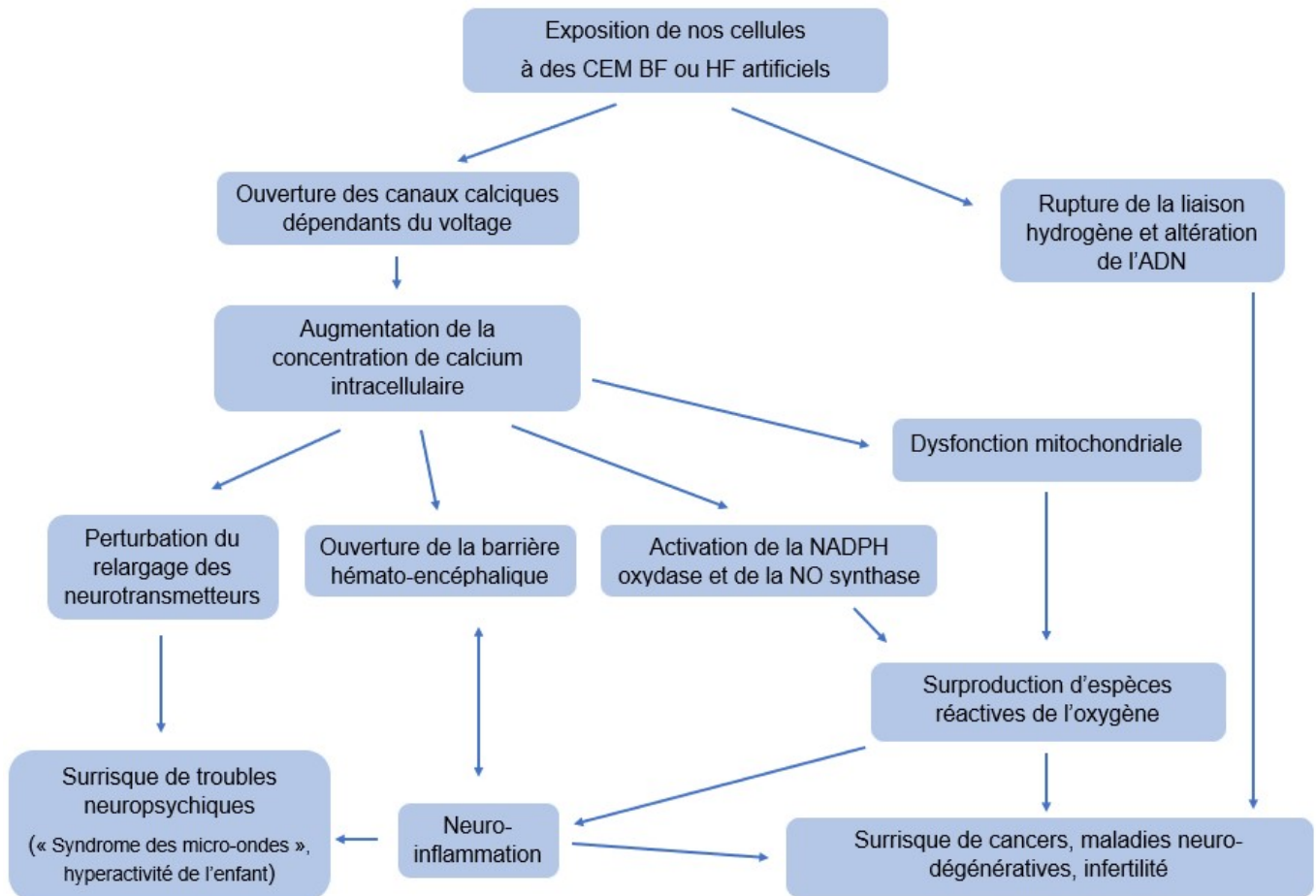


Figure 5. Synthèse des mécanismes physiopathologiques possibles liés aux CEM artificiels

## IV. DISCUSSION

### 1. De la nocivité des CEM, de l'obsolescence de la norme et de l'utilité d'une hygiène électromagnétique

#### a. L'impact des CEM artificiels sur notre santé est réel et sous-estimé

La conclusion de la revue de la littérature de haut niveau de preuve que je viens de présenter est qu'il existe un lien statistique consistant entre une exposition aux CEM artificiels et un surrisque de leucémie, tumeur

cérébrale, maladie d'Alzheimer, sclérose latérale amyotrophique et d'infertilité masculine, le tout avec un effet dose-réponse et une temporalité.

Il est facile d'alimenter la controverse sur le sujet, en avançant des études de mauvaise qualité, ou de vieilles études ne respectant pas les temps de latence nécessaires à l'apparition de la maladie ; le tout par manque de culture épidémiologique et par manque de vision globale des données. En alimentant le doute, on participe à l'ignorance des professionnels de santé au détriment de leurs patients.

Le principal mécanisme physiopathologique du stress électromagnétique identifié à l'heure actuelle est un excès de stress oxydatif, via la perturbation des canaux calciques dépendants du voltage et la perturbation de la chaîne respiratoire mitochondriale.

Ce mécanisme est un argument de plausibilité biologique qui vient renforcer le lien statistique retrouvé dans les études épidémiologiques. Les personnes réfutant l'évidence de la nocivité des CEM évoquent l'absence de mécanisme physiopathologique démontré pour expliquer cette nocivité : cet argument n'est pas en accord avec l'actualité scientifique que je viens d'exposer.

Indépendamment d'une potentielle « électrosensibilité », les CEM artificiels générés par le réseau domestique et les télécommunications sans fil ont donc un effet biologique sur notre organisme, et ce, pour des niveaux d'exposition inférieurs aux seuils réglementaires en vigueur. Il s'agit d'effets athermiques, c'est-à-dire, se produisant en dehors de toute élévation de température dans les tissus.

Le corps présente des mécanismes de contre-régulation du stress oxydatif jusqu'à un certain point. Selon notre niveau d'exposition et notre susceptibilité individuelle (épaisseur de notre crâne, présence d'autres facteurs environnementaux de stress oxydatif, capacité de défense antioxydante), nous sommes tous susceptibles de développer, un jour, une maladie liée à notre exposition aux « ondes ».

Sans parler de maladie, peut-être, sommes-nous déjà nombreux à présenter des symptômes d'un syndrome des micro-ondes à minima : fatigue chronique, troubles du sommeil, dépression, maux de tête, douleurs musculaires etc...mais il est actuellement impossible de quantifier la part attribuable des CEM à ce type de symptômes car d'autres facteurs environnementaux et psycho-sociaux peuvent aussi favoriser ces symptômes. Comme déjà évoqué dans le chapitre dédié aux troubles neuropsychiques, l'EUROPAEM fait un lien entre l'augmentation de notre exposition aux CEM artificiels et l'augmentation majeure de l'incidence des troubles neuropsychiques dont le « Burn out ».

De plus, il n'est pas impossible que les CEM potentialisent la neurotoxicité de certains xénobiotiques en favorisant directement leur pénétration dans le cerveau via l'ouverture calcium-médiée de la barrière hémato-encéphalique. Comparativement à d'autres facteurs environnementaux, les CEM ont cela de particulier que le corps n'a pas prévu de barrière contre leur passage et qu'ils peuvent donc impacter toutes nos cellules.

**En 2020, le débat ne devrait donc plus porter sur la réalité de la nocivité des CEM artificiels sur le corps humain mais sur les mesures de santé publique à proposer pour diminuer l'exposition de la population aux CEM HF et BF. Sans parler de pathologies comme le cancer ou les maladies neurodégénératives, le risque d'altération de la qualité de vie de chacun d'entre nous, du fait de symptômes neuropsychiques induits par les CEM, devrait à lui seul susciter notre vigilance.**

#### b. Les normes d'exposition en vigueur sont obsolètes

Actuellement, les données exposées dans ce document ne permettent pas de savoir à partir de combien de minutes d'exposition quotidienne au téléphone portable ou au Wifi, nous endommageons ou non nos neurones, ni combien de neurones, ni si ces dommages sont réversibles ou non. Elles nous autorisent, néanmoins à remettre en question les seuils réglementaires en vigueur, qui ne prennent pas en compte les effets athermiques des CEM.

Les normes d'exposition actuellement en vigueur sont obsolètes : elles n'ont pas été révisées depuis les recommandations émises par l'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) en 1998, il y a donc 20 ans, et ce en dépit de l'abondante littérature scientifique produite sur le sujet depuis.

Martin L. Pall est un professeur émérite de biochimie expert du sujet, et dont je viens de présenter les publications. Il a réalisé un argumentaire scientifique sur le principe de précaution devant s'appliquer à la 5 G, compte-tenu des données sur les effets biologiques

des CEM artificiels actuels. Cet argumentaire a été publié sur le site de l'EUROPAEM (88). Martin L. Pall y explique de façon très bien documentée que les 77 études indépendantes les plus valables concernant les effets des CEM sur la santé ne sont pas citées dans les rapports de l'ICNIRP ni du SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks).

Les études montrent un surrisque notable de leucémie infantile pour des expositions chroniques résidentielles à 0,4  $\mu\text{T}$  mais la valeur limite d'exposition du public réglementaire est de 100  $\mu\text{T}$  (6).

**Le Parlement Européen, dans sa résolution 1815 de mai 2011 (109) recommande de revoir les normes d'exposition collective aux CEM BF et HF. Plus récemment, l'Anses a émis cette recommandation pour les CEM BF dans son rapport d'avril 2019 (14).**

L'Autriche a fixé des valeurs limites d'exposition aux CEM HF à 0,6 V/m, comme recommandé par le parlement européen en 2011. Mais la France admet toujours des valeurs limites jusqu'à 100 fois plus élevées, à savoir 60 V/m (7).

Le DAS ou SAR est calculé sur des échantillons de sérum physiologique et ne prend pas en compte la complexité moléculaire des tissus humains ni les effets athermiques des CEM sur le vivant. Le SAR n'est établi que pour des durées d'exposition de 6 minutes. Il ne tient pas compte des expositions prolongées auxquelles nous sommes soumis quotidiennement. C'est un outil réducteur et inadéquat comme l'expliquent très bien Panagopoulos et al. dans une publication de 2013 (110).

De plus, l'Anses a réalisé des mesures de DAS en condition réelle et montre que le fait de porter certains téléphones portables proche du corps expose à des DAS troncs supérieurs à 2 W/kg. Donc, non seulement les seuils d'exposition ne sont pas protecteurs, mais en plus, ils sont régulièrement dépassés en conditions d'exposition réelle (111).

**Les normes d'exposition aux CEM ne tiennent pas compte non plus de**

## **l'interaction des différentes pollutions électromagnétiques entre elles.**

Nous vivons actuellement dans un « electrosmog » sans précédent : Wifi + antennes relais + téléphonie portable + téléphone DECT + bluetooth + CPL... toujours plus d'ondes artificielles et plus d'énergie pour ces ondes avec une montée en fréquence pour le sans fil : de 900 MHz à 2 GHz, bientôt 3,5 et 26 GHz pour la 5G et déjà 5 GHz dans certaines box Wifi...sachant que l'effet biologique d'un CEM n'est pas réductible à son intensité mais qu'il faut prendre en compte tous ses paramètres pour apprécier son impact biologique (fréquence, caractère pulsé). Quid de la vie en immeuble quand les box internet de chaque résident émettent en permanence et jusqu'à une distance de 30 m du modem ? Quid de la vie dans un « smartbuilding » ? On peut émettre l'hypothèse d'un risque d'effet cocktail délétère, à l'instar de l'effet cocktail des pesticides dans l'alimentation. Nous n'avons pas d'études sur l'exposition à ces cocktails d'ondes.

**Concernant la 5G et les compteurs communicants, nous pouvons aussi déplorer l'absence totale d'études d'innocuité en condition réelle.** En effet, les études recensées dans ce document concernent majoritairement les fréquences 900 MHz, 1800 MHz et 2,4 GHz mais nous n'avons pas ou peu d'études sur les fréquences 3,5 GHz et 26 GHz qui seront utilisées pour la 5G. L'Anses a évoqué le manque de données sur la 5G (4) et la revue de Di Ciaula est sans appel : vu l'importance de données scientifiques en faveur d'une nocivité des CEM HF, le principe de précaution devrait être invoqué pour la 5G (112). La multiplication des objets connectés en 4 ou en 5 G va encore augmenter notre exposition aux ondes. D'un point de vue technologique, ce sont des projets séduisants mais ils constituent une menace potentielle pour la santé publique.

Les compteurs communicants, comme le Linky, émettent des CEM HF pulsés de 30 à 90 kHz sur tout le réseau électrique de la maison superposés au courant alternatif 50 Hz. C'est le principe du CPL. On parle alors de High Frequency Voltage Transients ou d'« électricité sale ». J'ai recensé les

publications existantes concernant l'électricité sale et les compteurs communicants dans un document annexe. Il y a peu de publications mais toutes montrent un impact sanitaire potentiel. Comme je le discute dans ce document annexe, le principe de précaution aurait commandé de réaliser des études préalables avant l'installation de ces compteurs car ils pourraient constituer une source de pollution électromagnétique non négligeable.

L'académie américaine de médecine environnementale (AAEM) réclame, concernant l'exposition aux CEM et aux compteurs communicants (106) :

« Une mise en garde immédiate concernant l'installation de compteurs communicants du fait d'une exposition potentiellement nocive aux radiofréquences. Une prise en considération adéquate des enjeux sanitaires en lien avec l'exposition aux CEM, y compris l'exposition à la technologie sans fil des compteurs communicants (...) La compréhension et le contrôle de ce bombardement électrique environnemental pour la protection de la société. La reconnaissance et la recherche indépendante concernant les effets quantiques des CEM sur la santé humaine. L'utilisation, y compris pour les compteurs communicants, de technologies plus sûres comme les réseaux câblés, la fibre optique et d'autres méthodes non nocives de transmission de données ».

**En 2015, 220 scientifiques de 42 pays différents ont lancé un appel international à l'attention de l'Organisation Mondiale de la Santé et des Nations Unies, demandant la révision des valeurs limites d'exposition du public aux CEM ainsi que l'information du public et la formation des professionnels de santé sur les risques inhérents aux CEM.** A ce jour, ils sont plus de 250 et leur appel n'a pas été pris en compte. Ils déclarent : « A notre avis, les conséquences sanitaires d'une exposition chronique et involontaire de la population aux sources de CEM non ionisants sont ignorés par les organisations de santé internationales et nationales, en dépit de nos demandes répétées et de celles de plusieurs autres scientifiques, médecins et avocats. Cela constitue clairement une violation des droits de l'Homme, tels qu'ils sont définis par les Nations Unies » (113).

### c. Les médecins pourraient prendre en compte ces réalités dans leur exercice

En attendant une politique de santé publique en adéquation avec les connaissances scientifiques actuelles, il me semble que le corps médical doit s'emparer du sujet. C'est une question d'éthique professionnelle, aux vues des données « evidence based medicine » présentées dans ce document.

L'académie américaine de médecine environnementale a d'ailleurs demandé aux médecins de considérer l'exposition aux CEM dans leur diagnostic et de reconnaître que ces expositions aux CEM « peuvent être une cause sous-jacente du processus de maladie des patients » (114).

Dans le domaine des « ondes », il n'y a pas encore de recommandations de la part de nos autorités sanitaires envers notre corps professionnel. Elles ne seront émises que sur décision politique. Compte-tenu des enjeux économiques et sociétaux, et malgré la gravité du sujet, il est impossible de savoir à quel horizon nos autorités vont émettre ces recommandations.

Pour synthétiser les données scientifiques concernant les pollutions électromagnétiques, il faut pouvoir se situer au carrefour des sciences épidémiologiques, biochimiques, électriques et électroniques. De plus, la notion de stress oxydatif nécessaire à la compréhension des mécanismes physiopathologiques des CEM est peu développée au cours de nos études de médecine.

C'est pour toutes ces raisons que j'ai pris le temps d'écrire cette revue de la littérature et que j'ai souhaité la diffuser : afin de nous permettre de comprendre tout ce qui se joue autour « des ondes » et afin que nous commencions d'ores et déjà à intégrer les CEM comme source environnementale de stress oxydatif, facteur de risque de maladie et d'altération de la qualité de vie. Comme pour le tabac ou l'alcool, deux sources de stress oxydatif, il n'est pas possible de définir de seuil d'exposition « sans risque » absolu.

**Il me semble donc que nous devrions d'ores et déjà chercher à sensibiliser nos**

**patients à modérer leur exposition quotidienne aux CEM artificiels, c'est-à-dire respecter une certaine « hygiène électromagnétique ». Attendre des recommandations officielles de la part de nos instances sanitaires pourrait constituer une forme de « perte de chance » pour certains patients. J'espère que la diffusion de ce document au sein de la communauté médicale participera à la volonté de créer des recommandations officielles de la part de nos instances sanitaires.**

## 2. Comment intégrer la nocivité potentielle des CEM dans notre exercice ?

J'invite mes confrères à réfléchir à la façon dont ils pourraient intégrer les données exposées dans ce document à leur exercice.

L'hygiène électromagnétique tout venant paraît actuellement difficilement réalisable car nous avons peu de temps en consultation. Il me semblerait intéressant de chercher à repérer les patients pour qui une réduction de leur exposition aux CEM pourrait être particulièrement bénéfique.

### a. Quels patients pourraient être ciblés ?

Compte-tenu des données de la littérature, il pourrait être intéressant de faire un état des lieux rapide de l'exposition « aux ondes » des patients suivants dans la perspective de les sensibiliser à l'intérêt d'une hygiène électromagnétique :

- Patients présentant un cancer du sein, du cerveau et les enfants porteurs d'une leucémie : si leur exposition à des CEM BF et/ou HF est importante, une réduction de leur exposition pourrait être bénéfique, en termes de pronostic,
- Patient présentant une maladie neurologique dégénérative : ils pourraient être informés qu'une exposition excessive à des CEM HF et BF potentialisent la dégénérescence de leurs neurones via un stress oxydatif et une neuro-inflammation accrue,
- Patients ayant un projet de grossesse ou présentant des difficultés à concevoir, ils

pourraient être informés qu'une exposition aux CEM notamment HF peut diminuer leur fertilité,

- Patients présentant des symptômes non spécifiques tels qu'insomnies, céphalées, troubles de mémoire, fatigue chronique, syndrome anxiodépressif, acouphènes, burn-out, l'hygiène électromagnétique pourrait les aider, d'autant que nous sommes parfois démunis à leur égard,
- Patientes enceintes, il semble intéressant de limiter leur exposition aux « ondes » afin de protéger leur enfant à naître,
- Enfants présentant une hyperactivité, l'hygiène électromagnétique pourrait être très bénéfique,
- Il pourrait aussi être intéressant de promouvoir l'hygiène électromagnétique auprès des patients qui présentent une fibromyalgie ou un syndrome des jambes sans repos... de mon point de vue, il est possible que ces pathologies aient aussi un lien avec les pollutions électromagnétiques, compte-tenu de leur effet sur les neurotransmetteurs.

Il est possible d'appréhender l'environnement électromagnétique de la personne avec des questions simples :

- Combien de temps par jour utilisez-vous des appareils électroniques sans fil (tablette, ordinateur, téléphone portable, DECT...)?
- Dormez-vous à proximité d'un radiateur électrique ? De votre box Wifi ? De votre téléphone portable ? Si vous utilisez votre téléphone comme réveil, le mettez-vous en mode avion la nuit ? Le laissez-vous en charge près de vous ?
- Vivez-vous/ travaillez-vous à côté d'une ligne haute tension ? A quelle distance ? A côté d'une antenne-relais ? A quelle distance ?

Si on pense qu'une exposition aux CEM peut jouer un rôle dans la symptomatologie, alors, une diminution de l'exposition (quand elle est possible) pourrait être pertinente à titre de test thérapeutique, notamment dans le cas de troubles neuropsychiques. L'importance de l'amélioration du patient pourrait alors permettre d'évaluer dans quelle mesure



les CEM jouaient ou non un rôle important dans la symptomatologie.

**Les enfants sont une population particulièrement sensible aux ondes électromagnétiques car ils les absorbent d'avantage** du fait de leur petite taille et de la plus fine épaisseur des os de leur crâne. Leur jeune tissu cérébral est également qualitativement plus absorbant (115). Pour les enfants ne présentant aucune pathologie, les consultations de suivi pourraient être l'occasion de faire de la prévention, d'autant qu'ils passent de plus en plus de temps devant les écrans et que ces écrans sont très souvent connectés à des réseaux sans fil.

Les adolescents sont une population très exposée aux CEM du fait d'une fréquente utilisation d'un smartphone pour être « connecté » via les réseaux sociaux. De plus, on les voit très souvent porter leur téléphone directement contre leur corps (souvent dans la poche arrière du jean). Ils pourraient bénéficier d'un discours de prévention sur « les ondes » quand l'occasion se présente.

Il existe aussi des études montrant que les CEM pourraient jouer un rôle dans les maladies cardiovasculaires, le diabète, l'épilepsie, la sclérose en plaques, l'autisme, les malformations néonatales. Je n'ai pas analysé ces données d'un point de vue épidémiologique mais le mécanisme physiopathologique des CEM suffit à rendre ces hypothèses plausibles. Dès lors que les CEM peuvent affecter notre cerveau et nos neurotransmetteurs, ils peuvent aussi affecter nos hormones via la perturbation des cellules neuroendocrines (116). Ils peuvent aussi affecter notre système immunitaire via la calcineurine qui dépend du calcium et pourrait être inhibée par un excès de stress oxydatif (117).

Comme le cerveau, le cœur est un organe bioélectrique par excellence, très riche en VGCC. Il est donc susceptible, lui aussi, d'être impacté par les CEM, ce d'autant que les hommes portent souvent leur portable dans la poche de leur veston, et donc à proximité du cœur. Le lien avec les malformations néonatales pourrait s'expliquer par l'effet génotoxique des CEM sur les cellules germinales ou l'embryon. J'invite mes confrères à étudier les données existantes. Ces sujets pourraient

d'ailleurs faire l'objet de thèses de doctorat en médecine.

De fait, l'AAEM a émis des recommandations conseillant, entre autres, l'hygiène électromagnétique chez les patients présentant des dysautonomies, des maladies cardiaques notamment de l'arythmie, des douleurs musculosquelettiques, des mutations génétiques en lien avec des cancers... (114).

L'EUROPAEM conseille aussi de tenir compte de l'exposition aux CEM pour les patients diabétiques (58).

Il existe des normes d'exposition professionnelle aux CEM. Quid des bâtiments professionnels construits sous des lignes haute tension ? Quid du Wifi dans les entreprises ? J'invite les médecins du travail à s'emparer du sujet. J'invite aussi les médecins scolaires à s'intéresser à l'hygiène électromagnétique individuelle et collective dans les écoles.

Concernant les patients dits « électrosensibles », l'EUROPAEM recommande que « l'électrohypersensibilité soit classée en maladie chronique multi systèmes, en reconnaissant que la cause sous-jacente reste l'environnement ». J'invite mes confrères à lire la revue de l'EUROPAEM sur les CEM et qui explore ce sujet (58). On y apprend en quoi les études de provocation ayant conclu à l'origine psychosomatique de l'électrosensibilité souffrent de faiblesses méthodologiques. On y apprend que les symptômes des patients électrosensibles sont superposables à ceux du syndrome des micro-ondes en lien avec les CEM et qu'ils présentent des marqueurs biologiques de stress oxydatif élevés selon plusieurs études publiées dans des revues à comité de lecture. On y apprend aussi que l'électrosensibilité est statistiquement liée à un variant du gène de la Glutathion S transférase (enzyme de détoxification intervenant dans le processus d'élimination de certains xénobiotiques). Les personnes dites « électrosensibles » seraient-elles la partie émergée de l'iceberg que représente l'impact sanitaire des CEM artificiels ?

L'AAEM plaide pour que l'électrohypersensibilité soit reconnue comme un « problème universel grandissant » (114).

## b. L'hygiène électromagnétique qui pourrait être proposée

Quels conseils donner ? Difficile de lister au patient toutes les mesures d'hygiène électromagnétique potentiellement intéressantes. On peut retrouver une liste des mesures possibles dans les recommandations de l'EUROPAEM (58). On proposera de diminuer en priorité les sources qui nous ont semblées notables lors de l'anamnèse, dans la mesure du possible. Ce chapitre recense les conseils d'hygiène électromagnétique les plus pertinents. A chaque clinicien de juger de ce qui lui semble adapté, au cas par cas.

### *CEM hautes fréquences*

Il semble pertinent de proposer aux patients de limiter leur exposition au Wifi domestique : ordinateur et box connectés par câble Ethernet, fonction Wifi désactivée, module femtocell arrêté, tout boîtier émettant du 3G, 4G, 5G désactivé... au moins la nuit !

Il semble aussi pertinent de leur conseiller de ne pas dormir avec leur portable allumé dans leur chambre (a fortiori sous l'oreiller ou sur la table de chevet !) et de ne pas le porter contre leur corps. Le mettre en mode avion la nuit si on l'utilise comme réveil.

Un téléphone portable n'est pas seulement un récepteur, c'est aussi un émetteur de CEM. Il communique régulièrement avec l'antenne relais et produit un CEM HF même quand on ne l'utilise pas. Se mettre en mode avion dans les transports est intéressant pour limiter une exposition inutile aux CEM car le téléphone en émet très régulièrement, en changeant d'antenne relais lors du parcours. Dans les lieux de mauvaise réceptivité du signal, il est aussi pertinent de se mettre en mode avion ou de mettre son téléphone loin de soi car le téléphone émet régulièrement et à pleine puissance pour pouvoir accrocher le réseau, ce qui peut induire une pollution notable alors même que vous n'utilisez pas votre téléphone. Désactiver par défaut les fonctions bluetooth, Wifi et données mobiles et ne les activer ponctuellement que quand on n'en a besoin : ceci n'empêche pas de recevoir un appel et évite une pollution électromagnétique inutile.

Si le téléphone portable est utilisé souvent pour téléphoner, se mettre sur haut-parleur avec le téléphone loin du corps ou utiliser des oreillettes à tubes à air qui ne transmettent pas de champ électrique. Les « sms » et les communications courtes (moins de 6 min) sont à privilégier.

Enfin, il semble pertinent de conseiller d'utiliser un téléphone filaire plutôt qu'un DECT à la maison ou sur le lieu de travail quand c'est possible. Si le téléphone filaire est branché à une box, la box doit être mise à la terre pour ne pas propager au combiné son CEM BF (les box sont en effet sans prise de terre et peuvent émettre un CEM BF pouvant atteindre 300 V/m).

Quand les enfants jouent sur un smartphone ou une tablette, mettre les appareils en mode avion. Eviter de les laisser jouer quand l'appareil est en charge sur le secteur car il émet alors aussi un champ de basse fréquence en plus du champ de haute fréquence.

### *CEM basses fréquences*

Difficile de conseiller au patient présentant un début de maladie d'Alzheimer et vivant sous une ligne haute tension de déménager... Cette question doit-elle être envisagée, selon le contexte familial, pour un enfant venant de recevoir un diagnostic de leucémie et dont le domicile est situé sous une ligne haute tension ?

En effet, les chances de survie des enfants atteints de leucémie et exposés dans leur foyer à des CEM BF pourraient être inférieures à ceux qui ne le sont pas.

Foliart et al. retrouvent un HR de 4,5 [1,5-13,8] pour les enfants porteurs d'une leucémie exposés à un CEM BF de 0,3  $\mu$ T ou plus par rapport aux enfants exposés à moins de 0,1  $\mu$ T, soit 4 fois plus de risque de mourir de sa leucémie, mais ces calculs sont basés sur de petits effectifs (118). Svendsen et al. retrouvent un HR non significatif de 3 [0,9-9,8] pour les enfants exposés à des CEM BF de plus de 0,2  $\mu$ T par rapport aux enfants exposés à moins de 0,1  $\mu$ T (119).

La diminution des sources de CEM BF générés par les appareils électriques est plus

accessible, et pourrait être intéressante pour les expositions de longue durée, notamment pendant le sommeil. A long terme, cela pourrait peut-être faire une différence dans l'évolution d'une pathologie neurodégénérative ou de troubles neuropsychiques, par exemple.

Supelec a réalisé des mesures d'intensité de champ électrique induit par nos appareils ménagers (2) dont voici quelques exemples selon ce qui peut être comparé à nos utilisations courantes : à 10 cm d'un sèche-cheveu en fonctionnement, le champ électrique est de 109 V/m, à 20 cm d'une table de cuisine à induction, il est de 47 V/m et à 30 cm d'un radio-réveil, il est de 16 à 30 V/m selon le modèle et à 50 cm d'une alimentation de PC, il est de 11 V/m.

Les couvertures chauffantes électriques émettent de forts champs électriques considérés comme des expositions domestiques à risque dans les études sur le lien entre CEM BF et cancer du sein. Elles sont peu utilisées en France en dehors des cabinets d'esthétiques et des spas, mais seraient à éviter.

Les radiateurs électriques sont sans prise de terre et peuvent émettre des champs électriques de l'ordre de 100 V/m selon leur puissance. Selon l'EUROPAEM, il faudrait éviter de dormir à moins d'1 m, voire 1 m 50 de ce type d'appareil (58). Si le lit de la personne ne peut être déplacé, le radiateur peut être mis à la terre pour moins de 20 euros à l'aide d'une prise de mise à la terre aimantée : ceci évite le rayonnement du champ électrique. En été, il n'est pas contraignant de couper l'alimentation des radiateurs électriques au compteur.

Les lampes de chevet sont en général sans prise de terre. Elles peuvent donc émettre un champ électrique de plus de 100 V/m si elles sont branchées dans le « mauvais sens » (fiche phase mâle sur fiche neutre femelle), alors même qu'elles sont éteintes. Il existe des petits testeurs de champs permettant de brancher la lampe dans le bon sens (120).

Les lits électriques sont également des sources importantes de CEM BF, il existe des télécommandes permettant de couper l'alimentation électrique une fois le lit réglé. Les lits électriques des structures sanitaires sont donc également potentiellement

« polluants », cela pourrait-il jouer sur l'évolution du patient dans le cadre d'hospitalisations prolongées ?

### c. Risque de résistance du patient ?

*Difficultés d'avoir une information indépendante objective pour le public.*

Comment informer les patients sur l'importance de limiter leur exposition aux « ondes » quand les instances sanitaires communiquent peu à ce sujet et qu'on peut trouver tout et son contraire sur internet ? Parfois les alertes sanitaires sont d'autant moins crédibles qu'elles sont inquiétantes.

Je pense qu'il est acceptable d'expliquer au patient que les normes en vigueur ne tiennent pas compte des dernières avancées scientifiques puisqu'elles n'ont pas été révisées depuis 20 ans. On peut aussi expliquer que l'absence de consensus scientifique tient à la grande complexité du sujet.

### *L'addiction*

De plus en plus de personnes sont devenues « addict » à internet et à leur smartphone... au point qu'une échelle française d'addiction aux smartphones vient d'être validée. Cette addiction est fortement liée à la symptomatologie anxiodépressive et à l'impulsivité : cause ou conséquence ? Il pourrait s'agir d'un cercle particulièrement vicieux (121).

Il me semble important d'expliquer au patient que diminuer son exposition aux CEM HF n'est pas se « priver » d'un téléphone portable. Il s'agit juste de tenir compte de la possibilité d'être « connecté » sans trop être « pollué » par des CEM : il est simple de communiquer par internet via une connexion Ethernet sur un ordinateur quand on est à son domicile ou sur son lieu de travail. On peut aussi téléphoner via un téléphone filaire, et réserver ses appels sans fil pour les petites « urgences ». Certes tous ces conseils ne vont pas dans le sens de la vague actuelle du tout sans fil, mais il est quand même possible de modifier ses comportements, petit à petit, quand on y découvre un intérêt sanitaire.

**A titre personnel, lors de mes consultations, j'ai commencé depuis un an à promouvoir l'hygiène électromagnétique auprès des patients présentant des pathologies possiblement favorisées par les CEM. Les patients m'ont paru plutôt ouverts et favorables à ce discours. Les parents adhèrent aussi à ce discours vis-à-vis de leurs enfants ou adolescents dont ils déplorent souvent l'addiction aux écrans.**

## CONCLUSION

A la lecture des données scientifiques décrites précédemment, il apparaît que les CEM environnementaux liés aux télécommunications sans fil ou au réseau électrique domestique, ont un impact sur la santé, et ce, y compris aux niveaux d'exposition actuelle. Comme l'amiante et le tabac, les CEM artificiels risquent d'être à l'origine d'un désastre sanitaire à plus ou moins long terme si nos gouvernements continuent à maintenir des seuils d'exposition collective plus de 100 fois supérieurs à ceux préconisés par les experts scientifiques. Les seuils réglementaires en vigueur sont obsolètes et ne tiennent pas compte des effets athermiques des CEM, pourtant largement décrits dans la littérature. Ils ne tiennent pas non plus compte des expositions multiples et chroniques auxquelles nous sommes soumis actuellement. Le Parlement Européen et l'Anses plaident pour une révision des normes mais les États restent sourds à ces recommandations et le public continue d'être indument exposé.

En attendant la mise en place d'une politique de santé publique adéquate, nous, médecins, avons un rôle à jouer dans cette prise de conscience et il me semble que nous devrions d'ores et déjà promouvoir l'hygiène électromagnétique auprès de nos patients.

Cela ne veut pas dire que nous devons renoncer aux nouvelles technologies ni qu'il faut supprimer toutes les communications sans fil mais que nous devons les utiliser en conscience, avec modération et les remplacer par du filaire quand c'est possible. Une attention toute particulière doit être portée aux enfants et aux adolescents afin de ne pas les laisser s'exposer exagérément, et ce d'autant que

l'addiction aux écrans est préjudiciable à leur développement.

Compte-tenu de l'impact sanitaire des pollutions électromagnétiques actuelles, le principe de précaution ne devrait-il pas s'appliquer concernant l'installation du réseau 5G ?

Est-ce notre conception du progrès humain que de sacrifier la santé publique au profit d'une technologie débridée et déconnectée de nos besoins réels ?

**La technologie doit servir l'Homme : ce n'est pas à l'Homme d'être au service de la technologie.**

## ABREVIATIONS

- AAEM : American Academy of Environmental Medicine
- ADN : acide désoxyribonucléique
- AGE : advanced glycation end products (produits de glycation avancés)
- ANSES : Agence Nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail
- ATP : adénosine triphosphate : monnaie d'échange énergétique de la cellule
- BHE : barrière hémato-encéphalique
- CAT : catalase
- CIRC : centre international de recherche contre le cancer
- CPL : courant porteur en ligne
- DECT : Digital European Cordless Telephone
- CEM : champ électromagnétique
- CEM HF : champ électromagnétique haute fréquence
- CEM BF : champ électromagnétique basse fréquence
- EUROPEAM : European Academy for Environmental Medicine
- HR : hazard ratio
- IC 95% : intervalle de confiance à 95 %, soit 5% de chance de se tromper en affirmant que le lien statistique est compris dans l'intervalle
- ICNIRP : International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
- GPx : glutathion peroxydase
- MDA : malondialdéhyde
- NTT : nitrotyrosine
- OR : odds ratio
- RL : radical libre
- ROS : espèce réactive de l'oxygène
- RR : risque relatif
- RRs : risque relatif stratifié

- SAR : specific absorption rate = DAS en français : débit d'absorption spécifique exprimée en W/kg correspondant à l'énergie absorbée par le corps par unité de temps et de masse
- SCENIHR : Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks
- SOD : superoxyde dismutase
- VGCC : voltage-gated calcium channels (canaux calciques dépendants du voltage)
- VLE : valeur limite d'exposition

## RÉFÉRENCES

1. Pritchard C, Silk A, Hansen L. Are rises in Electro-Magnetic Field in the human environment, interacting with multiple environmental pollutions, the tripping point for increases in neurological deaths in the Western World?. *Med Hypotheses*. 2019 Jun;127:76-83. doi:10.1016/j.mehy.2019.03.018. Epub 2019 Mar 26. PubMed PMID: 31088653.
2. Anses, accessible via le lien : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2008et0006Ra.pdf>
3. Anses, accessible via le lien : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2007et0007Ra.pdf>
4. Anses, accessible via le lien : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2019SA0006Ra.pdf>
5. Réseau de transport d'électricité, accessible via le lien : [https://www.rte-france.com/sites/default/files/mesure\\_cem\\_ht-tht.pdf](https://www.rte-france.com/sites/default/files/mesure_cem_ht-tht.pdf)
6. INERIS, accessible via le lien : [https://ondes-info.ineris.fr/content/valeurs\\_limites\\_exposition](https://ondes-info.ineris.fr/content/valeurs_limites_exposition)
7. Tableau comparatif VLE hautes fréquences accessible via le lien : <http://www.geobiologie.be/normes/tableau-des-normes-officielles-pour-les-hautes-frequences/>
8. INSERM, accessible via le lien : <http://www.ipubli.inserm.fr/bitstream/handle/10608/102/?sequence=27>
9. Carpenter DO. Extremely low frequency electromagnetic fields and cancer: How source of funding affects results. *Environ Res*. 2019 Nov;178:108688. doi: 10.1016/j.envres.2019.108688. Epub 2019 Aug 24. Review. PubMed PMID: 31476684.
10. Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, Linet M, McBride M, Michaelis J, Olsen JH, Tynes T, Verkasalo PK. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer*. 2000 Sep;83(5):692-8. doi: 10.1054/bjoc.2000.1376. PubMed PMID: 10944614; PubMed Central PMCID: PMC2363518.
11. Schüz J, Svendsen AL, Linet MS, McBride ML, Roman E, Feychting M, Kheifets L, Lightfoot T, Mezei G, Simpson J, Ahlbom A. Nighttime exposure to electromagnetic fields and childhood leukemia: an extended pooled analysis. *Am J Epidemiol*. 2007 Aug 1;166(3):263-9. doi: 10.1093/aje/kwm080. Epub 2007 May 7. PubMed PMID: 17485729.
12. Kheifets L, Ahlbom A, Crespi CM, Draper G, Hagi-hara J, Lowenthal RM, Mezei G, Oksuzyan S, Schüz J, Swanson J, Tittarelli A, Vinceti M, Wunsch Filho V. Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer*. 2010 Sep 28;103(7):1128-35. doi: 10.1038/sj.bjc.6605838. PubMed PMID: 20877339; PubMed Central PMCID: PMC2965855.
13. Zhao L, Liu X, Wang C, Yan K, Lin X, Li S, Bao H, Liu X. Magnetic fields exposure and childhood leukemia risk: a meta-analysis based on 11,699 cases and 13,194 controls. *Leuk Res*. 2014 Mar;38(3):269-74. doi: 10.1016/j.leukres.2013.12.008. Epub 2013 Dec 15. PubMed PMID: 24388073.
14. Anses, accessible via le lien : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2013SA0038Ra.pdf>
15. Institut National du Cancer : accessible via le lien <https://www.e-cancer.fr/Expertises-et-publications/Catalogue-des-publications/Les-cancers-en-France-en-2018-L-essentiel-des-faits-et-chiffres-edition-2019>
16. Erren TC. A meta-analysis of epidemiologic studies of electric and magnetic fields and breast cancer in women and men. *Bioelectromagnetics*. 2001;Suppl 5:S105-19. doi: 10.1002/1521-186x(2001)22:5+<::aid-bem1027>3.3.co;2-s. PubMed PMID: 11170121.
17. Chen C, Ma X, Zhong M, Yu Z. Extremely low-frequency electromagnetic fields exposure and female breast cancer risk: a meta-analysis based on 24,338 cases and 60,628 controls. *Breast Cancer Res Treat*. 2010 Sep;123(2):569-76. doi: 10.1007/s10549-010-0782-6. Epub 2010 Feb 10. PubMed PMID: 20145992.
18. Chen Q, Lang L, Wu W, Xu G, Zhang X, Li T, Huang H. A meta-analysis on the relationship between exposure to ELF-EMFs and the risk of female breast cancer. *PLoS One*. 2013;8(7):e69272. doi: 10.1371/journal.pone.0069272. Print 2013. PubMed PMID: 23869239; PubMed Central PMCID: PMC3712018.
19. Zhao G, Lin X, Zhou M, Zhao J. Relationship between exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields and breast cancer risk: a meta-analysis. *Eur J Gynaecol Oncol*. 2014;35(3):264-9. PubMed PMID: 24984538.
20. Zhang Y, Lai J, Ruan G, Chen C, Wang DW. Meta-analysis of extremely low frequency electromagnetic fields and cancer risk: a pooled analysis of epidemiologic studies. *Environ Int*. 2016 Mar;88:36-43. doi: 10.1016/j.envint.2015.12.012. Epub 2015 Dec 15. PubMed PMID: 26703095.
21. West JG, Kapoor NS, Liao SY, Chen JW, Bailey L, Nagourney RA. Multifocal Breast Cancer in Young Women with Prolonged Contact between Their Breasts and Their Cellular Phones. *Case Rep Med*. 2013;2013:354682. doi: 10.1155/2013/354682. Epub 2013 Sep 18. PubMed PMID: 24151509; PubMed Central PMCID: PMC3789302.
22. Bortkiewicz A, Gadzicka E, Szymczak W. Mobile phone use and risk for intracranial tumors and

- salivary gland tumors - A meta-analysis. *Int J Occup Med Environ Health*. 2017 Feb 21;30(1):27-43. doi: 10.13075/ijom.1896.00802. Epub 2017 Feb 13. Review. PubMed
23. Prasad M, Kathuria P, Nair P, Kumar A, Prasad K. Mobile phone use and risk of brain tumours: a systematic review of association between study quality, source of funding, and research outcomes. *Neurol Sci*. 2017 May;38(5):797-810. doi: 10.1007/s10072-017-2850-8. Epub 2017 Feb 17. Review. PubMed PMID: 28213724.
  24. Wang P, Hou C, Li Y, Zhou D. Wireless Phone Use and Risk of Adult Glioma: Evidence from a Meta-Analysis. *World Neurosurg*. 2018 Jul;115:e629-e636. doi: 10.1016/j.wneu.2018.04.122. Epub 2018 Apr 28. PubMed PMID: 29709736.
  25. Wang Y, Guo X. Meta-analysis of association between mobile phone use and glioma risk. *J Cancer Res Ther*. 2016 Dec;12(Supplement):C298-C300. doi: 10.4103/0973-1482.200759. PubMed PMID: 28230042.
  26. Yang M, Guo W, Yang C, Tang J, Huang Q, Feng S, Jiang A, Xu X, Jiang G. Mobile phone use and glioma risk: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One*. 2017;12(5):e0175136. doi: 10.1371/journal.pone.0175136. eCollection 2017. Review. PubMed PMID: 28472042; PubMed Central PMCID: PMC5417432.
  27. Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. *Int J Epidemiol*. 2010 Jun;39(3):675-94. doi: 10.1093/ije/dyq079. Epub 2010 May 17. PubMed PMID: 20483835.
  28. Momoli F, Siemiatycki J, McBride ML, Parent MÉ, Richardson L, Bedard D, Platt R, Vrijheid M, Cardis E, Krewski D. Probabilistic Multiple-Bias Modeling Applied to the Canadian Data From the Interphone Study of Mobile Phone Use and Risk of Glioma, Meningioma, Acoustic Neuroma, and Parotid Gland Tumors. *Am J Epidemiol*. 2017 Oct 1;186(7):885-893. doi: 10.1093/aje/kwx157. PubMed PMID: 28535174; PubMed Central PMCID: PMC5860390.
  29. Carlberg M, Hardell L. Evaluation of Mobile Phone and Cordless Phone Use and Glioma Risk Using the Bradford Hill Viewpoints from 1965 on Association or Causation. *Biomed Res Int*. 2017;2017:9218486. doi: 10.1155/2017/9218486. Epub 2017 Mar 16. Review. PubMed PMID: 28401165; PubMed Central PMCID: PMC5376454.
  30. Hardell L, Carlberg M. Mobile phone and cordless phone use and the risk for glioma - Analysis of pooled case-control studies in Sweden, 1997-2003 and 2007-2009. *Pathophysiology*. 2015 Mar;22(1):1-13. doi: 10.1016/j.pathophys.2014.10.001. Epub 2014 Oct 29. PubMed PMID: 25466607.
  31. Miller AB, Morgan LL, Udasin I, Davis DL. Cancer epidemiology update, following the 2011 IARC evaluation of radiofrequency electromagnetic fields (Monograph 102). *Environ Res*. 2018 Nov;167:673-683. doi: 10.1016/j.envres.2018.06.043. Epub 2018 Sep 6. Review. PubMed PMID: 30196934.
  32. Fondation Recherche Alzheimer : accessible via le lien <https://alzheimer-recherche.org/la-maladie-alzheimer/quest-maladie-dalzheimer/definition-et-chiffres/>
  33. Jallilian H, Teshnizi SH, Rööslü M, Neghab M. Occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and risk of Alzheimer disease: A systematic review and meta-analysis. *Neurotoxicology*. 2018 Dec;69:242-252. doi: 10.1016/j.neuro.2017.12.005. Epub 2017 Dec 24. PubMed PMID: 29278690.
  34. Gunnarsson LG, Bodin L. Occupational Exposures and Neurodegenerative Diseases-A Systematic Literature Review and Meta-Analyses. *Int J Environ Res Public Health*. 2019 Jan 26;16(3). doi: 10.3390/ijerph16030337. PubMed PMID: 30691095; PubMed Central PMCID: PMC6388365.
  35. Huss A, Spoerri A, Egger M, Rööslü M. Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population. *Am J Epidemiol*. 2009 Jan 15;169(2):167-75. doi: 10.1093/aje/kwn297. Epub 2008 Nov 5. PubMed PMID: 18990717.
  36. Frei P, Poulsen AH, Mezei G, Pedersen C, Cronberg Salem L, Johansen C, Rööslü M, Schüz J. Residential distance to high-voltage power lines and risk of neurodegenerative diseases: a Danish population-based case-control study. *Am J Epidemiol*. 2013 May 1;177(9):970-8. doi: 10.1093/aje/kws334. Epub 2013 Apr 9. PubMed PMID: 23572049.
  37. Gervasi F, Murtas R, Decarli A, Russo AG. Residential distance from high-voltage overhead power lines and risk of Alzheimer's dementia and Parkinson's disease: a population-based case-control study in a metropolitan area of Northern Italy. *Int J Epidemiol*. 2019 Dec 1;48(6):1949-1957. doi: 10.1093/ije/dyz139. PubMed PMID: 31280302; PubMed Central PMCID: PMC6929536.
  38. Marin B, Logroscino G, Boumédiène F, Labrunie A, Couratier P, Babron MC, Leutenegger AL, Preux PM, Beghi E. Clinical and demographic factors and outcome of amyotrophic lateral sclerosis in relation to population ancestral origin. *Eur J Epidemiol*. 2016 Mar;31(3):229-45. doi: 10.1007/s10654-015-0090-x. Epub 2015 Oct 12. Review. PubMed PMID: 26458931.
  39. Huss A, Peters S, Vermeulen R. Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and the risk of ALS: A systematic review and meta-analysis. *Bioelectromagnetics*. 2018 Feb;39(2):156-163. doi: 10.1002/bem.22104. Epub 2018 Jan 19. Review. PubMed PMID: 29350413.
  40. Gunnarsson LG, Bodin L. Amyotrophic Lateral Sclerosis and Occupational Exposures: A Systematic Literature Review and Meta-Analyses. *Int J Environ Res Public Health*. 2018 Oct 26;15(11). doi: 10.3390/ijerph15112371. PubMed PMID: 30373166; PubMed Central PMCID: PMC6265680.
  41. Gunnarsson LG, Bodin L. Parkinson's disease and occupational exposures: a systematic literature

- review and meta-analyses. *Scand J Work Environ Health*. 2017 May 1;43(3):197-209. doi: 10.5271/sjweh.3641. Epub 2017 Apr 5. Review. PubMed PMID: 28379585.
42. Luna J, Leleu JP, Preux PM, Corcia P, Couratier P, Marin B, Boumediene F. Residential exposure to ultra high frequency electromagnetic fields emitted by Global System for Mobile (GSM) antennas and amyotrophic lateral sclerosis incidence: A geo-epidemiological population-based study. *Environ Res*. 2019 Sep;176:108525. doi: 10.1016/j.envres.2019.108525. Epub 2019 Jun 11. PubMed PMID: 31226626.
  43. Stefi AL, Margaritis LH, Skouroliakou AS, Vassilacopoulou D. Mobile phone electromagnetic radiation affects Amyloid Precursor Protein and  $\alpha$ -synuclein metabolism in SH-SY5Y cells. *Pathophysiology*. 2019 Sep - Dec;26(3-4):203-212. doi: 10.1016/j.pathophys.2019.02.004. Epub 2019 Mar 1. PubMed PMID: 30850244.
  44. Adams JA, Galloway TS, Mondal D, Esteves SC, Mathews F. Effect of mobile telephones on sperm quality: a systematic review and meta-analysis. *Environ Int*. 2014 Sep;70:106-12. doi: 10.1016/j.envint.2014.04.015. Epub 2014 Jun 10. Review. PubMed PMID: 24927498.
  45. Houston BJ, Nixon B, King BV, De Luliis GN, Aitken RJ. The effects of radiofrequency electromagnetic radiation on sperm function. *Reproduction*. 2016 Dec;152(6):R263-R276. doi: 10.1530/REP-16-0126. Epub 2016 Sep 6. Review. PubMed PMID: 27601711.
  46. Kesari KK, Agarwal A, Henkel R. Radiations and male fertility. *Reprod Biol Endocrinol*. 2018 Dec 9;16(1):118. doi: 10.1186/s12958-018-0431-1. Review. PubMed PMID: 30445985; PubMed Central PMCID: PMC6240172.
  47. Santini SJ, Cordone V, Falone S, Mijit M, Tatone C, Amicarelli F, Di Emidio G. Role of Mitochondria in the Oxidative Stress Induced by Electromagnetic Fields: Focus on Reproductive Systems. *Oxid Med Cell Longev*. 2018;2018:5076271. doi: 10.1155/2018/5076271. eCollection 2018. Review. PubMed PMID: 30533171; PubMed Central PMCID: PMC6250044.
  48. Lerchl A. Electromagnetic pollution: another risk factor for infertility, or a red herring?. *Asian J Androl*. 2013 Mar;15(2):201-3. doi: 10.1038/aja.2012.104. Epub 2012 Sep 24. Review. PubMed PMID: 23001444; PubMed Central PMCID: PMC3739137.
  49. Dama MS, Bhat MN. Mobile phones affect multiple sperm quality traits: a meta-analysis. *F1000Res*. 2013;2:40. doi: 10.12688/f1000research.2-40.v1. eCollection 2013. Review. PubMed PMID: 24327874; PubMed Central PMCID: PMC3752730.
  50. Liu K, Li Y, Zhang G, Liu J, Cao J, Ao L, Zhang S. Association between mobile phone use and semen quality: a systemic review and meta-analysis. *Andrology*. 2014 Jul;2(4):491-501. doi: 10.1111/j.2047-2927.2014.00205.x. Epub 2014 Apr 3. Review. PubMed PMID: 24700791.
  51. Zhang G, Yan H, Chen Q, Liu K, Ling X, Sun L, Zhou N, Wang Z, Zou P, Wang X, Tan L, Cui Z, Zhou Z, Liu J, Ao L, Cao J. Effects of cell phone use on semen parameters: Results from the MARHCS cohort study in Chongqing, China. *Environ Int*. 2016 May;91:116-21. doi: 10.1016/j.envint.2016.02.028. Epub 2016 Mar 4. PubMed PMID: 26949865.
  52. Avendaño C, Mata A, Sanchez Sarmiento CA, Doncel GF. Use of laptop computers connected to internet through Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation. *Fertil Steril*. 2012 Jan;97(1):39-45.e2. doi: 10.1016/j.fertnstert.2011.10.012. Epub 2011 Nov 23. PubMed PMID: 22112647.
  53. Kamali K, Atarod M, Sarhadi S, Nikbakht J, Emami M, Maghsoudi R, Salimi H, Fallahpour B, Kamali N, Momtazan A, Ameli M. Effects of electromagnetic waves emitted from 3G+wi-fi modems on human semen analysis. *Urologia*. 2017 Oct 25;84(4):209-214. doi: 10.5301/uj.5000269. Epub 2017 Sep 14. PubMed PMID: 28967061.
  54. Roozbeh N, Abdi F, Amraee A, Atarodi Kashani Z, Darvish L. Influence of Radiofrequency Electromagnetic Fields on the Fertility System: Protocol for a Systematic Review and Meta-Analysis. *JMIR Res Protoc*. 2018 Feb 8;7(2):e33. doi: 10.2196/resprot.9102. PubMed PMID: 29422451; PubMed Central PMCID: PMC5824101.
  55. Esmailzadeh S, Delavar MA, Aleyassin A, Gholamian SA, Ahmadi A. Exposure to Electromagnetic Fields of High Voltage Overhead Power Lines and Female Infertility. *Int J Occup Environ Med*. 2019 Jan;10(1):11-16. doi: 10.15171/ijoem.2019.1429. PubMed PMID: 30685773; PubMed Central PMCID: PMC6522214.
  56. Pall ML. Microwave frequency electromagnetic fields (EMFs) produce widespread neuropsychiatric effects including depression. *J Chem Neuroanat*. 2016 Sep;75(Pt B):43-51. doi: 10.1016/j.jchemneu.2015.08.001. Epub 2015 Aug 21. Review. PubMed PMID: 26300312.
  57. Narayanan SN, Jetti R, Kesari KK, Kumar RS, Nayak SB, Bhat PG. Radiofrequency electromagnetic radiation-induced behavioral changes and their possible basis. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2019 Oct;26(30):30693-30710. doi: 10.1007/s11356-019-06278-5. Epub 2019 Aug 28. Review. PubMed PMID: 31463749.
  58. Belyaev I, Dean A, Eger H, Hubmann G, Jandrisovits R, Kern M, Kundi M, Moshhammer H, Lercher P, Müller K, Oberfeld G, Ohnsorge P, Pelzmann P, Scheingraber C, Thill R. EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses. *Rev Environ Health*. 2016 Sep 1;31(3):363-97. doi: 10.1515/reveh-2016-0011. Review. PubMed PMID: 27454111. Traduction française accessible via le lien: [https://www.alerte.ch/images/stories/documents/publications/EUROPAEM\\_Directives\\_2016.pdf](https://www.alerte.ch/images/stories/documents/publications/EUROPAEM_Directives_2016.pdf)
  59. Wang J, Su H, Xie W, Yu S. Mobile Phone Use and The Risk of Headache: A Systematic Review and Meta-analysis of Cross-sectional Studies. *Sci Rep*. 2017 Oct 3;7(1):12595. doi: 10.1038/s41598-

- 017-12802-9. PubMed PMID: 28974725; PubMed Central PMCID: PMC5626766.
60. Chu MK, Song HG, Kim C, Lee BC. Clinical features of headache associated with mobile phone use: a cross-sectional study in university students. *BMC Neurol.* 2011 Sep 26;11:115. doi: 10.1186/1471-2377-11-115. PubMed PMID: 21943309; PubMed Central PMCID: PMC3193165.
  61. Haute autorité de Santé, accessible via le lien : [https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2015-02/tdah\\_argumentaire.pdf](https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2015-02/tdah_argumentaire.pdf)
  62. Byun YH, Ha M, Kwon HJ, Hong YC, Leem JH, Sakong J, Kim SY, Lee CG, Kang D, Choi HD, Kim N. Mobile phone use, blood lead levels, and attention deficit hyperactivity symptoms in children: a longitudinal study. *PLoS One.* 2013;8(3):e59742. doi: 10.1371/journal.pone.0059742. Epub 2013 Mar 21. PubMed PMID: 23555766; PubMed Central PMCID: PMC3605379.
  63. Zheng F, Gao P, He M, Li M, Wang C, Zeng Q, Zhou Z, Yu Z, Zhang L. Association between mobile phone use and inattention in 7102 Chinese adolescents: a population-based cross-sectional study. *BMC Public Health.* 2014 Oct 1;14:1022. doi: 10.1186/1471-2458-14-1022. PubMed PMID: 25273315; PubMed Central PMCID: PMC4190308.
  64. Birks L, Guxens M, Papadopoulou E, Alexander J, Ballester F, Estarlich M, Gallastegi M, Ha M, Haugen M, Huss A, Kheifets L, Lim H, Olsen J, Santa-Marina L, Sudan M, Vermeulen R, Vrijkotte T, Cardis E, Vrijheid M. Maternal cell phone use during pregnancy and child behavioral problems in five birth cohorts. *Environ Int.* 2017 Jul;104:122-131. doi: 10.1016/j.envint.2017.03.024. Epub 2017 Apr 7. PubMed PMID: 28392066; PubMed Central PMCID: PMC5506372.
  65. Sage C, Burgio E. Electromagnetic Fields, Pulsed Radiofrequency Radiation, and Epigenetics: How Wireless Technologies May Affect Childhood Development. *Child Dev.* 2018 Jan;89(1):129-136. doi: 10.1111/cdev.12824. Epub 2017 May 15. Review. PubMed PMID: 28504324.
  66. Grimes DR, Bishop DVM. Distinguishing Polemic From Commentary in Science: Some Guidelines Illustrated With the Case of Sage and Burgio (2017). *Child Dev.* 2018 Jan;89(1):141-147. doi: 10.1111/cdev.13013. Epub 2017 Dec 21. PubMed PMID: 29266222.
  67. Zhang J, Sumich A, Wang GY. Acute effects of radiofrequency electromagnetic field emitted by mobile phone on brain function. *Bioelectromagnetics.* 2017 Jul;38(5):329-338. doi: 10.1002/bem.22052. Epub 2017 Apr 20. Review. PubMed PMID: 28426166.
  68. Danker-Hopfe H, Eggert T, Dorn H, Sauter C. Effects of RF-EMF on the Human Resting-State EEG-the Inconsistencies in the Consistency. Part 1: Non-Exposure-Related Limitations of Comparability Between Studies. *Bioelectromagnetics.* 2019 Jul;40(5):291-318. doi: 10.1002/bem.22194. Epub 2019 Jun 18. Review. PubMed PMID: 31215052; PubMed Central PMCID: PMC6619284.
  69. Belpomme D, Hardell L, Belyaev I, Burgio E, Carpenter DO. Thermal and non-thermal health effects of low intensity non-ionizing radiation: An international perspective. *Environ Pollut.* 2018 Nov;242(Pt A):643-658. doi: 10.1016/j.envpol.2018.07.019. Epub 2018 Jul 6. Review. PubMed PMID: 30025338.
  70. Sies H, Berndt C, Jones DP. Oxidative Stress. *Annu Rev Biochem.* 2017 Jun 20;86:715-748. doi: 10.1146/annurev-biochem-061516-045037. Epub 2017 Apr 24. Review. PubMed PMID: 28441057.
  71. Görlach A, Bertram K, Hudecova S, Krizanova O. Calcium and ROS: A mutual interplay. *Redox Biol.* 2015 Dec;6:260-271. doi: 10.1016/j.redox.2015.08.010. Epub 2015 Aug 11. Review. PubMed PMID: 26296072; PubMed Central PMCID: PMC4556774.
  72. Sporn MB, Liby KT. NRF2 and cancer: the good, the bad and the importance of context. *Nat Rev Cancer.* 2012 Jul 19;12(8):564-71. doi: 10.1038/nrc3278. Review. PubMed PMID: 22810811; PubMed Central PMCID: PMC3836441.
  73. Klaunig JE, Kamendulis LM, Hocevar BA. Oxidative stress and oxidative damage in carcinogenesis. *Toxicol Pathol.* 2010 Jan;38(1):96-109. doi: 10.1177/0192623309356453. Epub 2009 Dec 17. Review. PubMed PMID: 20019356.
  74. Kim HK, Noh YH, Nilius B, Ko KS, Rhee BD, Kim N, Han J. Current and upcoming mitochondrial targets for cancer therapy. *Semin Cancer Biol.* 2017 Dec;47:154-167. doi: 10.1016/j.semcancer.2017.06.006. Epub 2017 Jun 13. Review. PubMed PMID: 28627410.
  75. Singh, A., Kukreti, R., Saso, L., and Kukreti, S. (2019) Oxidative stress: a key modulator in neurodegenerative diseases, *Molecules*, 24, E1583, doi: 10.3390/molecules24081583 (Google Scholar)
  76. Kim JH, Lee JK, Kim HG, Kim KB, Kim HR. Possible Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure on Central Nerve System. *Biomol Ther (Seoul).* 2019 May 1;27(3):265-275. doi: 10.4062/biomolther.2018.152. Review. PubMed PMID: 30481957; PubMed Central PMCID: PMC6513191.
  77. Kivrak EG, Yurt KK, Kaplan AA, Alkan I, Altun G. Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system. *J Microsc Ultrastruct.* 2017 Oct-Dec;5(4):167-176. doi: 10.1016/j.jmau.2017.07.003. Epub 2017 Aug 2. Review. PubMed PMID: 30023251; PubMed Central PMCID: PMC6025786.
  78. Yakymenko I, Tsybulin O, Sidorik E, Henshel D, Kyrylenko O, Kyrylenko S. Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation. *Electromagn Biol Med.* 2016;35(2):186-202. doi: 10.3109/15368378.2015.1043557. Epub 2015 Jul 7. Review. PubMed PMID: 26151230.
  79. Dasdag S, Akdag MZ. The link between radiofrequencies emitted from wireless technologies and oxidative stress. *J Chem Neuroanat.* 2016 Sep;75(Pt B):85-93. doi: 10.1016/j.jchemneu.2015.09.001. Epub 2015 Sep 12. Review. PubMed PMID: 26371078.



80. Xu S, Zhou Z, Zhang L, Yu Z, Zhang W, Wang Y, Wang X, Li M, Chen Y, Chen C, He M, Zhang G, Zhong M. Exposure to 1800 MHz radiofrequency radiation induces oxidative damage to mitochondrial DNA in primary cultured neurons. *Brain Res.* 2010 Jan 22;1311:189-96. doi: 10.1016/j.brainres.2009.10.062. Epub 2009 Oct 30. PubMed PMID: 19879861.
81. Sun Y, Zong L, Gao Z, Zhu S, Tong J, Cao Y. Mitochondrial DNA damage and oxidative damage in HL-60 cells exposed to 900MHz radiofrequency fields. *Mutat Res.* 2017 Mar;797-799:7-14. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2017.03.001. Epub 2017 Mar 7. PubMed PMID: 28340409.
82. Saliev T, Begimbetova D, Masoud AR, Matkarimov B. Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin. *Prog Biophys Mol Biol.* 2019 Jan;141:25-36. doi: 10.1016/j.pbio-molbio.2018.07.009. Epub 2018 Jul 17. Review. PubMed PMID: 30030071.
83. Arendash GW. Review of the Evidence that Transcranial Electromagnetic Treatment will be a Safe and Effective Therapeutic Against Alzheimer's Disease. *J Alzheimers Dis.* 2016 May 30;53(3):753-71. doi: 10.3233/JAD-160165. Review (Google Scholar)
84. Panagopoulos DJ. Comparing DNA damage induced by mobile telephony and other types of man-made electromagnetic fields. *Mutat Res.* 2019 Jul - Sep;781:53-62. doi: 10.1016/j.mrrev.2019.03.003. Epub 2019 Mar 11. Review. PubMed PMID: 31416578.
85. Pall ML. Electromagnetic fields act via activation of voltage-gated calcium channels to produce beneficial or adverse effects. *J Cell Mol Med.* 2013 Aug;17(8):958-65. doi: 10.1111/jcmm.12088. Epub 2013 Jun 26. Review. PubMed PMID: 23802593; PubMed Central PMCID: PMC3780531.
86. Pall ML. Scientific evidence contradicts findings and assumptions of Canadian Safety Panel 6: microwaves act through voltage-gated calcium channel activation to induce biological impacts at non-thermal levels, supporting a paradigm shift for microwave/lower frequency electromagnetic field action. *Rev Environ Health.* 2015;30(2):99-116. doi: 10.1515/reveh-2015-0001. Review. PubMed PMID: 25879308.
87. Tekieh T, Sasanpour P, Rafii-Tabar H. Effects of electromagnetic field exposure on conduction and concentration of voltage gated calcium channels: A Brownian dynamics study. *Brain Res.* 2016 Sep 1;1646:560-569. doi: 10.1016/j.brainres.2016.06.034. Epub 2016 Jun 23. PubMed PMID: 27346366.
88. Pall ML pour l'EUROPAEM, accessible via le lien : [https://europaem.eu/attachments/article/131/2018-04\\_EU-EMF2018-5US.pdf](https://europaem.eu/attachments/article/131/2018-04_EU-EMF2018-5US.pdf)
89. Friedman J, Kraus S, Hauptman Y, Schiff Y, Seger R. Mechanism of short-term ERK activation by electromagnetic fields at mobile phone frequencies. *Biochem J.* 2007 Aug 1;405(3):559-68. doi: 10.1042/BJ20061653. PubMed PMID: 17456048; PubMed Central PMCID: PMC2267306.
90. Pilla AA. Electromagnetic fields instantaneously modulate nitric oxide signaling in challenged biological systems. *Biochem Biophys Res Commun.* 2012 Sep 28;426(3):330-3. doi: 10.1016/j.bbrc.2012.08.078. Epub 2012 Aug 24. PubMed PMID: 22940137.
91. Grant WB. Review of Recent Advances in Understanding the Role of Vitamin D in Reducing Cancer Risk: Breast, Colorectal, Prostate, and Overall Cancer. *Anticancer Res.* 2020 Jan;40(1):491-499. doi: 10.21873/anticancer.13977. Review. PubMed PMID: 31892604.
92. Tsoy A, Saliev T, Abzhanova E, Turgambayeva A, Kaiyrylykzy A, Akishev M, Saparbayev S, Umbayev B, Askarova S. The Effects of Mobile Phone Radiofrequency Electromagnetic Fields on  $\beta$ -Amyloid-Induced Oxidative Stress in Human and Rat Primary Astrocytes. *Neuroscience.* 2019 Jun 1;408:46-57. doi: 10.1016/j.neuroscience.2019.03.058. Epub 2019 Apr 3. PubMed PMID: 30953670.
93. Blank M, Goodman R. A mechanism for stimulation of biosynthesis by electromagnetic fields: charge transfer in DNA and base pair separation. *J Cell Physiol.* 2008 Jan;214(1):20-6. doi: 10.1002/jcp.21198. Review. PubMed PMID: 17620313.
94. Pchitskaya E, Popugaeva E, Bezprozvanny I. Calcium signaling and molecular mechanisms underlying neurodegenerative diseases. *Cell Calcium.* 2018 Mar;70:87-94. doi: 10.1016/j.ceca.2017.06.008. Epub 2017 Jun 30. Review. PubMed PMID: 28728834; PubMed Central PMCID: PMC5748019.
95. Lewczuk B, Redlarski G, Zak A, Ziółkowska N, Przybylska-Gornowicz B, Krawczuk M. Influence of electric, magnetic, and electromagnetic fields on the circadian system: current stage of knowledge. *Biomed Res Int.* 2014;2014:169459. doi: 10.1155/2014/169459. Epub 2014 Jul 22. Review. PubMed PMID: 25136557; PubMed Central PMCID: PMC4130204.
96. Galano A, Tan DX, Reiter RJ. Melatonin: A Versatile Protector against Oxidative DNA Damage. *Molecules.* 2018 Feb 27;23(3). doi: 10.3390/molecules23030530. Review. PubMed PMID: 29495460; PubMed Central PMCID: PMC6017920.
97. Ohayon MM, Stolz V, Freund FT, Milesi C, Sullivan SS. The potential for impact of man-made super low and extremely low frequency electromagnetic fields on sleep. *Sleep Med Rev.* 2019 Oct;47:28-38. doi: 10.1016/j.smrv.2019.06.001. Epub 2019 Jun 8. Review. PubMed PMID: 31252334.
98. Ahmed NA, Radwan NM, Aboul Ezz HS, Khadrawy YA, Salama NA. The chronic effect of pulsed 1800 MHz electromagnetic radiation on amino acid neurotransmitters in three different areas of juvenile and young adult rat brain. *Toxicol Ind Health.* 2018 Oct 21;748233718798975. doi: 10.1177/0748233718798975. [Epub ahead of print] PubMed PMID: 30345898.
99. Eris AH, Kiziltan HS, Meral I, Genc H, Trabzon M, Seyithanoglu H, Yagci B, Uysal O. Effect of Short-term 900 MHz low level electromagnetic radiation exposure on blood serotonin and glutamate levels.

- Bratisl Lek Listy. 2015;116(2):101-3. doi: 10.4149/bll\_2015\_019. PubMed PMID: 25665475.
100. Maaroufi K, Had-Aissouni L, Melon C, Sakly M, Abdelmelek H, Poucet B, Save E. Spatial learning, monoamines and oxidative stress in rats exposed to 900 MHz electromagnetic field in combination with iron overload. *Behav Brain Res.* 2014 Jan 1;258:80-9. doi: 10.1016/j.bbr.2013.10.016. Epub 2013 Oct 18. PubMed PMID: 24144546.
  101. Aboul Ezz HS, Khadrawy YA, Ahmed NA, Radwan NM, El Bakry MM. The effect of pulsed electromagnetic radiation from mobile phone on the levels of monoamine neurotransmitters in four different areas of rat brain. *Eur Rev Med Pharmacol Sci.* 2013 Jul;17(13):1782-8. PubMed PMID: 23852905
  102. Noor NA, Mohammed HS, Ahmed NA, Radwan NM. Variations in amino acid neurotransmitters in some brain areas of adult and young male albino rats due to exposure to mobile phone radiation. *Eur Rev Med Pharmacol Sci.* 2011 Jul;15(7):729-42. PubMed PMID: 21780540.
  103. Sieroń A, Labus Ł, Nowak P, Cieślak G, Brus H, Durczok A, Zagził T, Kostrzewa RM, Brus R. Alternating extremely low frequency magnetic field increases turnover of dopamine and serotonin in rat frontal cortex. *Bioelectromagnetics.* 2004 Sep;25(6):426-30. doi: 10.1002/bem.20011. PubMed PMID: 15300728.
  104. Zecca L, Mantegazza C, Margonato V, Cerretelli P, Caniatti M, Piva F, Dondi D, Hagino N. Biological effects of prolonged exposure to ELF electromagnetic fields in rats: III. 50 Hz electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics.* 1998;19(1):57-66. doi: 10.1002/(sici)1521-186x(1998)19:1<57::aid-bem7>3.0.co;2-3. PubMed PMID: 9453708.
  105. Stam R. Electromagnetic fields and the blood-brain barrier. *Brain Res Rev.* 2010 Oct 5;65(1):80-97. doi: 10.1016/j.brainresrev.2010.06.001. Epub 2010 Jun 13. Review. PubMed PMID: 20550949.
  106. AAEM, accessible via le lien : <http://aaemonline.org/pdf/emfpositionstatement.pdf>
  107. De Bock M, Wang N, Decrock E, Bol M, Gadiclerla AK, Culot M, Cecchelli R, Bultynck G, Leybaert L. Endothelial calcium dynamics, connexin channels and blood-brain barrier function. *Prog Neurobiol.* 2013 Sep;108:1-20. doi: 10.1016/j.pneurobio.2013.06.001. Epub 2013 Jul 10. Review. PubMed PMID: 23851106.
  108. Liebner S, Dijkhuizen RM, Reiss Y, Plate KH, Agalliu D, Constantin G. Functional morphology of the blood-brain barrier in health and disease. *Acta Neuropathol.* 2018 Mar;135(3):311-336. doi: 10.1007/s00401-018-1815-1. Epub 2018 Feb 6. Review. PubMed PMID: 29411111; PubMed Central PMCID: PMC6781630.
  109. Parlement Européen, accessible via le lien : <http://assembly.coe.int/nw/xml/XRef/Xref-XML2HTML-FR.asp?fileid=17994>
  110. Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL. Evaluation of specific absorption rate as a dosimetric quantity for electromagnetic fields bioeffects. *PLoS One.* 2013;8(6):e62663. doi: 10.1371/journal.pone.0062663. Print 2013. PubMed PMID: 23750202; PubMed Central PMCID: PMC3672148.
  111. Anses, accessible via le lien : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2017SA0229Ra.pdf>
  112. Di Ciaula A. Towards 5G communication systems: Are there health implications?. *Int J Hyg Environ Health.* 2018 Apr;221(3):367-375. doi: 10.1016/j.ijheh.2018.01.011. Epub 2018 Feb 2. Review. PubMed PMID: 29402696.
  113. EMF scientists Appeal, accessible via le lien : <https://www.emfscientist.org/>
  114. AAEM, accessible via le lien : <https://aaemonline.org/pdf/AAEMEMFmedicalconditions.pdf>
  115. L. Lloyd Morgan, Santosh Kesari, Devra Lee Davis. Why children absorb more microwave radiation than adults: The consequences. *Journal of Microscopy and Ultrastructure.* Vol 2, Issue 4, 2014, P 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.jmau.2014.06.005>. (Google Scholar)
  116. Sangün Ö, Dündar B, Çömlekçi S, Büyükgebiz A. The Effects of Electromagnetic Field on the Endocrine System in Children and Adolescents. *Pediatr Endocrinol Rev.* 2015 Dec;13(2):531-45. Review. PubMed PMID: 26841641.
  117. Doyon PR, Johansson O. Electromagnetic fields may act via calcineurin inhibition to suppress immunity, thereby increasing risk for opportunistic infection: Conceivable mechanisms of action. *Med Hypotheses.* 2017 Sep;106:71-87. doi: 10.1016/j.mehy.2017.06.028. Epub 2017 Jul 3. Review. PubMed PMID: 28818275.
  118. Foliart DE, Pollock BH, Mezei G, Iriye R, Silva JM, Ebi KL, Kheifets L, Link MP, Kavet R. Magnetic field exposure and long-term survival among children with leukaemia. *Br J Cancer.* 2006 Jan 16;94(1):161-4. doi: 10.1038/sj.bjc.6602916. PubMed PMID: 16404370; PubMed Central PMCID: PMC2361064.
  119. Svendsen AL, Weihkopf T, Kaatsch P, Schüz J. Exposure to magnetic fields and survival after diagnosis of childhood leukemia: a German cohort study. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.* 2007 Jun;16(6):1167-71. doi: 10.1158/1055-9965.EPI-06-0887. PubMed PMID: 17548680.
  120. Vidéo explicative accessible via le lien : [https://www.youtube.com/watch?v=xq\\_MJSi\\_jLA](https://www.youtube.com/watch?v=xq_MJSi_jLA)
  121. Barrault S, Dourousseau F, Ballon N, Réveillère C, Brunault P. [Smartphone addiction: French validation of the Internet Addiction Test-Smartphone version (IAT-smartphone) and associated psychopathological features]. *Encephale.* 2019 Feb;45(1):53-59. doi: 10.1016/j.encep.2017.12.002. Epub 2018 Feb 3. PubMed PMID: 29397925.