

Traduction par Deepl pro

## **Des preuves scientifiques invalident les hypothèses sanitaires qui sous-tendent les déterminations des limites d'exposition aux rayonnements de radiofréquences de la FCC et de l'ICNIRP : conséquences pour la 5G**

### **Résumé**

À la fin des années 1990, la FCC et l'ICNIRP ont adopté des limites d'exposition aux rayonnements de radiofréquences (RFR) afin de protéger le public et les travailleurs des effets néfastes des RFR. Ces limites étaient fondées sur les résultats d'études comportementales menées dans les années 1980, impliquant des expositions de 40 à 60 minutes chez 5 singes et 8 rats, puis sur l'application de facteurs de sécurité arbitraires à un seuil apparent de débit d'absorption spécifique (DAS) de 4 W/kg. Les limites étaient également basées sur deux hypothèses majeures : tout effet biologique était dû à un échauffement excessif des tissus et aucun effet ne se produirait en dessous du SAR seuil putatif, ainsi que douze hypothèses qui n'étaient spécifiées ni par la FCC ni par l'ICNIRP. Dans cet article, nous montrons comment les 25 dernières années de recherches approfondies sur les RFR démontrent que les hypothèses sous-jacentes aux limites d'exposition de la FCC et de l'ICNIRP ne sont pas valides et continuent de présenter un danger pour la santé publique. Les effets néfastes observés à des expositions inférieures au seuil supposé du SAR comprennent l'induction non thermique d'espèces réactives de l'oxygène, des dommages à l'ADN, la cardiomyopathie, la cancérogénicité, des dommages au sperme et des effets neurologiques, y compris l'hypersensibilité électromagnétique. De plus, de multiples études humaines ont trouvé des associations statistiquement significatives entre l'exposition aux RFR et l'augmentation du risque de cancer du cerveau et de la thyroïde. Pourtant, en 2020, et à la lumière de l'ensemble des preuves examinées dans cet article, la FCC et l'ICNIRP ont réaffirmé les mêmes limites qui avaient été établies dans les années 1990. Par conséquent, ces limites d'exposition, qui reposent sur des suppositions erronées, ne protègent pas adéquatement les travailleurs, les enfants, les personnes hypersensibles et la population en général contre les expositions aux RFR à court ou à long terme. Il est donc urgent de fixer des limites d'exposition protectrices pour la santé humaine et l'environnement. Ces limites doivent être fondées sur des preuves scientifiques plutôt que sur des suppositions erronées, en particulier compte tenu de l'augmentation des expositions mondiales des personnes et de l'environnement aux RFR, y compris les nouvelles formes de rayonnement des télécommunications 5G pour lesquelles il n'existe aucune étude adéquate des effets sur la santé.

## Introduction

Lorsqu'elles établissent des limites d'exposition à des agents toxiques ou cancérigènes, les agences de réglementation fixent généralement des normes qui tiennent compte des incertitudes liées aux risques sanitaires pour la population générale [1] et pour les sous-groupes sensibles tels que les enfants [2]. Cette approche n'a pas été appliquée de la même manière à la fixation des limites d'exposition aux rayonnements de radiofréquence (RFR) (gamme de fréquences : 3 kHz à 300 GHz). En outre, les hypothèses qui sous-tendent les limites d'exposition actuelles aux RFR sont erronées ; par conséquent, les limites qui sont actuellement appliquées ne protègent pas de manière adéquate la santé humaine et environnementale. Cette question est abordée plus en détail dans l'hypothèse n° 9.

Les limites de la Federal Communications Commission (FCC) concernant l'exposition maximale admissible aux champs électromagnétiques (CEM) [3] ont été établies en 1996 [4] et comprennent actuellement de nombreuses recommandations de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants [5]. Ces limites d'exposition étaient censées protéger contre les effets néfastes sur la santé humaine pouvant résulter d'expositions à court terme (c'est-à-dire aiguës) aux RF et ont été maintenues par la FCC au cours des 26 dernières années. Les limites d'exposition établies par la FCC en 1996 reposaient sur les critères recommandés par le National Council on Radiation Protection & Measurements (NCRP) [6] et l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (ANSI/IEEE) [7, 8]. Les limites sont "basées sur la détermination que des effets biologiques potentiellement dangereux peuvent se produire à un niveau de DAS (débit d'absorption spécifique) de 4,0 W/kg en moyenne sur le corps entier". Le DAS est une mesure du taux d'énergie RF absorbée par unité de masse.

Le seuil pour une réponse comportementale et pour des dommages thermiques aigus dans les tissus sensibles a été considéré comme une exposition qui produisait un DAS sur le corps entier supérieur à 4 W/kg. Parallèlement à l'élaboration des limites d'exposition aux RFR de la FCC, les directives de l'ICNIRP visant à limiter l'exposition aux CEM-RF étaient également fondées sur des études comportementales menées sur des rats et des singes dans les années 1980 [9].

Les effets nocifs qui ont servi de base aux critères d'exposition étaient des changements de comportement observés chez un petit nombre de rats et de singes exposés à des RFR pendant une durée allant jusqu'à 60 minutes à des densités de puissance pour lesquelles le DAS du corps entier était d'environ 4 W/kg ou plus [10, 11]. Ces études ont été menées au début des années 1980 (1980 et 1984, respectivement) par des chercheurs du département de la marine américaine. Par conséquent, 4 W/kg a été identifié comme le SAR seuil pour les effets néfastes sur la santé induits par les RFR. Chez des singes privés de nourriture qui ont été exposés à trois fréquences différentes (225 MHz, 1,3 GHz et 5,8 GHz) pendant des sessions de 60 minutes, les taux de réponse à la pression du levier pour la distribution de boulettes de nourriture ont été réduits par rapport aux sessions d'exposition fictives. Le seuil de DAS pour cette réponse réduite était compris entre 3,2

et 8,4 W/kg [11]. De même, chez des rats privés de nourriture exposés pendant 40 minutes à des rayonnements de 1,28 ou 5,62 GHz, le DAS seuil pour une diminution du taux de réponse était compris entre 3,8 et 4,9 W/kg environ [10]. Dans des études expérimentales au cours desquelles des singes ont été exposés dans une chambre anéchoïque pendant 4 heures à un rayonnement de 1,29 GHz à différentes densités de puissance, une augmentation de la température corporelle moyenne de 0,7 °C a été associée à un DAS du corps entier de 4 W/kg [12]. La perturbation du comportement associée à une augmentation de la température corporelle d'environ 1,0 °C a été considérée comme la mesure la plus sensible des effets nocifs de l'exposition aux CEM RF.

Après avoir établi 4 W/kg comme dose seuil pour les effets nocifs aigus, la FCC [3, 4] et l'ICNIRP [5, 9] ont fixé les limites d'exposition pour les expositions professionnelles contrôlées à 0,4 W/kg de DAS en moyenne sur le corps entier (en appliquant un facteur de sécurité/incertitude de 10). Pour la population générale, les limites d'exposition de la FCC et de l'ICNIRP ont été fixées à 0,08 W/kg de DAS en moyenne sur le corps entier (en appliquant un facteur de sécurité/d'incertitude supplémentaire de 5) pour les fréquences comprises entre 3 MHz et 3 GHz. Les limites d'exposition établies par la FCC et l'ICNIRP ne tiennent pas compte de l'impact des différentes caractéristiques du signal, telles que les modulations de l'onde porteuse ou la pulsation du signal. Les expositions du corps entier pour la population générale sont simplement basées sur les niveaux de puissance moyennés sur des périodes de 30 minutes [3, 5].

En se basant sur les distributions de DAS des expositions du corps entier dans lesquelles les DAS locaux (c.-à-d., corps partiel) ont été estimés à 10 à 20 fois la valeur moyenne, les limites d'exposition locales ont été fixées à un niveau 20 fois supérieur à la limite d'exposition moyenne du corps entier [4, 5, 6, 7]. Pour les expositions professionnelles, les limites d'exposition locale de pointe ont été autorisées jusqu'à 8 W/kg en moyenne sur un cube de tissu de 1 g [4] ou 10 W/kg en moyenne sur 10 g de tissu contigu [9] par la FCC et l'ICNIRP, respectivement. Pour la population générale, les DAS locaux de pointe pour les expositions partielles du corps ne devaient pas dépasser 1,6 W/kg en moyenne sur 1 g de tissu en forme de cube [3], ou 2,0 W/kg en moyenne sur 10 g de tissu en forme de cube [5]. Des valeurs limites plus élevées sont autorisées pour les extrémités. Les extrémités comprennent les mains, les poignets, les pieds, les chevilles et les pavillons (la partie externe de l'oreille), malgré la proximité de l'oreille avec le cerveau. Ces ajustements ont été effectués bien avant l'utilisation généralisée des dispositifs de communication sans fil dans lesquels l'antenne émettrice est généralement maintenue à proximité des organes locaux du corps tels que le cerveau. Le document du NCRP [6] reconnaît que les expositions peuvent être supérieures aux valeurs limites de sécurité recommandées lorsque les personnes se trouvent à proximité d'émetteurs de RFR.

La fixation de limites d'exposition pour la prévention d'un échauffement excessif des tissus était basée sur les hypothèses suivantes : 1) les ondes électromagnétiques aux fréquences utilisées dans les communications sans fil n'ont pas suffisamment d'énergie pour rompre les liaisons chimiques ou ioniser les molécules [13] ; 2) les RFR ne pouvaient

pas endommager l'ADN ; et 3) l'échauffement des tissus était le seul effet biologique possible des rayonnements non ionisants [5, 9, 14, 15, 16]. En ce qui concerne les problèmes potentiels liés à l'environnement et à la santé humaine qui ne sont pas abordés lors de la fixation des limites d'exposition (par exemple, les effets des expositions chroniques ou les effets de la co-exposition de la peau aux RFR et à d'autres agents environnementaux, comme cela se produirait en cas d'exposition à la 5G en combinaison avec la lumière du soleil), l'hypothèse implicite est que ces effets n'ont pas d'importance ou que le facteur de sécurité/incertitude choisi arbitrairement est suffisant pour répondre à ces préoccupations. Dans tous les cas, on s'attend à ce que les hypothèses sous-jacentes appliquées aux évaluations des risques pour la santé soient clairement décrites [1].

Les limites d'exposition aux rayonnements RF sont fondées sur de nombreuses hypothèses ; cependant, les études publiées au cours des 25 dernières années montrent que la plupart de ces hypothèses ne sont pas étayées par des preuves scientifiques. Dans le rapport du NCRP [6], les auteurs ont noté que lorsque les effets biologiques des rayonnements RF seront mieux compris, les directives d'exposition devront être évaluées et éventuellement révisées. Le document ANSI/IEEE [7] note également que les effets de l'exposition chronique ou les preuves d'interactions non thermiques pourraient entraîner une révision des normes d'exposition. Malheureusement, ces recommandations n'ont jamais été mises en œuvre. Les agences responsables de la protection de la santé publique devraient tester et valider les hypothèses de sécurité des expositions qui pourraient avoir des effets néfastes sur la santé humaine ou environnementale avant que des expositions généralisées ne se produisent, et non après.

Dans cet article, nous mettons en évidence des études qui démontrent la fausseté des hypothèses inhérentes aux directives de la FCC/ICNIRP concernant les limites d'exposition aux rayonnements RF, et nous constatons que ces limites ne protègent pas la santé humaine et environnementale. Quatorze hypothèses qui sous-tendent les limites d'exposition aux RFR établies dans les années 1990 et réaffirmées en 2020 par la FCC [4, 5] et l'ICNIRP [5, 9] sont abordées dans cet article et sont présentées à la figure 1. (cf. PDF en anglais pour consulter le document figure 1 : les détails sont traduits ci-dessous )

Hypothèses sous-tendant les limites d'exposition aux rayonnements RF et preuves scientifiques démontrant que ces hypothèses ne sont pas valables

- A. Effets des rayonnements RF à des expositions inférieures au seuil putatif du DAS de 4 W/kg

**Hypothèse 1)** Il existe un seuil d'exposition pour tout effet néfaste sur la santé causé par les rayonnements RF ; dans la gamme de fréquences de 100 kHz à 6 GHz, il s'agit d'une exposition du corps entier qui dépasse un DAS de 4 W/kg. Tout effet biologique des rayonnements RF supérieur à l'exposition seuil est dû à l'échauffement des tissus.

## **Cardiomyopathie et cancérogénicité**

En réponse à une demande du Center for Devices and Radiological Health (Centre pour les appareils et la santé radiologique) de la Food and Drug Administration (FDA) [17], le National Toxicology Program (NTP) a mené des études de toxicité et de cancérogénicité du rayonnement des téléphones cellulaires (modulés par CDMA ou GSM) chez des rats et des souris exposés à des RFR à des fréquences de 900 MHz et 1800 MHz, respectivement [18, 19]. Les expositions aux RFR pendant une période allant jusqu'à deux ans ont eu lieu dans des chambres réverbérantes pendant 18 heures par jour, selon un cycle continu de 10 minutes de marche et de 10 minutes d'arrêt. Chez les rats, les niveaux de DAS du corps entier pendant les cycles de 10 minutes étaient de 0, 1,5, 3 ou 6 W/kg.

Les principaux résultats histopathologiques de l'étude du NTP sur les rats mâles [18] comprenaient des augmentations liées à la dose de la cardiomyopathie, une incidence accrue de cancers et de lésions préneoplasiques dans le cœur (schwannome et hyperplasie des cellules de Schwann) et le cerveau (gliome et hyperplasie des cellules gliales), des augmentations des tumeurs et des hyperplasies de la prostate, des augmentations significatives des tumeurs des glandes surrénales et des augmentations significatives de l'incidence globale des néoplasmes bénins ou malins dans tous les organes dans les groupes de 3 W/kg. L'incidence de la cardiomyopathie a également augmenté chez les rats femelles exposés au GSM, et des augmentations significatives des dommages à l'ADN ont été constatées chez les rats et les souris [18, 19]. De même, une étude antérieure de Chou et al. [20] a révélé une augmentation significative (3,6 fois) de l'incidence des néoplasmes malins primaires chez les rats mâles exposés à des RFR pulsés de 2450 MHz pendant 25 mois (21,5 heures/jour) à un DAS allant de 0,15 à 0,4 W/kg.

Un examen externe par des pairs, d'une durée de trois jours, des études du NTP a confirmé l'existence de "preuves évidentes d'une activité cancérogène" chez les rats mâles pour les schwannomes cardiaques, et de "certaines preuves d'une activité cancérogène" pour les gliomes cérébraux et les tumeurs des glandes surrénales à la suite d'une exposition aux rayonnements RF modulés par GSM ou CDMA [21]. En outre, une étude à vie menée par l'Institut Ramazzini a signalé une augmentation significative des schwannomes cardiaques chez des rats mâles exposés 19 heures par jour à des RF modulées par GSM 1800 MHz à une intensité de champ de 50 V/m, ce qui équivaut à un DAS pour le corps entier de 0,1 W/kg [22]. L'incidence de l'hyperplasie des cellules de Schwann du cœur a également augmenté dans ce groupe d'exposition. Ces résultats sont cohérents avec les résultats de l'étude du NTP et démontrent que l'effet prolifératif du RFR modulé dans les cellules de Schwann du cœur est un résultat reproductible qui peut se produire à des doses bien inférieures au seuil supposé du SAR du corps entier de 4 W/kg.

L'ICNIRP [23] a rejeté les preuves de cancérogénicité du RFR fournies par les études du NTP [18] et de l'Institut Ramazzini [22] sur la base de leur critique antérieure de ces études [24]. Cependant, cette critique a démontré un manque regrettable de compréhension ainsi qu'une mauvaise représentation de la conception, de la conduite et de

l'interprétation des études expérimentales de cancérogénicité sur des modèles animaux [25], ainsi qu'un manque d'appréciation de la remarquable concordance entre les réponses tumorales observées chez les animaux expérimentaux et celles identifiées dans les études épidémiologiques sur le cancer des utilisateurs de téléphones mobiles décrites dans l'hypothèse n° 6.

Ni les effets de chauffage ni le stress thermique ne sont susceptibles d'être à l'origine des effets néfastes sur la santé observés dans l'étude NTP [18], puisqu'aucun dommage tissulaire n'a été observé dans une étude de 28 jours aux mêmes DAS, qu'il n'y a pas eu d'effet significatif sur le poids corporel au cours de l'étude de 2 ans et qu'il n'y a pas eu d'observations cliniques liées à l'exposition qui indiqueraient un stress thermique ou métabolique. En outre, une étude pilote thermique préliminaire a démontré que la température corporelle n'augmentait pas de plus de 10 C aux niveaux d'exposition utilisés dans les études chroniques [26], et rien ne prouve qu'une petite variation de la température corporelle associée aux expositions aux RFR dans l'étude du NTP puisse provoquer les types d'effets cancérogènes observés. Les résultats similaires des RFR modulés par GSM sur les cellules de Schwann par l'Institut Ramazzini [22] à des DAS du corps entier beaucoup plus faibles confirment que ces effets sont indépendants du réchauffement des tissus.

### **Effets neurologiques**

Bien que les limites d'exposition de la FCC et de l'ICNIRP soient basées sur une dose seuil putative de 4 W/kg en raison des perturbations comportementales observées à des doses plus élevées chez les rats et les singes [10, 11], de nombreuses études ont montré des déficits cohérents et reproductibles dans l'apprentissage spatial et la mémoire chez les animaux de laboratoire exposés aux rayonnements RF à des DAS inférieurs à 4 W/kg. Parmi les exemples d'expositions démontrant ces effets neurologiques, citons le GSM 900 MHz à 0,41-0,98 W/kg, 2 heures/jour pendant 4 jours chez les souris [27] ; le GSM 900 MHz à 0,52-1,08 W/kg, 2 heures/jour pendant 1 mois chez les rats [28] ; le GSM 900 MHz à 1,15 W/kg, 1 heure/jour pendant 28 jours chez les rats [29]. /jour pendant 28 jours chez des rats [29] ; 900 MHz RFR pulsé à 0,3-0,9 W/kg pendant 6 hr./jour chez des rats de la conception à la naissance et testé à l'âge de 30 jours [30] ; 900 MHz GSM et 1966 MHz UMTS à 0,4 W/kg pendant 6 mois chez des rats [31] ; et 900 MHz EMF à ondes continues à 0,016 W/kg 3 hr./jour pendant 28 jours chez des rats [32]. Les études citées ci-dessus ne sont pas les seules à montrer ces effets, mais elles démontrent clairement que l'exposition aux RF à un DAS de 4 W/kg n'est pas une dose seuil pour les effets neurologiques chez les rongeurs. Les effets du rayonnement RF sur l'apprentissage spatial et la mémoire indiquent que l'hippocampe est un site cible de ces expositions. Pour une liste plus complète des effets neurologiques des RF rapportés entre 2007 et 2017, voir Lai [33].

En outre, de nombreuses études ont signalé des changements dans les activités électriques du cerveau chez les sujets humains, mesurés par électroencéphalographie (EEG), y compris des troubles du sommeil à la suite d'expositions uniques au rayonnement

RF des téléphones cellulaires. Cela n'est pas surprenant puisque le système nerveux transmet des messages basés sur des signaux électriques générés par les cellules nerveuses. Une diminution de la protéine  $\beta$ -trace, qui est une enzyme clé dans la synthèse d'une neurohormone favorisant le sommeil, a été observée chez de jeunes adultes ayant cumulé un nombre élevé d'heures d'utilisation de téléphones portables [34]. Un autre effet fréquemment signalé du rayonnement RF est l'augmentation de la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique chez les rats à des DAS bien inférieurs à 4 W/kg, par exemple [32, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41]. Le stress oxydatif induit dans le cerveau des animaux exposés aux CEM-FR a été associé aux effets neurologiques observés [42]. Bien que de nombreuses études n'aient pas observé de changements significatifs dans les effets neurologiques chez l'homme et que plusieurs études n'aient pas observé de perméabilité accrue de la barrière hémato-encéphalique chez les modèles animaux [33], les différences de fréquence, de modulation, de durée d'exposition et de direction des ondes incidentes sur le sujet exposé, ainsi que les différences de propriétés diélectriques et la taille et la forme du sujet exposé expliquent probablement les différences dans les effets observés [43, 44].

### **Domages aux spermatozoïdes**

L'effet des micro-ondes non ionisantes sur les testicules (dégénérescence testiculaire chez la souris) a été signalé pour la première fois il y a 60 ans [45]. Depuis lors, et avec l'augmentation rapide de l'utilisation d'appareils émettant des CEM RF, de nombreuses études ont examiné les effets testiculaires des RFR et les associations potentielles avec l'infertilité masculine [46,47,48,49,50]. Des études humaines et animales ont montré que le testicule est l'un des organes les plus sensibles aux expositions aux RF-EMF et que le fait de garder un téléphone portable dans la poche du pantalon en mode conversation peut affecter les paramètres de fertilité, par exemple la motilité des spermatozoïdes, leur nombre, leur morphologie et leur apoptose [48, 51]. Des méta-analyses d'études épidémiologiques publiées sur l'impact du rayonnement des téléphones portables sur la qualité du sperme chez les hommes adultes ont révélé des diminutions significatives de la motilité, de la viabilité et/ou de la concentration des spermatozoïdes associées à l'utilisation du téléphone portable [52,53,54,55]. Plusieurs facteurs physiques associés aux conditions d'exposition peuvent affecter les résultats des études humaines, notamment la profondeur de pénétration de l'énergie, la durée de l'appel, le type de technologie de transmission, la distance entre l'appareil et le corps ou le testicule, et la densité de puissance avec un DAS défini. Par exemple, Zilberlicht et al. [56] ont observé des taux plus élevés de concentrations anormales de spermatozoïdes chez les hommes qui tenaient leur téléphone à moins de 50 cm de leur aine.

Les effets des RFR sur les paramètres de reproduction chez l'homme sont cohérents avec les résultats des études expérimentales sur les animaux et des études in vitro. Par exemple, l'exposition de sperme humain à un rayonnement de 850 MHz émis par des téléphones mobiles pendant une heure à un DAS de 1,46 W/kg a entraîné une diminution significative de la viabilité des spermatozoïdes, associée à une augmentation des espèces réactives de l'oxygène (ERO) [50] ou à une augmentation de la fragmentation de l'ADN

des spermatozoïdes [57]. L'exposition de spermatozoïdes humains isolés à des RF-EMF de 1,8 GHz a réduit de manière significative la motilité des spermatozoïdes et induit la génération de ROS à un DAS de 1,0 W/kg, et a augmenté de manière significative les dommages oxydatifs à l'ADN et la fragmentation de l'ADN à un DAS de 2,8 W/kg [58].

Voici quelques exemples d'effets de la radiofréquence sur les facteurs de fertilité masculine dans des études sur des animaux de laboratoire à des DAS inférieurs à 4 W/kg : une diminution du nombre de spermatozoïdes et une augmentation des ROS chez des rats exposés à des fréquences de téléphone mobile 2 heures par jour, pendant 35 jours (DAS = 0,9 W/kg) [59] ; une augmentation du stress oxydatif, de la 8-hydroxy-désoxyguanosine (8-OHdG) et des ruptures de brins d'ADN dans les testicules de rats exposés à 900 MHz (DAS = 0,166 W/kg), 1800 MHz (0,166 W/kg) ou 2100 MHz (0,174 W/kg) 2 heures par jour pendant 6 mois [60] ; une augmentation des ROS, une diminution du nombre de spermatozoïdes et une altération de la morphologie des spermatozoïdes chez des rats exposés aux rayonnements d'un téléphone mobile 3G de 900 MHz (DAS = 0,26 W/kg) 2 heures par jour pendant 45 jours [61] ; une diminution de la qualité des spermatozoïdes chez des rats dont le scrotum a été exposé localement à un rayonnement LTE 4G de 2 575 à 2 635 MHz pour smartphone pendant 1 minute à intervalles de 10 minutes 6 heures par jour pendant 150 jours [62] ; une altération du développement des testicules à l'âge de 35 jours chez la progéniture mâle de rats gravides exposés à un rayonnement RFR de 2,45 GHz (DAS = 1,75 W/kg) 2 heures/jour pendant toute la durée de la gestation [63] ; diminution de la motilité des spermatozoïdes chez des souris exposées à des RFR de 905 MHz (DAS = 2,2 W/kg) 12 heures/jour pendant 5 semaines, et augmentation de la formation de ROS et de la fragmentation de l'ADN après une semaine d'exposition [64]. Bien que des études négatives aient également été rapportées, il est important de se rappeler que les résultats des études expérimentales peuvent être affectés par des différences dans les conditions d'exposition, notamment la fréquence, la modulation, la polarisation, les champs électromagnétiques parasites, le DAS local, la durée d'exposition et les méthodes d'analyse [43, 44].

Bien que le mécanisme des effets testiculaires de l'exposition à des niveaux non thermiques de RFR ne soit pas entièrement connu, de nombreuses études sur des rats et des souris, ainsi que sur le sperme humain, ont trouvé des associations entre les effets négatifs sur les paramètres de fertilité et les augmentations des ROS et/ou des dommages à l'ADN [48, 51, 57, 58, 60, 61, 64, 65, 66, 67, 68]. Ainsi, les effets négatifs des RF sur la qualité du sperme sont probablement dus en grande partie à la génération induite de ROS.

**Hypothèse 2)** Le rayonnement RF est incapable de causer des dommages à l'ADN autrement que par chauffage ; il n'existe pas de mécanisme pour les dommages non thermiques à l'ADN.

En 2009, l'ICNIRP [16] a affirmé que "les photons de faible énergie du rayonnement RF sont trop faibles pour affecter l'ionisation ou causer des dommages significatifs aux molécules biologiques telles que l'ADN, dans des circonstances ordinaires". Cependant,



des dommages à l'ADN et d'autres effets génotoxiques ont été observés dans de nombreuses études sur les RF de faible intensité dans des modèles animaux et chez les humains. Par exemple, l'étude du NTP a révélé des augmentations statistiquement significatives des lésions de l'ADN dans les cellules cérébrales des rats et des souris exposés par rapport aux témoins fictifs [18, 19, 69], et Akdag et al. [70] ont constaté des augmentations statistiquement significatives des lésions de l'ADN dans les cellules ciliées du conduit auditif chez des hommes âgés de 30 à 60 ans qui ont utilisé des téléphones mobiles pendant 10 ans à raison de 0-30 min/jour, 30-60 min/jour ou plus de 60/min/jour par rapport aux personnes qui n'ont pas utilisé de téléphones mobiles. Dans cette dernière étude, l'étendue des dommages à l'ADN augmentait avec la durée d'exposition quotidienne. Dans un examen des études publiées sur les effets génétiques des CEM ELF et RF, Lai [71] a répertorié plus de 150 études dans lesquelles les expositions non thermiques aux RFR ont entraîné une augmentation des lésions de l'ADN, des aberrations chromosomiques ou de la formation de micronoyaux.

En outre, il est bien établi que les dommages à l'ADN peuvent également être causés par des processus indirects, tels que la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), et de nombreuses études ont démontré des dommages à l'ADN à des expositions inférieures au seuil putatif du SAR de 4 W/kg. Plus de 120 études publiées ont démontré des effets oxydatifs associés à l'exposition à des RFR de faible intensité (fichier supplémentaire 1 : annexe 1). Une analyse des études expérimentales sur les effets moléculaires du rayonnement RF de faible intensité (RFR) dans les systèmes biologiques a révélé que la majorité (93 études sur 100) a démontré l'induction d'effets oxydatifs [72]. Des études plus récentes (de 2017) ont révélé que les 30 publications pertinentes (100 %) ont détecté des effets oxydatifs significatifs lors d'expositions aux RFR de faible intensité, et la plupart de ces études ont utilisé des RFR modulés provenant de dispositifs de communication sans fil.

La production accrue de ROS dans les cellules vivantes peut être causée par des champs magnétiques faibles modifiant les taux de recombinaison des paires de radicaux à courte durée de vie générés par les processus métaboliques normaux, ce qui entraîne des changements dans les concentrations de radicaux libres [73], ou par des CEM de faible intensité à extrêmement basse fréquence (ELF) entraînant des altérations des canaux ioniques dépendant du voltage dans les membranes cellulaires, ce qui provoque des changements dans le flux de cations à travers les membranes [74]. Ces mécanismes s'appliquent à la fois aux CEM ELF et aux RFR modulés par des champs pulsés à des fréquences extrêmement basses. D'autres mécanismes biophysiques par lesquels les RF-EMF non thermiques peuvent avoir des effets biologiques en interagissant avec les processus cellulaires normaux ont été décrits [75].

L'augmentation de l'activité de la NADH oxydase est un autre mécanisme par lequel les RF peuvent augmenter la production de ROS. Les NADH oxydases, qui sont des enzymes associées à la membrane et qui catalysent la réduction d'un électron de l'oxygène en radical superoxyde en utilisant le NADH comme donneur d'électrons, ont été identifiées

comme les principaux médiateurs des interactions des RF dans les systèmes cellulaires [76]. Une augmentation significative (3 fois) de l'activité de la NADH oxydase a été mesurée dans les membranes plasmiques purifiées de cellules HeLa exposées à 875 MHz pendant 5 ou 10 min à une densité de puissance de 200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Cette intensité d'exposition est nettement inférieure à la limite de sécurité de l'ICNIRP [5].

La principale source de ROS dans les cellules vivantes est la chaîne de transport d'électrons mitochondriale, où la fuite d'électrons génère des radicaux superoxydes en raison de la réduction partielle de l'oxygène [77]. Un effet dose-dépendant de l'exposition aux RFR modulés à 1,8 GHz (DAS = 0,15 et 1,5 W/kg) sur la production de ROS mitochondriaux a été détecté dans les cellules germinales des spermatogonies de souris [65]. L'exposition d'embryons de cailles à des RFR modulés d'intensité extrêmement faible (GSM 900 ou 1800 MHz, 0,25 ou 0,32  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) pendant les premiers jours de l'embryogenèse a entraîné une surproduction robuste de radical superoxyde et d'oxyde d'azote dans les mitochondries des cellules embryonnaires [78, 79]. Ainsi, de multiples mécanismes pour la production accrue de ROS par le rayonnement RF de faible intensité ont été démontrés.

De nombreuses études ont été publiées sur les effets mutagènes des RF-FEM de faible intensité, en particulier des études qui ont identifié des augmentations des niveaux d'un marqueur spécifique des dommages oxydatifs de l'ADN et un facteur de risque de cancer, la 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine (8-OHdG) [58, 60, 78,79,80,81,82,83,84]. Par exemple, le niveau de 8-OHdG dans les spermatozoïdes humains a augmenté de manière significative après une exposition in vitro pendant 16 heures à 1,8 GHz à un niveau de puissance de 2,8 W/kg et a été corrélé avec les niveaux de génération de ROS [58]. De même, l'exposition d'embryons de cailles in ovo à des 900 MHz modulés par GSM de 0,25  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  pendant 1,5, 5 ou 10 jours a été suffisante pour produire une augmentation significative, deux fois plus importante, des niveaux de 8-OHdG dans les cellules embryonnaires [79]. Les échantillons de sang de cordon ombilical et de tissu placentaire obtenus après l'accouchement chez les femmes ayant utilisé des téléphones portables pendant la grossesse présentaient des niveaux significativement plus élevés de paramètres de stress oxydatif, notamment de 8-OHdG et de malondialdéhyde, par rapport au sang de cordon et au tissu placentaire des femmes n'ayant pas utilisé de téléphones portables pendant la grossesse [85]. En outre, les lésions de l'ADN, analysées par le test des comètes, ont augmenté de manière significative dans les lymphocytes du sang de cordon obtenus de femmes ayant utilisé des téléphones mobiles pendant la grossesse par rapport aux lymphocytes du sang de cordon obtenus de femmes n'ayant pas utilisé de téléphones mobiles.

Étant donné que les rayonnements RF de faible intensité n'ont pas suffisamment d'énergie pour ioniser les molécules d'ADN et que l'augmentation de la production de ROS dans les cellules vivantes due aux expositions aux RF-EMF a été documentée de manière fiable, un effet indirect de ce type de rayonnement est la formation de dommages oxydatifs à l'ADN. La forme la plus agressive de ROS pouvant causer des

dommages oxydatifs à l'ADN est le radical hydroxyle ; cette espèce réactive d'oxygène peut être générée à partir du radical superoxyde et du peroxyde d'hydrogène [86], qui peuvent être produits dans les cellules vivantes exposées à un rayonnement RF de faible intensité. Le rayonnement ultraviolet (UVR, qui englobe les UVA, UVB et UVC), classé par le CIRC comme "cancérogène pour l'homme", peut également causer des dommages indirects à l'ADN en générant des ROS [87]. Ainsi, les RFR et les UV, qui peuvent induire de manière similaire des dommages oxydatifs à l'ADN, peuvent augmenter le risque de cancer par un mécanisme similaire.

La production accrue de ROS et l'épuisement de la capacité antioxydante dans les cellules vivantes exposées à un rayonnement RF de faible intensité peuvent entraîner des lésions oxydatives de l'ADN. L'induction du stress oxydatif, qui est une caractéristique clé de nombreux agents cancérogènes humains [88], y compris les rayons UV et l'amiante, peut également entraîner la génotoxicité et la cancérogénicité des rayonnements RF non ionisants sans causer de dommages directs à l'ADN.

**Hypothèse 3)** Deux à sept expositions aux rayonnements RF d'une durée maximale d'une heure sont suffisantes pour exclure les effets indésirables pour toute durée d'exposition, y compris les expositions chroniques.

Les études comportementales sur 8 rats mâles et 5 singes mâles qui ont servi de base aux limites d'exposition aux rayonnements RF adoptées par la FCC et l'ICNIRP comportaient 2 à 7 séances d'exposition d'une durée de 40 minutes pour les rats [10] et 3 séances d'exposition d'une durée de 60 minutes pour les singes à chaque densité de puissance [11]. Des études comportementales menées par D'Andrea et al. sur des rats et des singes ont apporté un soutien supplémentaire au seuil de DAS de 4 W/kg dans la gamme de fréquences de 100 kHz à 6 GHz [89, 90]. Cependant, D'Andrea et al. [91, 92] ont également rapporté que l'exposition de rats à des ondes continues de 2450 MHz RFR pendant 14 ou 16 semaines a entraîné des différences significatives dans l'activité comportementale entre les rats exposés au simulacre et les rats exposés au RFR à des DAS moyens de 0,7 W/kg et à 1,23 W/kg, ce qui indique que 4 W/kg n'est pas un DAS seuil avec des durées d'exposition prolongées. Depuis lors, de nombreuses études ont montré que les réponses aux RFR non thermiques dépendent à la fois de l'intensité et de la durée de l'exposition [93]. Il est important de noter que la même réponse a été observée avec une intensité d'exposition plus faible mais une durée d'exposition prolongée qu'avec une intensité d'exposition plus élevée et une durée plus courte [94].

Reconnaissant que les limites d'exposition ne tiennent pas compte des effets potentiels sur la santé après des expositions à long terme aux rayonnements RF émis par les appareils sans fil que les gens subissent, la FDA [17] a proposé les rayonnements RF au NTP pour des études de toxicologie et de cancérogénicité chroniques, car elle craint que "les directives d'exposition existantes soient basées sur la protection contre les lésions aiguës dues aux effets thermiques de l'exposition aux RFR et ne protègent pas contre les effets non thermiques des expositions chroniques". Les effets néfastes sur la santé mentionnés dans l'hypothèse 1, y compris la cardiomyopathie, la cancérogénicité, les

dommages aux spermatozoïdes et les effets neurologiques, ainsi que les études épidémiologiques humaines qui seront décrites dans l'hypothèse 6, sont survenus lors d'expositions beaucoup plus longues au rayonnement RF que les durées d'exposition utilisées dans les études aiguës sur les rats [10] et les singes [11]. Par conséquent, les études d'exposition comportementale aiguë qui ont servi de base aux limites d'exposition aux rayonnements RF établies par la FCC et l'ICNIRP sont inadéquates pour identifier et caractériser les effets indésirables des rayonnements RF après des durées d'exposition plus longues. Ni les limites d'exposition établies dans les années 1990 par la FCC [4] ou par l'ICNIRP [9], ni celles réaffirmées plus récemment par ces groupes [3, 5] ne traitent des risques pour la santé associés à une exposition à long terme aux rayonnements RF.

**Hypothèse 4)** Les rayonnements RF n'entraîneraient aucun effet supplémentaire en cas de co-exposition à d'autres agents environnementaux.

Les limites d'exposition actuelles de la FCC/ICNIRP ne tiennent pas compte des effets interactifs du rayonnement RF avec d'autres agents environnementaux, même si de tels effets ont été documentés. Les interactions des rayonnements RF avec d'autres agents peuvent entraîner des effets antagonistes ou synergiques, c'est-à-dire des effets qui sont supérieurs à la somme de chaque agent seul.

Dans l'évaluation du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) concernant la cancérogénicité des CEM RF [44], le groupe de travail d'experts a noté que 4 des 6 études de co-carcinogénèse disponibles à l'époque montraient une augmentation des réponses à l'exposition aux CEM RF. L'une de ces études faisait état d'effets cocarcinogènes du rayonnement RF modulé par l'UMTS à 4,8 W/m<sup>2</sup> sur le foie et les poumons de souris qui avaient été traitées in utero avec l'éthylnitrosourée (ENU), un agent cancérogène [95] ; l'incidence des cancers du foie et des poumons était plus élevée chez les souris exposées à l'ENU et au rayonnement RF que chez les témoins en cage, les témoins fictifs et l'ENU seul. Après l'évaluation du CIRC, Lerchl et al. [96] ont reproduit le plan expérimental de Tillmann et al. [95] en exposant des souris à des RF-FEM à des niveaux de DAS du corps entier de 0 (simulacre), 0,04, 0,4 et 2 W/kg. Des augmentations significatives des adénomes pulmonaires et/ou des carcinomes hépatiques ont été observées à tous les niveaux d'exposition. Lerchl et al. [96] ont conclu que leurs "résultats sont une indication très claire que les effets de promotion des tumeurs d'une exposition aux RF-EMF tout au long de la vie peuvent se produire à des niveaux supposés trop faibles pour provoquer des effets thermiques." Ainsi, la reproductibilité des effets promoteurs de tumeurs des RF à des niveaux d'exposition non thermiques a été démontrée.

D'autres exemples d'effets synergiques signalés comprennent les résultats des études suivantes. Des effets synergiques sur les dommages causés aux lymphocytes humains ont été observés lors de la co-exposition au RFR (RFR 1,8 GHz, DAS 3 W/kg) et à 2 mutagènes différents, à savoir la mitomycine C ou le 4-nitroquinoline-1-oxyde [97], ou lors de la co-exposition à la lumière ultra-légère (UVC) [98]. Un effet synergique a été constaté sur les lésions de l'ADN dans des cellules sanguines humaines exposées à un rayonnement de 2450 MHz (5 mW/cm<sup>2</sup>), puis à la mitomycine C [99]. Un effet de potentialisation des

lésions de l'ADN a été observé dans des cultures de cellules de mammifères exposées à des RF-EMF de 835 MHz modulées par CDMA (DAS = 4 W/kg) et aux clastogènes cyclophosphamide ou 4-nitroquinoline-1-oxyde [100]. L'expression génétique a été modifiée dans les cellules neuronales et gliales de rats prétraités avec du lipopolysaccharide, un agent neuroinflammatoire, puis exposés à un rayonnement modulé GSM de 1800 MHz (DAS = 3,22 W/kg) pendant 2 heures [101]. Chez les rats prétraités avec de la picrotoxine, un produit chimique qui induit des crises, l'exposition aux rayonnements RF modulés GSM 900 MHz pulsés des téléphones mobiles a augmenté les changements régionaux dans l'activité cérébrale et l'expression de c-Fos [102, 103].

Les limites d'exposition basées sur l'exposition aux seuls rayonnements RF entraîneront une sous-estimation du risque réel et une protection inadéquate de la santé humaine dans des conditions où les co-expositions à d'autres agents toxiques entraînent des effets indésirables synergiques [104].

## **B. Facteurs affectant la dosimétrie**

**Hypothèse 5)** Les effets sur la santé dépendent uniquement de la valeur moyenne dans le temps du DAS ; les modulations, la fréquence ou les impulsions de l'onde porteuse n'ont d'importance que dans la mesure où elles influencent le DAS.

Les limites d'exposition aux RFR de la FCC et de l'ICNIRP sont basées sur les DAS pour les fréquences jusqu'à 6 GHz et sur les densités de puissance pour les fréquences entre 6 GHz et 300 GHz, moyennées sur des intervalles de 6 minutes ou 30 minutes pour les zones locales et les expositions du corps entier [3, 5]. Cependant, la dosimétrie moyennée dans le temps ne permet pas de saisir les caractéristiques uniques des RFR modulés ou pulsés. Par exemple, la modulation GSM peut impliquer jusqu'à 8 canaux vocaux avec une durée de 0,577 msec pour chaque canal. Ainsi, l'exposition à la modulation GSM peut être 8 fois plus élevée pendant chaque impulsion de créneau temporel par rapport à l'exposition à une onde continue à des DAS équivalents moyennés dans le temps. En outre, comme indiqué dans l'hypothèse n° 14, les impulsions répétitives de données en rafales avec de courtes expositions à la 5G peuvent provoquer des pics de température localisés dans la peau [105]. L'impact des rayonnements pulsés sur les activités biologiques au niveau moléculaire ou cellulaire n'est pas pris en compte avec la dosimétrie à moyenne temporelle.

Une autre question non prise en compte par la dosimétrie à moyenne temporelle est l'importance des modulations à basse fréquence sur les systèmes biologiques. Comme nous l'avons vu dans l'hypothèse n°2, une production accrue de ROS dans les cellules vivantes et des dommages à l'ADN ont été démontrés lors de l'exposition aux modulations basse fréquence des ondes porteuses radiofréquence [106]. Les limites d'exposition basées sur la dosimétrie du DAS moyenné dans le temps ou sur la densité de puissance, sans tenir compte de l'impact des modulations d'amplitude ou de fréquence, ne traitent pas de manière adéquate les effets potentiels sur la santé des expositions aux RFR dans le monde réel. Il existe de nombreuses preuves que divers effets de l'exposition aux RFR dépendent des modulations de l'onde porteuse, de la fréquence ou des impulsions [43,

107, 108]. Contrairement à l'ICNIRP/FCC, la monographie du CIRC sur la cancérrogénicité des RFR note que les effets des RFR peuvent être influencés par des caractéristiques d'exposition telles que la durée d'exposition, la fréquence de la porteuse, le type de modulation, la polarisation, l'intermittence de l'exposition et les champs électromagnétiques de fond [44].

### **C. Risque de tumeur cérébrale chez l'homme**

**Hypothèse 6)** Les multiples études humaines qui établissent des liens entre l'exposition au rayonnement RF des téléphones cellulaires et l'augmentation du risque de tumeur cérébrale sont faussées en raison des biais dans les études cas-témoins publiées et parce que les taux de cancer du cerveau sont demeurés stables depuis que l'utilisation des appareils de communication sans fil s'est répandue.

Bien qu'il ait été affirmé que "les limites actuelles pour les téléphones portables sont acceptables pour protéger la santé publique" parce que "même avec une utilisation quotidienne fréquente par la grande majorité des adultes, nous n'avons pas vu d'augmentation d'événements comme les tumeurs cérébrales" [109], la base de données SEER (Surveillance, Epidemiology, and End Results Program) montre une diminution annuelle de 0,3 % pour toutes les tumeurs cérébrales, mais une augmentation de 0,3 % par an pour le glioblastome aux États-Unis entre 2000 et 2018 (<https://seer.cancer.gov/explorer/>). Le plus inquiétant est que l'augmentation annuelle pour le glioblastome était de 2,7 % par an pour les personnes de moins de 20 ans. En outre, Zada et al. [110] ont signalé que l'incidence du glioblastome multiforme (GBM) dans le lobe frontal, le lobe temporal et le cervelet a augmenté aux États-Unis entre 1992 et 2006, et Philips et al. [111] ont également signalé une augmentation statistiquement significative de l'incidence du GBM dans les lobes frontal et temporal du cerveau au Royaume-Uni entre 1995 et 2015. En Suède, les taux de tumeurs cérébrales enregistrés dans le registre national suédois des patients hospitalisés et dans le registre suédois des cancers ont augmenté entre 1998 et 2015 [112]. En outre, il faut savoir que l'exposition cumulée, l'utilisation du côté de la tête et le temps de latence pour la formation de tumeurs à partir du RFR ne sont pas entièrement pris en compte dans les registres nationaux du cancer. Ainsi, l'affirmation selon laquelle les tendances des taux d'incidence du cancer du cerveau n'ont pas augmenté depuis l'introduction des téléphones mobiles est à la fois fausse et trompeuse. La spécificité de l'effet doit être prise en compte dans ces analyses de tendances.

Les études cas-témoins, qui utilisent des méthodes scientifiques fiables, ont systématiquement mis en évidence des risques accrus de tumeurs cérébrales de type gliome et de neurinome acoustique en cas d'utilisation intensive et prolongée de téléphones mobiles. Cette association a été évaluée au CIRC en 2011 par 30 participants experts qui ont conclu que le rayonnement de radiofréquence (RF) est un cancérogène humain " possible " [44]. En revanche, l'étude de cohorte danoise très citée sur les " utilisateurs de téléphones mobiles " [113] n'a pas été prise en compte par le CIRC en raison de graves lacunes méthodologiques dans la conception de l'étude, notamment des erreurs de classification de l'exposition [44, 114].

Les résultats des méta-analyses du risque de gliome et de neurinome acoustique provenant d'études cas-témoins suédoises menées par Hardell et ses collaborateurs [115, 116], de l'étude Interphone menée dans 13 pays [117] et de l'étude française de Coureau et al. [118] sont présentés dans le tableau 1 sous forme de rapports de cotes (RC) avec des intervalles de confiance à 95 %. Pour le gliome, quelle que soit sa localisation dans la tête, une augmentation statistiquement significative de près de deux fois a été trouvée, tandis que pour l'utilisation ipsilatérale du téléphone portable (tumeur et utilisation du téléphone du même côté de la tête), le risque était multiplié par 2,5. Ces OR sont basés sur les groupes de chaque étude ayant la catégorie la plus élevée de temps d'appel cumulé, qui étaient  $\geq 1640$  h dans l'étude Interphone [117, 119] et les études suédoises [115, 116], et  $\geq 896$  h dans l'étude de Coureau et al. [118]. Une diminution de la survie parmi les cas de gliome, en particulier d'astrocytome de grade IV, a été associée à une utilisation cumulative élevée et à long terme des téléphones sans fil [120]. Un risque accru pour le type mutant de l'expression du gène p53 dans la zone périphérique des astrocytomes de grade IV était associé à l'utilisation de téléphones mobiles pendant  $\geq 3$  heures par jour. L'augmentation de cette mutation était significativement corrélée à une durée de survie globale plus courte [121].

**Tableau 1** Rapports de cotes (RC) avec intervalle de confiance (IC) à 95 % pour le gliome et le neurinome acoustique dans les études cas-témoins dans la catégorie la plus élevée pour l'utilisation cumulée de téléphones mobiles en heures.

Tableau complet ( cf. PDF en anglais impossible à la traduction deepl )

Pour le neurinome acoustique, le risque était significativement augmenté avec l'exposition cumulative et l'utilisation ipsilatérale par un facteur de 2,7. Un modèle à effets aléatoires, basé sur un test d'hétérogénéité, a été utilisé pour les méta-analyses de ces études publiées. Le volume tumoral du neurinome de l'acoustique a augmenté pour 100 heures d'utilisation cumulée de téléphones sans fil dans l'étude suédoise et les années de latence, ce qui indique une promotion tumorale [115].

D'autres études cas-témoins sur l'utilisation des téléphones mobiles ont également signalé un risque accru de neurinome acoustique [122,123,124]. Ces études n'ont pas été incluses dans la méta-analyse parce que les données sur l'utilisation cumulative du téléphone portable avec le nombre de cas et de témoins n'étaient pas fournies ou qu'il y avait d'autres lacunes. Il convient également de noter que les risques de tumeurs étaient accrus dans des sous-ensembles de l'étude Interphone ; par exemple, le risque de neurinome acoustique pour une utilisation  $\geq 10$  ans et ipsilatérale était presque multiplié par deux dans les pays d'Europe du Nord ayant participé à l'étude Interphone [125].

Certains ont affirmé que les associations entre l'augmentation du risque de cancer du cerveau et l'exposition au rayonnement RF des téléphones cellulaires dans les études cas-témoins publiées pouvaient être attribuables à des biais de rappel et/ou de sélection [5, 109]. Cependant, une nouvelle analyse des données canadiennes incluses dans l'étude Interphone a montré qu'il n'y avait pas d'effet sur le risque de gliome après ajustement

pour tenir compte des biais de sélection et de rappel [126]. Les rapports de cotes (OR) pour le gliome ont augmenté de manière significative et dans une mesure similaire en comparant le quartile le plus élevé d'utilisation à ceux qui n'étaient pas des utilisateurs réguliers, que des ajustements pour les biais aient été effectués ou non. En outre, Hardell et Carlberg [116] ont montré que le risque de gliome lié à l'utilisation du téléphone portable augmentait de manière significative même lorsqu'on le comparait au risque de méningiome. Comme le risque de méningiome n'était pas augmenté de manière significative, cette réponse tumorale ne pouvait pas être attribuée à un biais de rappel. Il est clair que les biais de sélection et de rappel n'expliquent pas le risque élevé de tumeur cérébrale associé à l'utilisation de téléphones mobiles. Ainsi, les preuves épidémiologiques contredisent les avis de la FCC et de l'ICNIRP sur le risque de tumeur cérébrale lié au rayonnement RF.

Il convient également de noter que la glande thyroïde est un organe cible des RF émis par les smartphones. Une étude cas-témoins sur l'utilisation des téléphones portables a suggéré un risque accru de microcarcinome thyroïdien associé à une utilisation prolongée du téléphone portable [127]. L'ADN des lymphocytes périphériques obtenu à partir de cas et de témoins a été utilisé pour étudier les interactions génotype-environnement. L'étude a montré que plusieurs variantes génétiques basées sur des polymorphismes nucléotidiques simples (SNP) augmentaient le risque de cancer de la thyroïde avec l'utilisation de téléphones portables [128]. Une augmentation de l'incidence du cancer de la thyroïde dans les pays nordiques, en particulier au cours des deux dernières décennies, a également été signalée [129, 130]. En outre, une récente étude cas-témoins a révélé une augmentation significative du risque de cancer du sein chez les femmes taiwanaises en fonction de leur utilisation de smartphones et de la distance entre le sein et l'emplacement de leur smartphone [131].

#### **D. Variations individuelles de l'exposition et de la sensibilité aux CEM-RF**

Hypothèse 7) Il n'y a pas de différences entre les individus, y compris les enfants, en ce qui concerne l'absorption des RF-EMF et la sensibilité à ce rayonnement.

Des différences entre les enfants et les adultes concernant l'absorption des champs électromagnétiques de radiofréquence lorsque les téléphones mobiles sont utilisés près de la tête ont été démontrées et largement documentées [132,133,134,135,136,137]. Les principaux facteurs expliquant ces taux d'absorption dissemblables sont les différences d'anatomie, de propriétés diélectriques des tissus et de physiologie. Grâce à des simulations dans le domaine temporel à différences finies (FDTD), utilisant des modèles anthropomorphiques détaillés, il est possible de trouver des différences liées à l'anatomie et aux dimensions de la tête.

Étant donné que la pénétration des CEM dans les tissus humains peut être de l'ordre de quelques centimètres, en fonction de la longueur d'onde, les tissus internes du cerveau recevront une dose nettement plus élevée dans les têtes plus petites des enfants que dans celles des adultes, même si l'absorption totale et le DAS spatial de pointe (DASP) calculés sur l'ensemble de la tête varient moins [132, 133, 138]. Fernández et al. [136] ont



estimé que le psSAR du rayonnement des téléphones portables dans l'hippocampe était 30 fois plus élevé chez les enfants que chez les adultes, tandis que le psSAR dans les yeux était 5 fois plus élevé chez les enfants ; ces différences étaient dues en grande partie à la proximité plus grande des antennes des téléphones portables. Les dimensions plus fines du crâne des enfants contribuent également à cette différence [135], ce qui se traduit par un psSAR environ 2 fois plus élevé dans le cerveau des enfants [134,135,136,137,139] que dans celui des adultes.

En outre, les tissus des jeunes mammifères ont une conductivité et une permittivité électrique plus élevées que ceux des animaux adultes [140]. Cela contribue également à une plus grande pénétration et absorption des CEM, ce qui entraîne une augmentation supplémentaire du psSAR. On a estimé que le psSAR dans la moelle osseuse du crâne des enfants était multiplié par 10 en raison de la conductivité plus élevée de ce tissu [137]. La distance entre le dispositif mobile et les tissus corporels est importante pour caractériser la dosimétrie des tissus. L'Agence nationale ANFR de France a récemment publié des données de test du DAS des téléphones cellulaires pour 450 téléphones cellulaires. Les psSAR de dix grammes ont augmenté de 10 à 30 % pour chaque millimètre de placement proximal du téléphone cellulaire par rapport au fantôme corporel plan (<http://data.anfr.fr/explore/dataset/das-telephonie-mobile/?disjunctive.marque&disjunctive.modele&sort=marque>).

Enfin, il est important de noter que les simulations de la dosimétrie tissulaire ne prennent en compte que les paramètres physiques des tissus ; elles ne tiennent pas compte des processus biologiques qui se produisent dans les tissus vivants. Pendant la croissance des enfants, les organes en développement et les systèmes multi-organes sont plus sensibles aux effets néfastes des agents environnementaux ; les simulations FDTD (Finite-Difference Time-Domain) ne prennent pas en compte les différences de sensibilité des organes ou des systèmes pour les expositions survenant pendant le développement de l'enfant.

**Hypothèse 8)** Il n'y a pas de différences entre les individus quant à leur sensibilité aux effets sanitaires induits par les rayonnements RF.

Toute vie est "électrosensible" à un certain degré car les processus physiologiques dépendent d'interactions électromagnétiques à la fois subtiles et substantielles à tous les niveaux, du moléculaire au systémique. Les réponses à de multiples types d'exposition électromagnétique révèlent qu'il existe un éventail de sensibilité aux CEM beaucoup plus large que ce que l'on pensait auparavant, et qu'il existe des sous-groupes de sujets extrêmement hypersensibles [141,142,143,144,145,146,147,148,149,150,151]. Compte tenu des effets néfastes sur la santé mentionnés dans l'hypothèse n°1, notamment la cardiomyopathie, la cancérogénicité et les effets neurologiques, les symptômes aigus et conscients qui se manifestent chez certains individus ne devraient pas être inattendus. Le terme actuellement et le plus fréquemment utilisé par la profession médicale pour décrire les personnes qui présentent une sensibilité aiguë et symptomatique aux

expositions aux rayonnements non ionisants est l'hypersensibilité électromagnétique (HSEM).

L'HSEM est une réponse physique multisystémique caractérisée par une prise de conscience et/ou des symptômes déclenchés par des expositions aux CEM. Les symptômes courants comprennent (mais ne sont pas limités à) des maux de tête, des vertiges, des troubles du sommeil, des palpitations cardiaques, des acouphènes, des éruptions cutanées, des troubles visuels, des troubles sensoriels et des troubles de l'humeur [152, 153]. Ces symptômes sont signalés en réponse à des CEM de types multiples (en termes de fréquence, d'intensité et de formes d'onde), même de très faible intensité (des ordres de grandeur inférieurs aux niveaux de sécurité actuels). Les déclencheurs les plus fréquemment observés de symptômes EHS fréquents et persistants sont les émissions RF modulées par impulsions, modulées à des fréquences extrêmement basses. Les sources de déclenchement les plus courantes sont les téléphones mobiles, les téléphones fixes sans fil DECT, les ordinateurs équipés de Wi-Fi/Bluetooth, les routeurs Wi-Fi, les compteurs intelligents, les antennes de stations de base et les articles électroménagers. L'évitement ou l'atténuation des CEM s'avère être le moyen le plus efficace de réduire les symptômes [154].

Les lignes directrices pour le diagnostic et la prise en charge de l'HSEM ont également fait l'objet d'un examen par les pairs et s'accordent à dire que le pilier de la prise en charge médicale consiste à éviter les champs électromagnétiques anthropiques [152, 155, 156]. Des études de cas détaillant les présentations cliniques, les mesures des CEM et les mesures d'atténuation sont également publiées [157], et les biomarqueurs, notamment les marqueurs élevés du stress oxydatif, les marqueurs inflammatoires et les modifications du flux sanguin cérébral, continuent d'être étudiés [152].

Il a été prouvé que l'HSEM est une réponse physique dans des conditions d'aveugle [145, 151, 158, 159] et, en plus de ces études, des changements aigus induits par les CEM dans la cognition, le comportement et les réactions physiologiques ont été observés dans des études impliquant des animaux [27, 30, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172] ; plus d'autres références sous l'hypothèse 13), qui ne peuvent pas être biaisées par des peurs cultivées par les médias. Ces études fournissent des preuves supplémentaires qui invalident la réponse nocebo (symptômes physiques induits par la peur) comme étant la cause des symptômes.

Il ne faut pas s'attendre à ce que toutes les études de provocation démontrent de manière fiable des réactions indésirables ; cependant, les suggestions selon lesquelles la réponse nocebo pourrait être à l'origine des symptômes de l'HSEM ont été avancées à partir d'études de provocation qui n'ont pas réussi à démontrer une relation entre l'exposition aux CEM et les symptômes signalés [173]. Les échecs de ces études sont explicables étant donné la très mauvaise méthodologie de la majorité d'entre elles. Elles n'ont pas tenu compte d'une multitude de facteurs essentiels qui doivent être adaptés à l'individu, tels que l'apparition et le décalage variables des symptômes, la nécessité de périodes

d'élimination adéquates, la spécificité des fréquences et des intensités de déclenchement, l'exigence d'une hygiène complète des CEM pendant les expositions fictives, l'exigence d'expositions similaires à la vie réelle (par exemple, des ondes porteuses d'informations modulées par impulsions), etc. Par exemple, il a été démontré que les différents canaux de fréquence des téléphones mobiles GSM/UMTS affectent différemment les mêmes cellules humaines [174,175,176,177]. De même, il a été démontré que la HSEM dépend de la fréquence [151]. Comme indiqué ci-dessus, les études de provocation significatives doivent prendre en considération de multiples paramètres physiques de l'exposition, y compris la fréquence, la modulation, la durée de l'exposition et le temps après l'exposition [155] ; cependant, la plupart des études de provocation qui n'ont pas réussi à établir un lien de causalité entre l'exposition aux RFR et les symptômes de l'HSEM [173] n'ont utilisé qu'une ou deux conditions avec des expositions à court terme.

La réponse nocebo comme cause de l'HSEM pose de nombreux problèmes, dont l'absence du lien temporel requis n'est pas le moindre. Pour que la réponse nocebo soit la cause de l'HSEM, la prise de conscience et l'inquiétude quant aux effets négatifs des CEM sur la santé doivent précéder les symptômes. Or, ce n'est pas le cas chez la majorité des personnes souffrant d'HSEM [178]. Au fur et à mesure que la communication publique sur les risques s'améliore, cela ne sera plus vérifiable ; cependant, cela a été observé de manière importante au seul moment où cela aurait pu l'être - avant la prise de conscience généralisée des effets néfastes sur la santé des rayonnements non ionisants (RNI).

Tout en reconnaissant que certains groupes vulnérables peuvent être plus sensibles aux effets de l'exposition aux rayonnements non ionisants, l'ICNIRP [179] a reconnu que ses recommandations peuvent ne pas tenir compte de ces sous-groupes sensibles :

"Les différents groupes d'une population peuvent avoir des différences dans leur capacité à tolérer une exposition particulière aux RNI [rayonnements non ionisants]. Par exemple, les enfants, les personnes âgées et certaines personnes souffrant de maladies chroniques peuvent avoir une tolérance plus faible à une ou plusieurs formes d'exposition aux RNI que le reste de la population. Dans de telles circonstances, il peut être utile ou nécessaire de développer des niveaux de recommandation distincts pour différents groupes au sein de la population générale, mais il peut être plus efficace d'ajuster les recommandations pour la population générale afin d'inclure ces groupes. Certaines recommandations peuvent encore ne pas fournir une protection adéquate pour certaines personnes sensibles ou pour des personnes normales exposées simultanément à d'autres agents, qui peuvent exacerber l'effet de l'exposition au proche infrarouge, par exemple les personnes photosensibles.

En 2020, l'ICNIRP [23] a également noté que les effets biologiques ne sont pas facilement discernables des effets néfastes sur la santé, et que leurs directives :

"...ne sont pas destinées à protéger contre les effets biologiques en tant que tels (lorsque les mécanismes de compensation sont débordés ou épuisés), à moins qu'il n'y ait

également un effet néfaste sur la santé associé ". Cependant, il n'est pas toujours facile d'établir une distinction claire entre les effets biologiques et les effets néfastes sur la santé, et cela peut même varier en fonction de la sensibilité individuelle à des situations spécifiques. Citons par exemple les effets sensoriels dus à l'exposition aux rayonnements non ionisants dans certaines circonstances, tels que la sensation de picotement résultant de la stimulation des nerfs périphériques par des champs électriques ou magnétiques ; les magnétosphènes (sensations de scintillement lumineux à la périphérie du champ visuel) résultant de la stimulation de la rétine par des champs électriques induits par l'exposition à des champs magnétiques de basse fréquence ; et l'audition de micro-ondes résultant d'ondes thermoélastiques dues à l'expansion des tissus mous de la tête qui se propagent par conduction osseuse jusqu'à l'oreille interne. Ces perceptions peuvent parfois entraîner une gêne et un inconfort. L'ICNIRP ne considère pas l'inconfort et la gêne comme des effets néfastes sur la santé en soi, mais, dans certains cas, la gêne peut entraîner des effets néfastes sur la santé en compromettant le bien-être. Les circonstances d'exposition dans lesquelles l'inconfort et la gêne surviennent varient selon les individus".

Banaliser la " gêne " qui est le précurseur de la douleur n'est pas conforme aux recommandations de l'OMS citées par le même document de l'ICNIRP [23] : "La santé est un état de complet bien-être physique, mental et social et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité."

L'inconfort est un signe qu'un organisme subit quelque chose qui compromet sa santé optimale et, bien que dans certains cas, cela puisse être banal et réversible, dans d'autres cas, cela peut ne pas être réversible. La tolérance à la douleur et la perception de la douleur sont extrêmement variées chez l'homme et, pour parvenir à des soins de santé préventifs efficaces, il faut prendre l'"inconfort" au sérieux et l'atténuer dans la mesure du possible. Cela est particulièrement vrai dans le cas présent, où des symptômes tels que des maux de tête sont signalés en réponse à l'exposition à des téléphones mobiles, alors que l'on constate un risque accru de tumeur cérébrale lié à cette même exposition (voir hypothèse 6).

En réalité, les personnes souffrant d'HSEM signalent des perturbations de la santé bien plus graves qu'un "inconfort" ou une "gêne" et, dans certains cas, ces symptômes sont invalidants [180, 181]. De plus en plus, l'HSEM est reconnue comme un handicap par les tribunaux nationaux en France, en Suède et en Espagne, ce qui renforce l'exigence de directives de sécurité délibérément adaptées à ce groupe plus sensible [180].

## **E. Facteurs de sécurité appliqués aux travailleurs exposés aux CEM-RF et à la population générale**

Hypothèse 9) Un facteur de sécurité multiplié par 50 pour l'exposition du corps entier aux rayonnements RF est suffisant pour protéger la population générale contre tout risque sanitaire lié aux rayonnements RF.

Les organismes de santé publique des États-Unis et du monde entier appliquent de multiples facteurs d'incertitude aux données sur les effets sur la santé afin d'établir des niveaux d'exposition considérés comme sûrs pour la grande majorité des populations exposées [182,183,184]. Bien que les directives pour l'utilisation des facteurs d'incertitude aient été développées pour les produits chimiques, elles sont également pertinentes pour d'autres agents toxiques, tels que les RFR. Les facteurs d'incertitude nécessaires pour les effets toxiques du RFR basés sur des études qui démontrent une dose sans effet indésirable observé (NOAEL) chez les animaux de laboratoire comprennent :

- 1)** Extrapolation de l'animal à l'homme. Lorsque les données sont basées sur des études sur des animaux de laboratoire, un facteur de 3 à 10 est appliqué (pour les différences potentielles entre les espèces en matière de dosimétrie et de réponse tissulaire), à moins qu'il n'existe des données convaincantes démontrant une sensibilité équivalente chez les animaux et les humains. Cependant, rien ne prouve que les humains sont aussi ou moins sensibles aux RFR que les animaux qui ont été utilisés dans les études à partir desquelles les limites d'exposition ont été établies par la FCC et l'ICNIRP.
- 2)** Ajustement pour la variabilité humaine. Un second facteur de 10 est utilisé pour tenir compte de la variabilité interindividuelle de la susceptibilité (par exemple, en raison de différences d'âge, de sexe, de variation génétique, de maladies préexistantes) à l'agent toxique dans la population générale. Il a été reconnu qu'un facteur de 10 pour la variabilité humaine est probablement inadéquat pour les sous-populations sensibles et peut nécessiter un ajustement supplémentaire.
- 3)** Extrapolation d'études à court terme à une exposition à vie. Un facteur supplémentaire de 10 est appliqué pour les études à court terme, telles que celles utilisées pour établir les limites d'exposition aux rayonnements RF, afin d'assurer une protection à vie contre l'exposition chronique. Ceci est particulièrement important si l'on considère les périodes remarquablement courtes sur lesquelles la toxicité des RF a été évaluée à l'origine [10, 11].
- 4)** Insuffisances de la base de données. Enfin, un facteur d'incertitude de 3 à 10 est appliqué pour les insuffisances de la base de données, c'est-à-dire pour une caractérisation incomplète de la toxicité d'un agent. Les études comportementales [10, 11] qui ont été utilisées pour établir les limites d'exposition aux RFR de la FCC et de l'ICNIRP ne fournissent pas une caractérisation complète des effets de ce type de rayonnement et n'ont pas non plus identifié l'effet indésirable le plus sensible des expositions aux RFR.

Baser les limites d'exposition aux RFR sur les études comportementales chez les rats et les singes [10, 11, 90, 91] nécessiterait l'application d'un facteur d'incertitude composite d'environ 900 à 10 000 pour être cohérent avec les approches utilisées par les agences de

santé publique pour établir des limites d'exposition protectrices pour les travailleurs et la population générale. Compte tenu de la taille du facteur d'incertitude/de sécurité nécessaire, les ensembles de données utilisés par la FCC et l'ICNIRP sont clairement inadéquats pour établir des limites d'exposition aux RF avec une confiance raisonnable. Les facteurs de sécurité de 10 pour les travailleurs et de 50 pour la population générale choisis arbitrairement par la FCC et l'ICNIRP sont terriblement inadéquats pour protéger les populations exposées.

Lorsque des facteurs d'incertitude/de sécurité sont appliqués à une valeur seuil d'exposition faussement représentée pour les effets néfastes, le niveau qui en résulte ne garantit pas la protection de la santé de la population générale exposée à cet agent. Les études citées ci-dessus [18, 22, 91, 92, 96] montrent que le DAS du corps entier de 4 W/kg n'est pas un niveau seuil pour les effets indésirables causés par les RFR. Dans une analyse quantitative récente de divers effets nocifs pour la santé tirés de l'étude NTP, Uche et Naidenko [185] ont montré que le DAS corps entier admissible de 0,08 W/kg (basé sur une réduction de 50 fois du DAS seuil supposé de 4 W/kg) était 20 à 40 fois plus élevé que les valeurs de DAS protectrices pour la santé dérivées de la modélisation de la dose de référence des données NTP pour la cardiomyopathie (après application de facteurs de sécurité de 10 fois pour la variabilité inter-espèces et intra-espèces). Les approches utilisées par ces auteurs sont conformes aux méthodologies recommandées par l'Agence américaine de protection de l'environnement pour quantifier les risques sanitaires des agents environnementaux toxiques et cancérigènes [1, 182]. Ainsi, une réduction de 50 fois du seuil supposé du DAS du corps entier de 4 W/kg est inadéquate pour protéger la santé de la population générale contre l'exposition au rayonnement RF.

**Hypothèse 10)** Un facteur de sécurité de 10 pour l'exposition du corps entier au rayonnement RF est adéquat pour protéger les travailleurs contre tout risque pour la santé lié au rayonnement RF.

Lorsque les limites d'exposition aux RF ont été mises en œuvre en 1997, la justification donnée pour la différence entre les facteurs de sécurité pour la population générale (50 fois) et pour les travailleurs (10 fois) était " basée sur les périodes d'exposition des deux populations, arrondies à un chiffre (40 heures de travail par semaine/168 heures par semaine =  $\sim 0,2$ ) ". [6]. En plus des différences de périodes d'exposition entre les travailleurs et la population générale, l'ICNIRP justifie la pertinence d'un facteur de sécurité plus faible pour les travailleurs parce que " les individus exposés professionnellement peuvent être considérés comme un groupe plus homogène que la population générale ", ils sont " en général des adultes relativement en bonne santé dans une tranche d'âge limitée " et " les individus exposés professionnellement devraient travailler dans des conditions contrôlées et être informés des risques associés à l'exposition aux rayonnements non ionisants dans leur situation spécifique et de la manière de réduire ces risques " [23]. En revanche, " le grand public n'est, dans la plupart des cas, pas conscient de son exposition aux rayonnements non ionisants et, sans éducation, on ne peut raisonnablement s'attendre à ce qu'il prenne des précautions pour minimiser ou éviter tout effet néfaste de l'exposition."

L'hypothèse selon laquelle les travailleurs sont formés pour comprendre les risques sanitaires associés à l'exposition aux RFR et pour atténuer ces risques dans toute la mesure du possible n'est pas correcte car ni la FCC ni les directives de l'ICNIRP ne reconnaissent d'effets sanitaires aux RFR à des DAS inférieurs à 4 W/kg, et les limites d'exposition autorisées par la FCC et l'ICNIRP ne tiennent pas compte des effets sanitaires des expositions à long terme [3, 5]. Le seul effet sur la santé pris en compte par la FCC et l'ICNIRP est la détérioration des tissus due à un échauffement excessif lors d'expositions aiguës. Ainsi, la réduction de 10 fois par rapport au seuil du DAS du corps entier calculé à partir d'études comportementales aiguës sur des rats et des singes est inadéquate pour protéger la santé des travailleurs exposés à long terme aux RFR (voir les commentaires sous l'hypothèse n°9). Il n'existe aucune donnée démontrant l'adéquation de ce facteur de sécurité/incertitude choisi arbitrairement pour les travailleurs exposés professionnellement, alors qu'au contraire, des risques de cancer excessifs ont été associés à l'exposition aux RFR des travailleurs qui exploitent des radars et des systèmes de communication dans des contextes militaires et professionnels [186].

**Hypothèse 11)** L'exposition d'un gramme de tissu en forme de cube à une puissance de 1,6 W/kg, ou de 10 g de tissu en forme de cube à une puissance de 2 W/kg, (durée non spécifiée) n'augmentera pas le risque que ce tissu ait des effets toxiques ou cancérigènes dans la population générale.

La dosimétrie tissulaire a été analysée dans l'étude du NTP sur le rayonnement RF des téléphones cellulaires chez les rats et les souris [187]. Chez les rats, les expositions du corps entier pendant les cycles de marche de 10 minutes étaient de 1,5, 3,0 ou 6,0 W/kg, et les DAS du cerveau et du cœur variaient par rapport aux DAS du corps entier d'environ 7 % à moins de 2 fois pour le cerveau et le cœur, respectivement. Une évaluation quantitative du risque des données du NTP sur l'incidence des tumeurs est nécessaire pour évaluer le risque de cancer spécifique à un organe. La nomination de la FDA [19] au NTP a reconnu la nécessité de "grandes expériences animales bien planifiées .... pour fournir la base de l'évaluation du risque pour la santé humaine des dispositifs de communication sans fil". Cependant, plus de 3 ans après qu'un examen externe par les pairs des études du NTP ait trouvé "des preuves évidentes d'une activité cancérigène", la FDA [109] a continué à minimiser l'importance de ces résultats et à éviter de mener une évaluation quantitative des risques liés aux données sur les tumeurs qu'elle (la FDA) avait initialement demandées. Contrairement à la FDA, Uche et Naidenko [185] ont analysé les données du NTP sur la cardiomyopathie par une approche de dose de référence et ont constaté que le niveau de risque supplémentaire de 10 % pour cet effet se situait dans la fourchette d'un DAS pour le corps entier de 0,2 à 0,4 W/kg. Il existe donc un risque accru (supérieur à 10 %) de développer une cardiomyopathie à des DAS locaux des tissus inférieurs à 1,6 ou 2,0 W/kg.

Le débit d'absorption spécifique spatial de pointe (psSAR), tel qu'il est utilisé par l'ICNIRP et la FCC, est une dosimétrie inadéquate du rayonnement RF à des fréquences supérieures à 1 GHz. Le psSAR est calculé en faisant la moyenne de volumes cubiques

fixes contenant une quantité donnée de masse, et suppose un matériau homogène avec une densité de masse donnée. La recommandation de l'ICNIRP est de faire la moyenne de volumes cubiques contenant 10 g de tissu (10 g-psSAR), tandis que la recommandation de la FCC est de faire la moyenne de volumes cubiques contenant 1 g de tissu (1 g-psSAR). Les recommandations actuelles limitent l'utilisation du psSAR à des fréquences allant jusqu'à 6 GHz [3, 5].

Une évaluation de l'utilité de l'utilisation du psSAR comme paramètre dosimétrique à différentes fréquences allant de 100 MHz à 26 GHz et avec des cubes de 10 mg à 10 g est présentée dans le fichier supplémentaire 2 : annexe 2. Pour les petits cubes et les basses fréquences, le calcul de la moyenne dans le cube ne sous-estime pas la valeur maximale à la surface du cube, mais à des fréquences plus élevées, le psSAR calculé sur des cubes plus grands peut être plusieurs fois inférieur au psSAR calculé sur des cubes plus petits. Par exemple, à 2,45 GHz, le calcul de la moyenne sur un cube de 10 g sous-estime de 4 dB (environ 2,5 fois) le psSAR calculé sur des cubes plus petits, alors que pour 5,8 GHz, le calcul de la moyenne sur un cube de 10 g sous-estime le psSAR de 12 dB (environ 16 fois) par rapport au calcul de la moyenne sur un cube de 10 mg, et de 6 dB (environ 4 fois) par rapport au calcul de la moyenne sur un cube de 1 g. Lorsque la fréquence augmente, la sous-estimation du psSAR calculé en moyenne dans des cubes plus grands (par exemple 10 g ou 1 g) par rapport aux cubes plus petits (par exemple 100 mg et 10 mg) devient plus prononcée. En considérant le cube de 10 g, la différence entre le psSAR pour le CEM de 5,8 GHz et celui de 0,9 GHz est d'environ 7 dB (soit une sous-estimation d'environ 5 fois). Ces grandes différences sont dues à la pénétration réduite des CEM à des fréquences plus élevées. Par conséquent, les recommandations de l'ICNIRP pour le SAR à 10 g et de la FCC pour le SAR à 1 g ne fournissent pas de paramètres dosimétriques fiables pour évaluer l'absorption des CEM au-dessus de 1 GHz.

Le calcul de la moyenne du DAS sur un cube de 10 g est également imparfait pour évaluer la cancérogénicité car il s'agit d'un volume trop important pour se concentrer sur les cellules souches et leur rôle important dans la cancérogenèse. Les cellules souches humaines étaient plus sensibles aux expositions aux RFR des téléphones mobiles GSM et UMTS que les lymphocytes et les fibroblastes [175]. Au lieu d'une distribution aléatoire des cibles de la carcinogenèse, une distribution localisée du DAS dans des volumes plus petits est nécessaire pour caractériser plus précisément les relations entre le DAS et l'induction de tumeurs. Du point de vue de l'organisation des cellules souches, le volume des déterminations du DAS peut être particulièrement important pour fixer des limites de sécurité pour les enfants, car la plupart des cellules souches et leurs niches sont transitoires dans l'espace et dans le temps pendant le développement du cerveau [188].

**Hypothèse 12)** L'exposition d'un gramme de tissu en forme de cube jusqu'à 8 W/kg, ou de 10 g de tissu en forme de cube jusqu'à 10 W/kg, (durée non spécifiée) n'augmentera pas le risque que ce tissu ait des effets toxiques ou cancérigènes chez les travailleurs. D'après les analyses de la dosimétrie des tissus dans l'étude du NTP [187], des effets toxiques et cancérigènes spécifiques aux organes ont été observés chez les rats à des DAS



locaux des tissus bien inférieurs à 8 ou 10 W/kg [18]. La dosimétrie tissulaire de l'étude NTP et l'inadéquation du DAS local tel que spécifié par l'ICNIRP et la FCC sont décrites dans l'hypothèse n°9.

## **F. Exposition environnementale aux rayonnements RF**

Hypothèse 13) Il n'y a pas lieu de s'inquiéter des effets environnementaux des rayonnements RF ou des effets sur la faune ou les animaux domestiques.

Bien que les niveaux de fond de RF-EMF augmentent dans l'environnement, y compris dans les zones rurales éloignées [189], ni la FCC ni l'ICNIRP ne prennent en compte les effets de ce rayonnement sur la faune. Les mouvements constants de la plupart des espèces sauvages dans et hors des CEM artificiels variables peuvent entraîner des expositions élevées à proximité des structures de communication, en particulier pour les espèces volantes comme les oiseaux et les insectes. Il existe une quantité importante de littérature scientifique sur les effets perturbateurs des RFR sur la faune (par exemple, [190,191,192,193,194,195,196,197,198,199,200,201,202,203,204,205,206]).

De nombreuses espèces non humaines utilisent les champs géomagnétiques de la Terre pour des activités telles que l'orientation et la migration saisonnière, la recherche de nourriture, l'accouplement, la construction de nids et de tanières [190]. Par exemple, les espèces d'oiseaux migrateurs [191, 192], les abeilles domestiques [193], les chauves-souris [194], les poissons [195, 196, 197] et de nombreuses autres espèces détectent les champs magnétiques de la Terre grâce à des récepteurs sensoriels spécialisés. Les mécanismes probablement impliqués dans la magnéto-réception comprennent l'induction magnétique de faibles signaux électriques dans des récepteurs sensoriels spécialisés [198], les interactions magnéto-mécaniques avec la magnétite, un cristal à base de fer [194], et/ou les interactions radicalaires avec les photorécepteurs cryptochromes [191, 192]. Chacun de ces processus de détection est extrêmement sensible aux changements de faible intensité des champs électromagnétiques. Pour une description plus complète des mécanismes par lesquels les espèces non humaines utilisent la magnéto-réception pour effectuer des activités vitales essentielles, voir Levitt et al [190].

Les études suivantes ne représentent que quelques-uns des nombreux exemples des effets perturbateurs des expositions de faible intensité aux CEM RF sur la magnéto-réception et le comportement naturel de la faune. On a constaté que les champs magnétiques oscillants perturbent la capacité des oiseaux migrateurs à s'orienter et à naviguer dans le champ géomagnétique de la Terre [199,200,201,202]. Des fauvettes des jardins ont été désorientées par l'exposition à un faible champ magnétique oscillant de 1,403 MHz à une intensité aussi faible que 2-3 nT [200]. L'orientation des merles d'Europe qui utilisent le champ magnétique terrestre pour s'orienter sur la boussole a été complètement perturbée par l'exposition à un bruit électromagnétique dans la gamme de fréquences de 50 kHz à 5 MHz ou à un ELF à large bande modulé par le bruit couvrant la gamme de ~ 2 kHz à ~ 9 MHz [199, 201]. Il a été démontré que les radiofréquences dans

la gamme des faibles MHz (7,0 MHz de 480 nT ou 1,315 MHz de 15 nT) désactivaient la boussole aviaire magnétoréceptrice tant que l'exposition était présente [202].

Outre les effets sur les oiseaux migrateurs, Landler et al. [203] ont constaté que l'exposition à un champ magnétique de faible intensité (1,43 MHz à une intensité de 30-52 nT) perturbait l'orientation naturelle des tortues juvéniles écloses sur terre. Le rayonnement RF de 900 MHz modulé par GSM a fait perdre aux fourmis leur mémoire visuelle et olfactive pour trouver de la nourriture [166]. Les capacités de navigation des truites étaient réduites lorsqu'elles étaient élevées dans des conditions où les champs magnétiques étaient déformés dans l'espace [204].

Les activités des abeilles domestiques sont également perturbées par l'exposition aux rayonnements RF. Le rayonnement des téléphones cellulaires modulés par GSM (900 MHz) a entraîné une réduction de la ponte des reines d'abeilles et une diminution du nombre de pollens et de miel dans les ruches [205]. Le rayonnement des téléphones cellulaires modulés par GSM (900 MHz) a réduit l'éclosion et altéré le développement nymphal des larves de reines d'abeilles mellifères [206].

L'absence de prise en compte de l'exposition chronique aux rayonnements RF de faible niveau sur la faune sauvage pourrait avoir des effets dangereusement perturbateurs sur les écosystèmes fragiles et sur le comportement et la survie d'espèces qui existent depuis longtemps dans l'environnement naturel de la Terre.

## **G. 5G (5e génération sans fil)**

Hypothèse 14) Aucune donnée sur les effets sur la santé n'est nécessaire pour les expositions à la 5G ; la sécurité est supposée car la pénétration est limitée à la peau ("pénétration corporelle minimale").

Les systèmes de communication sans fil de cinquième génération (5G) sont déployés dans le monde entier pour fournir des taux de transfert de données plus élevés avec des temps de latence plus courts entre des nombres massifs de dispositifs sans fil connectés. Pour accélérer le transfert de grandes quantités de données (jusqu'à 20 gigabits par seconde en débit de pointe), la gamme de fréquences de la 5G comprend des ondes millimétriques (30 à 300 GHz), en plus des fréquences porteuses aussi basses que 600 MHz. Les ondes millimétriques (MMW) de très haute fréquence qui transmettent de grandes quantités de données aux appareils des utilisateurs sont dirigées en faisceaux étroits par transmission en visibilité directe avec des antennes de formation de faisceau. Comme les ondes millimétriques ne pénètrent pas les structures solides telles que les matériaux de construction, les collines, le feuillage, etc., et qu'elles ne se déplacent que sur de courtes distances (quelques centaines de mètres), des réseaux plus denses de stations de base avec des émetteurs et des récepteurs massifs à entrées et sorties multiples (MIMO) dans des millions de petites tours cellulaires sont installés sur des structures telles que des poteaux électriques. Ces caractéristiques peuvent conduire à une proximité beaucoup plus étroite entre les humains et les antennes émettrices de rayonnement, et ainsi modifier les expositions individuelles de pointe et moyennes aux RFR.

Pour une fréquence 5G de 26 GHz, l'absorption des CEM est très superficielle, ce qui signifie que pour une peau humaine typique, plus de 86 % de la puissance incidente est absorbée dans le premier millimètre. La profondeur de pénétration de la peau a été calculée à 1 mm sur la base de la conductivité électrique de la peau et de sa permittivité électrique [5, 207]. On s'attend à ce que le DAS dans ce tissu soit bien supérieur aux limites recommandées ([208], et fichier supplémentaire 2 : annexe 2). On s'attend également à ce que cela soit nocif pour les très petites espèces, comme les oiseaux et d'autres petits animaux (par exemple, les insectes) [209]. Il est souvent affirmé qu'en raison de sa faible pénétration, l'exposition au rayonnement 5G haute fréquence est sans danger et que le seul effet est le réchauffement des tissus [210]. Cependant, ce point de vue ne tient pas compte de la pénétration plus profonde des composantes ELF des signaux RF modulés, qui sont évaluées sur la base de la chaleur uniquement, ainsi que des effets des courtes bouffées de chaleur des signaux pulsés [211, 212]. Dans les premiers 1 mm de la peau, les cellules se divisent pour renouveler la couche cornée (risque de cancer de la peau) et les terminaisons nerveuses du derme sont situées entre 0,6 mm (paupières) et 3 mm (pieds) de la surface (risque d'effets neurologiques). La lumière ultraviolette, qui exerce son action à une profondeur de pénétration inférieure à 0,1 mm [213, 214] est une cause reconnue de cancer de la peau [87].

Plus la fréquence des ondes électromagnétiques est élevée, plus la longueur d'onde est courte et plus la pénétration de l'énergie dans les personnes ou les animaux exposés est faible. Par exemple, la profondeur de pénétration dans le corps humain est d'environ 8 mm à 6 GHz et de 0,92 mm à 30 GHz [5]. En raison de la profondeur minimale d'absorption d'énergie aux fréquences supérieures à 6 GHz, la FCC et l'ICNIRP ont fondé les limites d'exposition sur la densité de puissance plutôt que sur les niveaux de DAS. La FCC [3] a proposé une limite générale d'exposition à la densité de puissance localisée de 4 mW/cm<sup>2</sup> en moyenne sur 1 cm<sup>2</sup> et ne dépassant pas 30 minutes pour les services 5G jusqu'à 3 000 GHz pour la population générale, affirmant que cette exposition est compatible avec le DAS moyen spatial maximal de 1,6 W/kg en moyenne sur 1 g de tissu à 6 GHz. Les limites d'exposition de l'ICNIRP [5] pour la 5G sont une densité de puissance absorbée de 200 W/m<sup>2</sup> (0,2 W/cm<sup>2</sup>) en moyenne sur 4 cm<sup>2</sup> et un intervalle de 6 minutes pour les fréquences jusqu'à 30 GHz, et 400 W/m<sup>2</sup> (0,4 mW/cm<sup>2</sup>) en moyenne sur 1 cm<sup>2</sup> et un intervalle de 6 minutes pour les fréquences de 30 GHz à 300 GHz.

En raison de sa pénétration minime, l'exposition au rayonnement 5G se traduit par une intensité énergétique plus élevée sur la peau et d'autres parties du corps directement exposées, comme la cornée de l'œil ou le cristallin. Or, la peau, qui est le plus grand organe du corps humain, remplit des fonctions importantes comme celle de servir de barrière physique et immunologique protectrice contre les lésions mécaniques, les infections par des micro-organismes pathogènes et la pénétration de substances toxiques. En outre, les cancers de la peau, notamment les carcinomes basocellulaires et les carcinomes spinocellulaires, sont les cancers humains les plus répandus, tandis que les mélanomes sont hautement métastatiques et leur prévalence augmente. Bien que

l'incidence élevée des cancers de la peau soit largement attribuée à l'exposition aux rayons ultraviolets, aucune étude n'a été rapportée sur les effets du rayonnement 5G sur (i) la capacité de la peau à assurer une protection contre les micro-organismes pathogènes, (ii) l'exacerbation éventuelle d'autres maladies de la peau, (iii) la promotion des cancers de la peau induits par la lumière du soleil, ou (iv) le déclenchement d'un cancer de la peau par lui-même. On manque également d'informations sur les effets du rayonnement 5G sur les systèmes nerveux et immunitaire, qui sont également exposés même par la pénétration moins profonde des MMW.

Un autre facteur important est la largeur de bande maximale avec le rayonnement 5G, qui peut atteindre 100 MHz dans la gamme de fréquences de 450 MHz à 6 GHz, et jusqu'à 400 MHz dans les gammes de 24 GHz à 52 GHz, par rapport aux types précédents de communication mobile où la largeur de bande est limitée à 20 MHz. Étant donné que de nombreuses études ont indiqué des effets RF non thermiques dépendant de la fréquence pour les communications mobiles [43, 177] et pour les effets MMW [215, 216], la possibilité de fenêtres de fréquence efficaces pour les effets biologiques augmenterait avec l'augmentation de la largeur de bande du rayonnement 5G.

Une autre considération pour les effets des expositions à la 5G sur la santé humaine est que les impulsions de rayonnement créées par des taux de transmission de données extrêmement rapides ont le potentiel de générer des rafales d'énergie qui peuvent voyager beaucoup plus profondément que prévu par les modèles conventionnels [217, 218]. Neufeld et Kuster [105] ont montré que les impulsions répétitives de données en rafales avec de courtes expositions à la 5G peuvent provoquer des pics de température localisés dans la peau, entraînant des lésions tissulaires permanentes, même lorsque les valeurs moyennes de densité de puissance étaient dans les limites de sécurité acceptables de l'ICNIRP. Les auteurs ont demandé instamment la mise en place de nouvelles normes de sécurité thermique pour faire face au type de risques sanitaires possibles avec la technologie 5G :

**"La CINQUIÈME** génération de technologie de communication sans fil (5G) promet de faciliter la transmission à des débits de données jusqu'à un facteur de 100 fois supérieur à la 4G. À cette fin, des fréquences plus élevées (y compris les bandes d'ondes millimétriques), des schémas de modulation à large bande, et donc des signaux plus rapides avec des temps de montée et de descente plus raides seront employés, potentiellement en combinaison avec un fonctionnement pulsé pour l'accès multiple dans le domaine temporel... Les seuils pour les fréquences supérieures à 10 MHz fixés dans les directives d'exposition actuelles (ICNIRP 1998, IEEE 2005, 2010) sont destinés à limiter l'échauffement des tissus. Cependant, les impulsions courtes peuvent entraîner d'importantes oscillations de température, qui peuvent être exacerbées à des fréquences élevées (>10 GHz, fondamental pour la 5G), où la faible profondeur de pénétration entraîne un échauffement intense de la surface et une augmentation abrupte et rapide de la température..."

Les zones d'incertitude et les préoccupations sanitaires liées aux rayonnements de la 5G comprennent une augmentation potentielle des taux de cancer de la peau avec (ou éventuellement sans) coexposition à la lumière du soleil, l'exacerbation des maladies de la peau, une plus grande sensibilité aux micro-organismes pathogènes, des lésions cornéennes ou le développement précoce de cataractes, des effets sur les testicules et une possible absorption renforcée par résonance en raison des structures de la peau [219]. L'un des défis techniques complexes liés à l'exposition humaine aux ondes millimétriques 5G est que les modèles de propagation imprévisibles qui pourraient entraîner des niveaux inacceptables d'exposition humaine aux rayonnements électromagnétiques ne sont pas bien compris [220]. Bien que les ondes millimétriques soient presque entièrement absorbées dans un rayon de 1 à 2 mm dans des tissus biologiquement équivalents, leurs effets peuvent pénétrer plus profondément dans un corps humain vivant, éventuellement en affectant les voies de transduction des signaux. Les incertitudes liées à l'exposition à la 5G sont donc trop nombreuses pour que l'on puisse présumer de son innocuité sans disposer de données adéquates sur ses effets sur la santé. Il n'existe pas d'études adéquates sur les effets sur la santé d'une exposition à court ou à long terme aux rayonnements 5G dans des modèles animaux ou chez l'homme.

## **Discussion**

Pour élaborer des limites d'exposition aux substances toxiques et cancérigènes fondées sur la santé, les organismes de réglementation s'appuient généralement sur les preuves scientifiques disponibles concernant l'agent examiné. Au milieu et à la fin des années 1990, lorsque la FCC [4] et l'ICNIRP [9] ont initialement établi des limites d'exposition aux RFR, les hypothèses dominantes étaient que tout effet néfaste de l'exposition aux RFR était dû à un échauffement excessif, car les rayonnements non ionisants n'avaient pas suffisamment d'énergie pour rompre les liaisons chimiques ou endommager l'ADN. Cependant, les effets non thermiques des RFR sont démontrés par des études qui trouvent des effets différents selon que l'on est exposé à des ondes continues ou à des ondes pulsées ou modulées à la même fréquence et au même DAS ou à la même densité de puissance, par exemple [221,222,223,224,225,226], et par des études qui montrent des effets néfastes à des intensités d'exposition très faibles, par exemple [78, 96].

Des études d'exposition aiguë menées sur des rats et des singes dans les années 1980 [10, 11] ont suggéré qu'un DAS de 4 W/kg pourrait être une dose seuil pour les effets comportementaux. Ce DAS étant associé à une augmentation de la température corporelle d'environ 1 °C, on a de nouveau supposé qu'aucun effet négatif sur la santé ne se produirait si l'augmentation de la température corporelle centrale était inférieure à 1 °C. À partir de cette dose seuil putative, un "facteur de sécurité" de 10 a été appliqué pour les expositions professionnelles et un facteur supplémentaire de 5 (50 fois le total) a été appliqué pour la population générale, ce qui a donné lieu à des limites d'exposition dans lesquelles le DAS du corps entier était inférieur à 0,4 W/kg pour les travailleurs et à 0,08 W/kg pour la population générale. Cependant, étant donné que les parties locales du corps pouvaient recevoir des doses de RFR 10 à 20 fois supérieures au DAS du corps entier, la FCC a fixé des limites d'exposition maximales locales à des DAS 20 fois supérieurs

au DAS du corps entier, c'est-à-dire 8 W/kg en moyenne sur 1 g de tissu pour les expositions localisées des travailleurs et 1,6 W/kg en moyenne sur 1 g de tissu pour la population générale [3, 4]. L'ICNIRP a opté pour des expositions corporelles partielles qui ne dépasseraient pas 2,0 W/kg en moyenne sur 10 g de tissu cubique pour la population générale [5, 9]. Pour justifier le facteur de sécurité plus faible pour les travailleurs (10 fois) par rapport à la population générale (50 fois), l'ICNIRP [24] affirme que les travailleurs sont informés des risques associés à l'exposition aux rayonnements non ionisants et des moyens de réduire ces risques, alors que "le grand public n'est, dans la plupart des cas, pas conscient de son exposition aux rayonnements non ionisants et, sans éducation, on ne peut raisonnablement s'attendre à ce qu'il prenne des précautions pour minimiser ou éviter tout effet néfaste de l'exposition". Du point de vue de la santé publique, la FCC et l'ICNIRP devraient sensibiliser le public à son exposition aux RFR et promouvoir des mesures de précaution pour minimiser les effets néfastes potentiels, en particulier pour les enfants et les femmes enceintes. Huit recommandations pratiques de l'International EMF Scientist Appeal visant à protéger et à éduquer le public sur les effets négatifs potentiels sur la santé des expositions aux CEM non ionisants [227] sont présentées dans le tableau 2.

**Tableau 2** Mesures de précaution recommandées par l'Appel international des scientifiques sur les CEM  
Tableau complet

Les études comportementales aiguës qui servent de base aux limites d'exposition de la FCC et de l'ICNIRP manquaient d'informations sur les effets potentiels des rayonnements RF qui peuvent survenir après des durées d'exposition plus longues, et elles ne traitaient pas des effets des modulations des ondes porteuses utilisées dans les communications sans fil. Les recherches sur les RFR menées au cours des 25 dernières années ont produit des milliers d'articles scientifiques, dont beaucoup démontrent que les études comportementales aiguës sont inadéquates pour développer des limites d'exposition protectrices pour la santé des humains et de la faune, et que les hypothèses inhérentes qui sous-tendent les limites d'exposition de la FCC et de l'ICNIRP ne sont pas valides. Tout d'abord, 4 W/kg n'est pas un seuil de DAS pour les effets sur la santé causés par l'exposition aux RFR ; des études expérimentales à des doses plus faibles et pour des durées d'exposition plus longues ont démontré une cardiomyopathie, une cancérogénicité, des dommages à l'ADN, des effets neurologiques, une perméabilité accrue de la barrière hémato-encéphalique et des dommages au sperme (voir Hypothèses 1-3). De multiples études épidémiologiques solides sur le rayonnement des téléphones cellulaires ont révélé des risques accrus de tumeurs cérébrales (hypothèse 6), et ces résultats sont étayés par des preuves claires de la cancérogénicité des mêmes types de cellules (cellules gliales et cellules de Schwann) provenant d'études animales. Même les études menées par D'Andrea et al. [89, 90] avant l'adoption des limites ont révélé des perturbations comportementales chez les rats exposés aux RFR pendant 14 ou 16 semaines à des DAS moyens de 0,7 W/kg et de 1,23 W/kg. Une combinaison de la durée et de l'intensité de l'exposition serait plus appropriée pour établir des normes de sécurité

pour l'exposition aux RFR des systèmes de communication mobile, y compris les téléphones mobiles, les stations de base et le WiFi.

Plus de 120 études ont démontré des effets oxydatifs associés à l'exposition à des RFR de faible intensité (fichier supplémentaire 1 : annexe 1). Les dommages à l'ADN qui ont été signalés dans les études sur les RFR étaient très probablement causés par l'induction d'un stress oxydatif, qui est une caractéristique clé des cancérigènes humains [88], plutôt que par une ionisation directe (hypothèse 2). La génération d'espèces réactives de l'oxygène a également été liée aux lésions de l'ADN et à la cancérogénicité des rayons UVA [87] et de l'amiante [228]. Malgré l'énorme quantité de preuves scientifiques des effets à faible dose des RFR, l'IEEE [229] maintient que la perturbation comportementale reste l'effet le plus sensible et le plus reproductible des RFR. C'est cette opinion qui a contribué à ce que la FCC [3] et l'ICNIRP [5] réaffirment leurs précédentes limites d'exposition aux RFR.

D'autres préoccupations concernant les limites d'exposition actuelles aux RFR sont qu'elles ne tiennent pas compte des effets synergiques potentiels dus à la co-exposition à d'autres agents toxiques ou cancérigènes, de l'impact des rayonnements pulsés ou des modulations de fréquence, des fréquences multiples, des différences de niveaux d'absorption ou de susceptibilité chez les enfants, ou des différences de sensibilité aux RFR entre les individus (voir hypothèses 4, 5, 7, 8). Actuellement, les expositions cumulées des enfants sont beaucoup plus élevées que celles des générations précédentes et elles continuent d'augmenter [230]. L'ICNIRP [23, 179] reconnaît que ses lignes directrices ne tiennent pas compte des sous-groupes sensibles et admet qu'il est difficile de distinguer les "effets biologiques" des "effets sur la santé". Les symptômes neurologiques, dont certains sont reconnus par l'ICNIRP et dont souffrent actuellement les personnes atteintes de HSEM, sont très certainement des "effets sur la santé" non thermiques qui doivent être atténués en fournissant des environnements avec des expositions réduites aux CEM anthropiques pour les personnes hypersensibles.

Les effets débilissants et les restrictions dont souffrent les adultes et les enfants atteints d'HSEM constituent une violation de la loi sur l'égalité de 2010, de la loi sur les droits de l'homme et d'autres cadres éthiques et juridiques. L'absence de réponse et de protection appropriée de ce groupe est déjà à l'origine d'une morbidité et d'une mortalité évitables, ainsi que d'un déficit économique dû aux journées de travail perdues, aux indemnisations pour dommages à la santé et à l'augmentation des frais de santé. Inversement, la prise en compte de ce groupe, comme le suggère l'ICNIRP [179], en "ajustant les recommandations pour la population générale afin d'inclure ces groupes", permettrait non seulement de réduire les impacts négatifs pour les personnes souffrant d'HSEM, mais aussi d'améliorer la santé publique de manière plus générale, étant donné les autres problèmes de santé liés au RNI qui sont mis en évidence dans cet article.

Le fait de baser les limites d'exposition locale des tissus sur des cubes de 1 g [3] ou de 10 g [5] sous-estime considérablement le DAS spatial de pointe par rapport au fait de baser les limites d'exposition locale des tissus sur des cubes plus petits (par exemple 100 mg ou

10 mg), et ne constitue donc pas un paramètre dosimétrique fiable pour évaluer l'absorption des CEM à des fréquences supérieures à 1 GHz (hypothèses 11, 12). Les volumes spécifiés par la FCC et l'ICNIRP pour les limites locales du DAS des tissus sont trop importants pour se concentrer sur les cellules souches qui sont des cibles importantes pour la cancérogenèse. Pour réduire les risques sanitaires liés aux expositions aux RFR, les limites de distribution localisée du DAS devraient être basées sur des cubes de 100 mg, ou de préférence de 10 mg.

Une autre lacune importante soulevée dans ce document est que ni la FCC ni l'ICNIRP n'abordent les préoccupations relatives aux effets environnementaux des RFR sur la faune, alors qu'il existe une littérature abondante démontrant les effets perturbateurs des RFR sur le comportement de la faune (hypothèse 13).

Les facteurs d'incertitude/de sécurité choisis arbitrairement et appliqués au seuil putatif du SAR pour les RFR sont terriblement inadéquats pour protéger la santé publique (hypothèses 9 et 10). Si l'on se base sur la manière dont l'Agence américaine de protection de l'environnement, le Conseil international d'harmonisation et le National Institute for Occupational Safety and Health (US NIOSH) appliquent les facteurs d'incertitude/de sécurité à une dose sans effet nocif observé (NOAEL) chez les animaux de laboratoire [182,183,184], le facteur de sécurité pour les RFR serait d'au moins 900 à 10 000, soit 18 à 200 fois plus que le facteur de sécurité recommandé par la FCC et l'ICNIRP pour la population générale. Ce facteur de sécurité important est basé sur des ajustements pour la variabilité humaine, l'exposition à vie à partir d'études à court terme, et les insuffisances de la base de données qui incluent une caractérisation incomplète de la toxicité du RFR. Il est clair que les études comportementales aiguës qui ont servi de base aux limites actuelles d'exposition aux RFR ne permettent pas de caractériser les risques pour la santé humaine associés à une exposition à long terme à ce type de rayonnement. Le rapport du NCRP de 1986 [6] et le document ANSI/IEEE de 1992 [7] ont reconnu que lorsque des études futures sur les effets biologiques des RFR seront disponibles, y compris les effets des expositions chroniques ou les preuves d'interactions non thermiques, il sera nécessaire d'évaluer et éventuellement de réviser les normes d'exposition. Lorsque la FCC [3] et l'ICNIRP [5] ont réaffirmé leurs limites d'exposition des années 1990, elles ont rejeté les preuves scientifiques qui invalidaient les hypothèses sur lesquelles reposent ces limites d'exposition. Une réévaluation indépendante des limites d'exposition aux RFR basée sur les connaissances scientifiques acquises au cours des 25 dernières années est nécessaire et aurait dû être réalisée depuis longtemps. Cette évaluation devrait être effectuée par des scientifiques et des médecins qui n'ont pas de conflits d'intérêts et qui ont une expertise en matière d'exposition aux RF-EMF et de dosimétrie, de toxicologie, d'épidémiologie, d'évaluation clinique et d'évaluation des risques. Des précautions particulières doivent être prises pour garantir que les interprétations des données relatives aux effets sur la santé et la fixation de limites d'exposition aux RF ne soient pas influencées par l'armée ou l'industrie des télécommunications. En attendant, les fabricants devraient être obligés de développer des technologies plus sûres [227].



Enfin, nous notons notre préoccupation concernant le déploiement mondial des réseaux de communication 5G pour un transfert plus rapide de grandes quantités de données, mais sans études adéquates sur les effets sur la santé démontrant la sécurité des ondes millimétriques à haute fréquence. En raison des limites de la pénétration et de la distance de déplacement des ondes millimétriques, des réseaux denses de stations de base sont montés sur des structures telles que des poteaux électriques dans les villes très peuplées. De plus, comme l'absorption des CEM à des fréquences supérieures à 6 GHz est minimale, l'ICNIRP [5] a spécifié la densité de puissance absorbée ( $S_{ab}$ ) comme paramètre dosimétrique pour les "effets de chauffage" aux fréquences supérieures.  $S_{ab}$  est une fonction de la densité de puissance incidente ( $S_{inc}$ ) et du coefficient de réflexion d'entrée ( $\Gamma$ ). Dans les scénarios de champ proche,  $S_{inc}$  n'a pas de valeur singulière ; cela est dû en grande partie à la nature hétérogène des tissus du corps humain et à leurs paramètres pertinents (tels que la permittivité, la conductivité équivalente, la densité de masse), qui varient dans différentes régions du corps et avec la fréquence. Par conséquent, à moins d'utiliser une méthode de simulation des CEM puissante et des modèles humains réalistes, les valeurs du  $S_{inc}$  et du coefficient de réflexion seraient difficiles à estimer avec précision, ce qui rendrait le  $S_{ab}$  résultant peu fiable.

L'hypothèse selon laquelle la 5G est sans danger aux limites de densité de puissance recommandées par l'ICNIRP (50 W/m<sup>2</sup> et 10 W/m<sup>2</sup> en moyenne sur 6 min pour les expositions professionnelles et 30 min pour les expositions du public, respectivement) en raison de sa pénétration minimale dans le corps ne justifie pas le rejet de la nécessité de mener des études sur les effets sur la santé avant de mettre en œuvre les réseaux 5G. Les nouveaux réseaux de communication entraîneront des expositions à une forme de rayonnement qui n'a jamais été expérimentée auparavant par le grand public (hypothèse 14). La mise en œuvre de la technologie 5G sans informations adéquates sur les effets sur la santé soulève de nombreuses questions, telles que : L'exposition au rayonnement 5G : (i) compromettra-t-elle la capacité de la peau à assurer une protection contre les micro-organismes pathogènes ? (ii) exacerbera-t-elle le développement de maladies de la peau ? (iii) augmentera-t-elle le risque de cancers de la peau induits par la lumière du soleil ? (iv) augmentera-t-elle le risque de dommages au cristallin ou à la cornée ? (v) augmentera-t-il le risque de lésions testiculaires ? (vi) exercera-t-elle des effets sur les tissus plus profonds, soit indirectement à la suite d'effets sur les structures superficielles, soit plus directement en raison d'une pénétration plus profonde des composantes ELF des signaux RF modulés ? (vii) aura-t-il des effets négatifs sur les populations d'animaux sauvages ? Les réponses à ces questions et à d'autres qui sont pertinentes pour la santé des humains et des animaux sauvages devraient être fournies avant que des expositions généralisées aux rayonnements 5G ne se produisent, et non après. Sur la base des leçons qui auraient dû être tirées des études sur le rayonnement radioélectrique à des fréquences inférieures à 6 GHz, nous ne devrions plus nous fier à l'hypothèse non vérifiée selon laquelle la technologie sans fil actuelle ou future, y compris la 5G, est sûre sans avoir effectué des tests adéquats. Agir autrement n'est pas dans le meilleur intérêt de la santé publique ou environnementale.

Disponibilité des données et des matériaux

Toutes les citations de la littérature sont disponibles en ligne.

#### Abréviations

ANSI :

American National Standards Institute

CDMA :

Accès multiple par répartition en code

dB :

Décibel :

DECT :

Technologie numérique améliorée sans fil

EHS :

Hypersensibilité électromagnétique

ELF :

Extrêmement basse fréquence

EMF :

Champ électromagnétique

FCC :

Commission fédérale des communications

FDA :

Food and Drug Administration

GHz :

Gigahertz

GBM :

Glioblastome multiforme, cancer du cerveau

GSM :

Système mondial de communication mobile

CIRC :

Centre international de recherche sur le cancer

ICNIRP :

Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants

IEEE :

Institute of Electrical and Electronics Engineers (Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens)

LTE :

Long Term Evolution (4G)

MMW :

Onde millimétrique

NCRP :

National Council on Radiation Protection and Measurements (Conseil national de la radioprotection et des mesures)

NIR :

Rayonnement non ionisant

nT :

Nanotesla

NTP :

Programme national de toxicologie

8-OHdG :

8-hydroxy-2'déoxyguanosine

psSAR :

Débit d'absorption spécifique spatial de pointe

RFR :

Rayonnement de radiofréquence

ROS :

Espèces réactives de l'oxygène

SAR :

Débit d'absorption spécifique

UMTS :

Service universel de télécommunications mobiles (3G)

UVR :

Rayonnement ultraviolet

5G :

Sans fil de 5ème génération

Références

(cf. PDF en anglais pour avoir accès à tous les liens en anglais : impossible de tout traduire. Traduction à faire par vous-même avec deepL ou autres traducteurs selon ce qui vous intéresse )