

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 25 juillet 2023

AVIS **de l'Agence nationale de sécurité sanitaire** **de l'alimentation, de l'environnement et du travail**

relatif aux lignes directrices visant à limiter l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques (100 kHz – 300 GHz)

*L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.
L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.
Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.
Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).
Ses avis sont publiés sur son site internet.*

L'Anses a été saisie le 2 novembre 2021 par la Direction générale de la santé et la Direction générale de la prévention des risques afin de réaliser une expertise sur les lignes directrices visant à limiter l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

En France, comme dans la majorité des pays européens, des valeurs limites pour l'exposition de la population générale aux champs électromagnétiques ont été définies dans la réglementation, en s'appuyant sur la Recommandation 1999/519/CE¹ de l'Union européenne publiée en 1999. Pour limiter l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques, le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne ont établi la Directive 2013/35/UE², transposée en droit français par le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016. Les valeurs limites d'exposition figurant dans les textes européens ont été reprises des propositions de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp),

¹ 1999/519/CE : Recommandation du Conseil, du 12 juillet 1999, relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz).

² Directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques), abrogeant la directive 2004/40/CE.

organisation non gouvernementale dont l'objectif est de protéger les personnes et l'environnement contre les effets néfastes des rayonnements non ionisants³. Les « lignes directrices » publiées à cette fin par l'Icnirp en 1998 concernaient l'ensemble du spectre électromagnétique jusqu'à 300 GHz. Les termes « lignes directrices » désignent, dans le cadre des travaux de l'Icnirp, l'ensemble des recommandations et arguments qui les sous-tendent afin de limiter l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques, dans l'objectif d'éviter les effets sur la santé associés, considérés par l'Icnirp comme scientifiquement avérés. Ces dernières années, l'organisation a entrepris une mise à jour de ses lignes directrices concernant les champs électromagnétiques radiofréquences, dont une version provisoire a été soumise à une consultation publique pendant l'été 2018 (Icnirp, 2018), à laquelle l'Anses a contribué, à la demande de la Direction générale de la santé⁴.

De nouvelles recommandations ont ainsi été publiées par l'Icnirp en 2020 concernant la protection des personnes exposées à des champs électromagnétiques radiofréquences dans la gamme de 100 kHz à 300 GHz. Elles remplacent la section 100 kHz à 300 GHz des lignes directrices de l'Icnirp publiées en 1998, mais également la section 100 kHz à 10 MHz des lignes directrices publiées en 2010 concernant les basses fréquences.

À la suite de cette publication, la Commission européenne a donné mandat⁵, en juin 2021, à son Comité scientifique des risques sanitaires, environnementaux et émergents (Scheer) afin d'étudier les impacts éventuels de cette mise à jour sur les actes législatifs européens concernés (Recommandation européenne 1999/519/CE et Directive européenne 2013/35/UE). Le Scheer a publié un avis provisoire⁶, en réponse à ce mandat, le 22 août 2022. Une consultation publique concernant cet avis a été ouverte par le Scheer, du 22 août au 25 septembre 2022, à laquelle l'Anses a répondu (cf. Annexe 6).

La saisine du 2 novembre 2021 de la Direction générale de la santé et de la Direction générale de la prévention des risques demandait à l'Anses de réaliser une expertise sur les lignes directrices visant à limiter l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques et la construction des valeurs limites proposées par la Commission européenne. Il s'agissait, dans un premier temps, « d'examiner :

- les évolutions majeures apportées par rapport aux lignes directrices de 1998 ;
- les éventuels écarts entre les valeurs proposées et les propositions faites par l'Anses lors des précédentes expertises sur l'exposition aux radiofréquences et en particulier celles issues du rapport « Exposition aux radiofréquences et santé des enfants » ;
- la prise en compte des évolutions technologiques relevant des radiofréquences dans la construction des indicateurs d'exposition retenus par l'Icnirp ».

Les travaux réalisés en réponse à ces questionnements, formalisés dans le présent avis, ont par ailleurs été mobilisés par l'Anses pour formuler les commentaires adressés au Scheer

³ L'Icnirp a été créée en 1992, avec un statut d'association enregistrée en Allemagne, au titre d'organisation à but non lucratif avec une mission scientifique. Les statuts et l'organisation de l'Icnirp peuvent être consultés sur son site internet : <https://www.icnirp.org/en/about-icnirp/aim-status-history/index.html>.

⁴ Appui scientifique et technique n° 2018-SA-0153 du 29 juin 2018.

⁵ https://health.ec.europa.eu/system/files/2021-07/scheer_q_023_0.pdf.

⁶ https://health.ec.europa.eu/system/files/2022-08/scheer_o_044_0.pdf.

dans le cadre de la consultation publique suivant la publication de son avis provisoire en août 2022.

Il était également demandé à l'Anses, dans un second temps, d'engager des travaux méthodologiques sur la construction de valeurs limites d'exposition dans le domaine des champs électromagnétiques, dans l'objectif de proposer une méthode adaptée et de nouvelles valeurs limites d'exposition. Ces travaux seront menés prochainement dans le cadre d'un groupe de travail spécifiquement constitué, sous l'égide du comité d'experts spécialisé « Agents physiques et nouvelles technologies ».

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques et nouvelles technologies ». L'expertise collective a été réalisée par le CES sur la base d'un rapport initial rédigé par 5 rapporteurs externes et l'Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques de l'Anses. Les travaux ont été présentés au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques les 16 décembre 2021, 9 mars 2023, 6 avril 2023, et 11 mai 2023. Ils ont été adoptés par le CES réuni le 11 mai 2023.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet : <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

Les actes législatifs et la recommandation européenne associés aux limitations de l'exposition aux champs électromagnétiques ont été consultés, ainsi que les différentes publications de l'Icnirp.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

Les nouvelles lignes directrices publiées par l'Icnirp en 2020, relatives à l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences, ont été analysées afin d'identifier :

- les évolutions par rapport à celles datant de 1998 ;
- si la question des effets éventuels liés à des co-expositions avec d'autres agents a été abordée par l'Icnirp ;
- si les spécificités des enfants ont été prises en compte ;
- si l'évolution des technologies, notamment de communication mobile, a été intégrée à la construction des indicateurs d'exposition.

3.1. Principes et terminologie

L'objectif annoncé par l'Icnirp dans sa publication relative à l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques radiofréquences (Icnirp, 2020) est « [...] d'établir des lignes

directrices pour limiter l'exposition aux champs électromagnétiques afin d'assurer un niveau élevé de protection pour tous contre les effets néfastes avérés sur la santé des expositions aux champs électromagnétiques radiofréquence continus et discontinus, à court et à long terme. »

Pour déterminer les niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques qui permettent de protéger les personnes de leurs effets délétères, l'Icnirp a répertorié, dans la littérature scientifique, les effets sur les systèmes biologiques néfastes pour la santé humaine. Pour chaque effet sanitaire que l'Icnirp a considéré comme scientifiquement étayé⁷, elle a identifié le « seuil d'effet néfaste pour la santé », c'est-à-dire le niveau d'exposition le plus faible connu pour causer cet effet. Ces valeurs limites d'exposition sont nommées par l'Icnirp « restrictions de base ». Elles se rapportent à des grandeurs physiques directement liées aux effets nocifs sur la santé induits par les radiofréquences (par exemple, selon la fréquence considérée, le débit d'absorption spécifique (DAS en W/kg) ou la densité de puissance (S en W/m²), liées à l'échauffement des tissus corporels⁸). La plupart de ces grandeurs physiques ne sont accessibles qu'à l'intérieur du corps exposé aux champs électromagnétiques : elles ne peuvent pas, de fait, être facilement mesurées. Des grandeurs physiques plus accessibles à la mesure, qui permettent de caractériser l'exposition incidente (en l'absence du corps exposé), ont alors été considérées : par exemple le champ électrique (en V/m), l'induction magnétique (en μ T) ou encore la densité de puissance équivalente en onde plane (en W/m²). Les valeurs limites associées à ces grandeurs sont appelées « niveaux de référence ».

Les « niveaux de référence » ont été dérivés des « restrictions de base » par l'Icnirp pour fournir un degré de protection au moins équivalent : une exposition est donc considérée comme conforme aux lignes directrices s'il est démontré qu'elle est inférieure soit aux restrictions de base pertinentes, soit aux niveaux de référence pertinents. Par ailleurs, un dépassement des niveaux de référence n'implique pas nécessairement un dépassement des restrictions de base. En effet, selon l'Icnirp, la construction des niveaux de référence à partir des restrictions de base repose sur des hypothèses conservatrices. Les niveaux de référence sont donc encore plus protecteurs que les restrictions de base correspondantes dans la plupart des scénarios d'exposition.

Qu'il s'agisse des restrictions de base ou des niveaux de référence, l'Icnirp propose, dans ses lignes directrices, des valeurs distinctes pour la population générale et pour les travailleurs. Plus précisément, les valeurs sont établies à partir des mêmes seuils de danger, mais un coefficient de sécurité différent est appliqué en fonction de la population considérée. Il en résulte que les valeurs limites conseillées pour la population générale sont plus basses que

⁷ L'adjectif « substantiated » (traduit ici par « étayé ») utilisé par l'Icnirp pour qualifier les effets sur la santé pris en compte est explicité dans la publication des lignes directrices de 2020 : [...] ICNIRP considers that, in general, reported adverse effects of radiofrequency EMFs on health need to be independently verified, be of sufficient scientific quality and consistent with current scientific understanding, in order to be taken as "evidence" and used for setting exposure restrictions. Within the guidelines, "evidence" will be used within this context, and "substantiated effect" used to describe reported effects that satisfy this definition of evidence.

⁸ Pour une description précise des différentes grandeurs physiques et de leurs unités (cf. Tableau 1, Annexe 4) utilisées par l'Icnirp et dans la suite de ce document, on peut se référer à l'annexe A des lignes directrices de l'Icnirp publiées en 2020 (p. 503-504) : <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf>.

celles appliquées aux travailleurs⁹. Cette différence est justifiée, selon l'Icnirp, par le fait que la population générale est composée d'individus de tous âges et de tous états de santé – incluant les personnes vulnérables – qui, contrairement aux travailleurs, n'ont possiblement pas connaissance de leur exposition et des risques potentiellement associés à cette exposition. Selon l'Icnirp, les personnes en milieu de travail sont des adultes exposés dans des conditions maîtrisées, formés aux risques potentiels liés aux champs électromagnétiques et aux éventuelles mesures de protection à mettre en œuvre.

3.2. Articulation des textes européens avec les lignes directrices de l'Icnirp

- **Gammes de fréquences concernées par les lignes directrices de l'Icnirp**

Les lignes directrices publiées par l'Icnirp en 1998 concernaient l'ensemble du spectre électromagnétique jusqu'à 300 GHz.

En 2010, de nouvelles lignes directrices ont été établies pour la protection des personnes exposées aux champs électriques et magnétiques dans la gamme des basses fréquences, de 1 Hz à 100 kHz (Icnirp, 2010). Cependant, dans ce document, l'Icnirp précise que sous certaines conditions d'exposition, les effets sur le système nerveux pris en compte dans le domaine des basses fréquences sont susceptibles de se produire jusqu'à environ 10 MHz. Par conséquent, les lignes directrices publiées en 2010 formulaient des recommandations dans une gamme de fréquences étendue jusqu'à 10 MHz.

Les lignes directrices relatives aux champs magnétiques statiques (invariables avec le temps) ont été publiées dans un document séparé (Icnirp, 2009).

Les nouvelles lignes directrices de l'Icnirp publiées en 2020 concernent la protection des personnes exposées à des champs électromagnétiques radiofréquences dans la gamme de 100 kHz à 300 GHz, étant donné que l'échauffement des tissus corporels, responsable d'effets délétères pour la santé, peut se produire dans le domaine des radiofréquences à partir de 100 kHz. Cette nouvelle publication remplace la partie 100 kHz à 300 GHz des lignes directrices de l'Icnirp publiées en 1998, mais également la partie 100 kHz à 10 MHz des lignes directrices de l'Icnirp publiées en 2010 concernant les basses fréquences.

En résumé, les lignes directrices de l'Icnirp distinguent les gammes de fréquences suivantes pour la prévention d'effets spécifiques :

- 1 Hz - 100 kHz : effets sur le système nerveux ;
- 100 kHz - 10 MHz : effets sur le système nerveux, astreinte thermique pour le corps entier et échauffement local excessif des tissus ;
- 10 MHz - 10 GHz : astreinte thermique pour le corps entier et échauffement local excessif des tissus ;
- 10 GHz - 300 GHz : échauffement excessif des tissus à la surface du corps ou à la proximité de cette surface.

- **Directive et recommandation européennes**

La directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juillet 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux

⁹ Les valeurs des restrictions de base pour la population générale sont 5 fois inférieures à celles relatives à l'exposition des travailleurs.

risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques), antérieure à la publication de l'Icnirp en 2020, prend en compte les lignes directrices de l'Icnirp publiées en 2009 pour les champs statiques, en 2010 pour les basses fréquences, et en 1998 pour les radiofréquences et au-delà.

La recommandation 1999/519/CE du Conseil de l'Europe, du 12 juillet 1999, relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz) est quant à elle fondée uniquement sur les lignes directrices de l'Icnirp publiées en 1998.

Les valeurs limites d'exposition liées aux fréquences dites « intermédiaires », entre 100 kHz et 10 MHz, précisées dans les lignes directrices publiées par l'Icnirp en 2010, représentaient déjà une évolution par rapport à 1998. Ces évolutions étant prises en compte dans la directive 2013/35/UE, la comparaison entre les lignes directrices de l'Icnirp 1998 et 2020 est focalisée, dans les paragraphes suivants, sur les fréquences à partir de 10 MHz, en dehors des évolutions notables intervenues pour la bande 100 kHz - 10 MHz entre les lignes directrices de l'Icnirp 2010 et 2020.

3.3. Analyse des principales évolutions des lignes directrices publiées par l'Icnirp entre 1998 et 2020

Trois mécanismes d'action sur le vivant résultant de l'exposition aux champs électromagnétiques sont considérés comme démontrés par l'Icnirp : la stimulation nerveuse (entre 100 kHz et 10 MHz), l'échauffement par absorption diélectrique et la perméabilisation des membranes. L'Icnirp indique que les études publiées depuis 1998 ne mettent pas en évidence de danger avéré nouveau en-dessous de la valeur seuil de 4 W/kg pour le DAS moyenné dans le corps entier. Elles permettent cependant de préciser le danger lié à l'échauffement, notamment celui lié à l'absorption principalement superficielle des tissus au-dessus de 6 GHz. L'Icnirp souligne par ailleurs le manque de recherches sur les systèmes ostéo-articulaire, musculaire, respiratoire, digestif et excrétoire pour pouvoir établir des conclusions sur le danger pour ces systèmes. L'annexe 3 synthétise l'argumentaire développé par l'Icnirp pour établir les seuils d'apparition d'effets sur la santé utilisés pour en déduire les valeurs limites d'exposition qu'elle recommande.

3.3.1. Évolution des grandeurs et des valeurs limites d'exposition proposées par l'Icnirp

Les valeurs limites d'exposition pour la population générale d'une part et les travailleurs d'autre part sont liées aux seuils de danger par des coefficients de sécurité différents. Pour la population générale, un facteur de sécurité de 50 est appliqué ; pour les travailleurs, le facteur de sécurité est de 10. Ces facteurs, dont les valeurs ne sont pas argumentées, n'ont pas évolué depuis les premières publications de l'Icnirp.

Pour la bande de fréquences de 100 kHz à 6 GHz, les restrictions de base et les niveaux de référence n'ont pas changé entre les lignes directrices publiées en 1998 et en 2020.

Pour la bande de fréquences de 6 GHz à 300 GHz, les principales modifications apportées dans les lignes directrices publiées en 2020 sont explicitées ci-dessous.

Des grandeurs ont été ajoutées par l'Icnirp dans les lignes directrices publiées en 2020, afin de couvrir toutes les situations pour lesquelles des restrictions de base et des niveaux de référence sont proposés : densité de puissance absorbée (S_{ab} , en W/m^2) ; densité d'énergie

absorbée (U_{ab} , en J/m^2) ; densité de puissance équivalente en onde plane (S_{eq} , en W/m^2) ; densité d'énergie équivalente en onde plane (U_{eq} , en J/m^2) (cf. Tableau 2, Annexe 4). Les grandeurs champ électrique (E , en V/m^1), champ magnétique (H , en A/m^1) et densité de puissance (S , en W/m^2) ont été renommées E_{inc} , H_{inc} et S_{inc} ¹⁰ pour représenter le fait que ces grandeurs sont mesurées en l'absence du corps exposé. Le volume, les surfaces ou les durées de moyennage ont été modifiées¹¹. Une comparaison détaillée des grandeurs et valeurs limites d'exposition associées proposées par l'Icnirp en 1998 et en 2020 est présentée dans le Tableau 2 en Annexe 4.

3.3.2. Modification d'éléments présents dans les lignes directrices de 1998

- **Exposition en régime permanent¹² du corps entier**

Dans les lignes directrices publiées par l'Icnirp en 1998, les restrictions de base relatives à l'exposition du corps entier sont définies par une valeur limite sur le DAS corps entier entre 100 kHz et 10 GHz, celui-ci devant être moyenné sur une durée de 6 minutes. Dans les lignes directrices publiées par l'Icnirp en 2020, la valeur limite sur le DAS corps entier – dont la valeur est inchangée – s'applique désormais jusqu'à 300 GHz et la durée de moyennage est à présent de 30 minutes¹³. Cette durée est fixée en relation avec la régulation thermique du corps humain : l'Icnirp considère qu'un moyennage sur 30 minutes correspond davantage au temps nécessaire à une élévation de la température corporelle de 1°C, augmentation susceptible d'engendrer, selon l'Icnirp, des effets sur la santé. Plus particulièrement, l'Icnirp estime que, tant que la puissance absorbée est inférieure en moyenne à 4 W/kg durant 30 minutes, l'élévation de température peut être compensée par la régulation thermique. Ces estimations tiennent compte de la capacité du corps humain adulte à dissiper environ 1 W/kg au repos, cette valeur augmentant en cas d'effort intense et lors d'une exposition à des champs électromagnétiques supérieurs à 100 kHz.

Pour les effets non thermiques, les restrictions de base pour l'exposition aux champs électromagnétiques de 100 kHz à 10 MHz s'expriment en champ électrique induit E_{ind} (V/m), sans changement par rapport aux recommandations de l'Icnirp publiées en 2010. Dans cette gamme de fréquences où s'observent différents types d'effets, les valeurs limites d'exposition sont établies en lien avec les seuils associés aux effets thermiques et de stimulation nerveuse. La publication de l'Icnirp en 2020 insiste sur le fait que les lignes directrices restreignent l'exposition aux champs électromagnétiques à haute fréquence afin de limiter l'augmentation de la température plutôt que la valeur de la température elle-même, alors que les effets sur la

¹⁰ L'indice *inc* signifie ici « incident », c'est-à-dire le rayonnement « incident », tel qu'il se présente au niveau du corps exposé, avant interaction avec celui-ci. Le rayonnement incident peut être ensuite pour partie « absorbé » par le corps, « réfléchi » et « transmis » en proportions dépendant des caractéristiques du rayonnement et de la matière.

¹¹ Pour une explicitation détaillée des différentes notions abordées ici, se référer aux documents de l'Icnirp correspondants.

¹² Ce terme désigne une exposition en « régime permanent », c'est-à-dire dans la situation où l'amplitude moyenne de l'exposition ne varie pas, à l'exclusion des émissions pulsées, de type radar par exemple.

¹³ L'Icnirp donne peu de références scientifiques pour justifier cette évolution de 6 à 30 min. Par ailleurs, les émissions auxquelles la population est exposée (population générale ou travailleurs) peuvent être « intermittentes », c'est-à-dire alterner des phases d'émission et d'absence d'émission. Dans la pratique, moyenné sur une durée plus longue rend possible l'intégration de pics d'exposition i) plus intenses sur une courte durée ; ii) de même intensité mais plus nombreux ou sur une durée plus longue ; tout en respectant les valeurs limites, puisque cela n'aurait pas d'impact sur la valeur moyenne du DAS.

santé sont principalement liés à la température corporelle. Cette stratégie est utilisée car la température du corps dépend de nombreux facteurs qui n'entrent pas dans le cadre de ces lignes directrices, comme la température ambiante, les vêtements et l'activité physique. L'Icnirp explique que la valeur maximale d'accroissement de température retenue (1 °C) est conservatrice, car un DAS moyen pour le corps entier d'environ 6 W/kg, dans la gamme de 100 kHz à 6 GHz, pendant au moins une heure dans des conditions thermiquement neutres (28°C, nu, au repos), est nécessaire pour induire une augmentation de 1°C de la température centrale du corps humain adulte.

- **Exposition localisée**

Pour l'exposition localisée à une partie du corps, les DAS dans la tête, le tronc et dans les membres restent, selon l'Icnirp, les grandeurs pertinentes pour évaluer le respect des restrictions de base. Ces grandeurs s'appliquent désormais aux fréquences inférieures à 6 GHz, contre 10 GHz dans les recommandations de 1998.

La température locale critique des tissus est fixée par l'Icnirp à 41°C. Pour les limites d'exposition locale, aux fréquences inférieures à 6 GHz, il est considéré qu'une durée de 6 minutes est suffisante pour que la chaleur se diffuse et que la température s'équilibre à l'échelle d'un cube correspondant à une masse de 10 g de tissus. Un indicateur DAS_{10g}^{14} est ainsi défini et un facteur de sécurité de 2 est appliqué par rapport au seuil d'effet considéré, pour retenir un DAS de 10 W/kg pour la tête et le torse et 20 W/kg pour les membres dans le cas des travailleurs. Pour la population générale, ces valeurs sont ramenées respectivement à 2 W/kg et 4 W/kg. Les valeurs définies spécifiquement pour les membres prennent en compte le fait qu'ils sont à une température plus basse que le reste du corps et refroidissent plus rapidement.

Dans la bande de fréquences entre 6 et 300 GHz, l'Icnirp, en 1998, avait fondé les restrictions de base sur la mesure directe de la densité de puissance incidente. En 2020, la grandeur jugée pertinente est désormais la densité de puissance absorbée par les tissus S_{ab}^{15} . Celle-ci doit être évaluée sur une aire de 4 cm², avec une contrainte supplémentaire à partir de 30 GHz, à savoir que la densité de puissance absorbée localement sur une aire de 1 cm² ne doit pas dépasser deux fois la valeur limite¹⁶.

Les expositions localisées de durées inférieures à 6 minutes n'étaient pas prises en compte dans les lignes directrices publiées en 1998. De nouvelles valeurs limites ont été introduites

¹⁴ Le DAS_{10g} correspond au DAS localisé moyenné dans un cube de 10g de tissus.

¹⁵ La densité de puissance absorbée est égale à la densité de puissance incidente moins la densité de puissance réfléchie.

¹⁶ En effet, aux fréquences les plus élevées, les lignes directrices publiées par l'Icnirp en 1998 prévoyaient de calculer la moyenne de l'exposition localisée sur une région de 20 cm², tandis que les lignes directrices qu'elle a publiées en 2020 précisent qu'il convient de calculer la moyenne sur une région de 4 cm² (et dans certaines situations, pour des fréquences supérieures à 30 GHz, sur une région de 1 cm²). Cette zone de calcul de la moyenne de 4 cm² correspond à la face du volume de calcul de la moyenne (10 g) du DAS et a pour objectif de fournir une transition cohérente à 6 GHz entre les grandeurs volumiques et surfaciques. Ce changement garantit également qu'une exposition qui serait autorisée en étant répartie sur plus de 20 cm² ne puisse pas être concentrée dans une petite région et ainsi conduire à augmenter excessivement la température. Il en résulte une valeur numérique de la restriction de base plus élevée que dans les lignes directrices de l'Icnirp datant de 1998, pour les champs électromagnétiques supérieurs à 6 GHz. Toutefois, en raison de l'utilisation d'une zone de calcul de la moyenne de 4 cm² dans les nouvelles lignes directrices contre 20 cm² dans celles publiées en 1998, l'exposition maximale définie par l'Icnirp dans le corps pour ces champs est maintenant plus faible que dans les lignes directrices publiées en 1998.

en 2020 pour ce type d'exposition, entre 400 MHz et 300 GHz. Elles s'expriment, en fonction du temps d'exposition, en absorption spécifique locale¹⁷ entre 400 MHz et 6 GHz et en densité d'énergie absorbée locale¹⁸ entre 6 GHz et 300 GHz. L'Icnirp explique que les expositions brèves et intenses aux radiofréquences peuvent augmenter de manière excessive la température locale des tissus, même si la puissance moyenne sur 6 minutes ne dépasse pas les restrictions moyennes définies pour ce temps d'exposition. Ce phénomène, lié à la profondeur de pénétration des ondes dans les tissus, est d'autant plus prononcé que la fréquence augmente. En dessous de 400 MHz, en raison de la grande profondeur de pénétration des rayonnements, l'absorption spécifique totale résultant du moyennage du DAS pendant 6 minutes ne peut provoquer une augmentation de température supérieure au seuil d'effet délétère retenu, quelle que soit la répartition temporelle de l'exposition. Il n'existe donc pas de limite (ni restriction de base, ni niveau de référence) aux fréquences inférieures à 400 MHz, pour l'exposition localisée dont la durée est inférieure à 6 minutes.

3.3.3. Suppression d'éléments présents dans les lignes directrices de 1998

- **Effets auditifs**

La restriction de base visant à éviter l'effet auditif provoqué par un champ pulsé n'est pas reprise dans les lignes directrices publiées en 2020, celui-ci n'étant pas associé, selon l'Icnirp, à un effet néfaste sur la santé mais à un effet sensoriel. Pourtant, l'un des principes énoncés dans le préambule de la Constitution de l'Organisation mondiale de la santé est le suivant : « 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 ». ¹⁹ Or, il est important de noter qu'une gêne répétée peut avoir des conséquences à court terme sur la sécurité, notamment dans certaines situations de travail, et à long terme sur la santé, notamment mentale. Par ailleurs, l'effet sensoriel auditif lié à l'exposition aux radiofréquences est scientifiquement bien établi. L'absence de détection de perte auditive ne préjuge en rien de l'installation d'une surdité « cachée » et d'une fatigue auditive lors d'expositions prolongées aux radiofréquences. Cette notion de surdité cachée (diminution de la capacité auditive non révélée par les tests audiométriques classiques) a notamment été démontrée lors d'expositions prolongées à des sons de faibles intensités non-traumatisants ou du vieillissement, par exemple.

- **Courants de contact**

Les courants de contact, qui peuvent survenir entre 100 kHz et 110 MHz approximativement, se produisent lorsqu'une personne touche un objet conducteur qui s'est chargé électriquement sous l'action d'un champ électromagnétique et est donc porté à un potentiel électrique différent de celui de la personne. Un courant électrique peut alors circuler entre l'objet et la personne. Plus la zone de contact est petite, plus la densité de courant est élevée, ce qui peut conduire à un niveau de DAS élevé dans les tissus. En conséquence, il est utile de disposer d'un niveau de référence pour éviter de dépasser les restrictions de base liées aux courants de contact.

¹⁷ SA : énergie absorbée par unité de masse de tissus biologiques en J/kg. L'Icnirp précise que l'exposition due à une impulsion, un groupe d'impulsions ou à un sous-groupe d'impulsions dans un « train », ainsi que la somme des expositions (y compris les champs électromagnétiques non pulsés), délivrée en t secondes, ne doit pas dépasser les valeurs limites proposées, afin de garantir que les seuils de température ne sont pas dépassés.

¹⁸ U_{ab} : densité d'énergie absorbée par unité de surface de tissus biologiques en kJ/m².

¹⁹ <https://www.who.int/fr/about/governance/constitution>.

Les lignes directrices publiées par l'Icnirp en 2020 ne fournissent pas de niveaux de référence pour les courants de contact, contrairement à celles de 1998.

L'Icnirp considère en 2020 qu'il n'est pas possible de fournir un tel niveau de référence en raison de la nécessité de tenir compte d'une variété de paramètres qui ne peuvent pas être spécifiés à l'avance de manière routinière. Pour cette raison, l'Icnirp donne, au lieu de niveaux de référence, des « conseils » aux personnes responsables de la prévention des expositions professionnelles aux radiofréquences pour limiter les risques associés aux courants de contact (ex : formation des professionnels, mise à la terre d'objets métalliques, port de gants isolants, etc.).

3.3.4. Ajout d'éléments dans les lignes directrices publiées en 2020

- **Cas des travailleuses enceintes**

Les lignes directrices publiées par l'Icnirp en 1998 et en 2010 ne faisaient pas de distinction entre les travailleuses enceintes et non enceintes en matière de restrictions d'exposition professionnelle, ce qui pouvait entraîner une exposition du fœtus supérieure aux limites applicables à la population générale. Bien que l'Icnirp considère que rien ne prouve que l'exposition d'une travailleuse enceinte aux niveaux des valeurs limites pour les travailleurs ait des effets néfastes sur la santé du fœtus, par mesure de précaution, l'organisation considère en 2020 les femmes enceintes comme appartenant à la population générale : elles sont donc soumises aux restrictions applicables au grand public, y compris dans le cadre professionnel²⁰.

- **Valeurs limites pour une exposition autre qu'une exposition en régime permanent du corps entier**

Les lignes directrices de 1998 ne fournissent des niveaux de référence que pour une exposition en continu (en régime permanent) du corps entier. Les lignes directrices de 2020 proposent, quant à elles, des niveaux de référence et des restrictions de base pour l'ensemble des situations d'exposition. Ainsi, des niveaux de référence complémentaires ont été définis pour les expositions localisées en continu, et des restrictions de base et des niveaux de référence pour les expositions dont la durée est inférieure à 6 minutes. Dans ce dernier cas, les valeurs limites dépendent de la durée de l'exposition exprimée en secondes. Les lignes directrices publiées en 1998 permettaient d'évaluer l'exposition moyenne sur 6 minutes, en autorisant implicitement un dépassement des valeurs²¹ pendant des durées inférieures à 6 minutes, dans la mesure où l'exposition moyenne respectait bien les niveaux de référence. Les lignes directrices 2020 fournissent des restrictions de base (cf. Tableau 3 in Icnirp, 2020) et des niveaux de référence (cf. Tableau 7, *ibid.*) pour des expositions dont la durée est inférieure à 6 minutes. En revanche, l'Icnirp ne précise pas comment, en pratique, mesurer les expositions dans ces situations.

²⁰ En France, la déclaration à l'employeur d'une grossesse n'est pas obligatoire. Cette déclaration, si elle est faite, peut par ailleurs être tardive pour de multiples raisons. En application du décret du 3 août 2016 transposant la Directive européenne 2013/35/UE, l'article R4152-7-1 du Code du travail prévoit que : « Lorsque, dans son emploi, la femme enceinte est exposée à des champs électromagnétiques, son exposition est maintenue à un niveau aussi faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre en tenant compte des recommandations de bonnes pratiques existantes, et en tout état de cause à un niveau inférieur aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques. ».

²¹ Valeurs de restrictions de base reprises dans le tableau 2 de la publication de l'Icnirp (Icnirp, 2020).

- **Exposition du corps entier selon sa distance aux sources d'exposition**

Les lignes directrices publiées en 2020 apportent des recommandations utiles à l'évaluation du respect des niveaux de référence relatifs à l'exposition du corps entier selon sa distance aux sources d'exposition, en distinguant ce que l'on appelle les zones de champ proche (radiatif et réactif) et de champ lointain²². Ces notions étaient mentionnées dans les lignes directrices de 1998, mais sans fournir de méthode d'évaluation spécifique. Les lignes directrices publiées en 2020 spécifient par exemple que, pour une exposition du corps entier (moyenne sur 30 minutes) :

- entre 100 kHz et 30 MHz, toutes les situations d'exposition sont considérées être en champ proche, quelle que soit la distance à la source. Ainsi, les champs électrique (E) et magnétique (H) doivent tous deux respecter les niveaux de référence correspondants ;
- entre 30 MHz et 2 GHz, pour les expositions considérées dans la zone de champ lointain, les niveaux de référence sont respectés si l'une des grandeurs physiques (champ électrique (E), magnétique (H) ou densité de puissance (S)) est inférieure à la valeur limite correspondante. Dans la zone de champ proche, qu'il s'agisse du champ réactif ou du champ radiatif, il est nécessaire que les deux champs électrique et magnétique respectent les niveaux de référence ;
- entre 30 MHz et 300 GHz, dans la zone de champ proche radiatif, le respect des valeurs limites de densité de puissance incidente (ou de la densité d'énergie incidente le cas échéant) garantit le respect des niveaux de référence. Cependant, à partir de 2 GHz, seule la densité de puissance incidente s'applique. Celle-ci peut être identifiée à la densité de puissance en onde plane dans la zone de champ lointain. Dans la zone de champ réactif, elle ne peut néanmoins pas être utilisée, il faut alors vérifier la conformité aux restrictions de base correspondantes.

Les lignes directrices publiées en 2020 précisent également les conditions d'application des niveaux de référence lorsque la durée de l'exposition est inférieure à 6 minutes. Des détails sont fournis dans le document de l'Icnirp (cf. remarques sous les tableaux dédiés). On notera qu'une condition supplémentaire s'applique pour les fréquences entre 30 GHz et 300 GHz (gamme des ondes millimétriques), pour lesquelles l'exposition moyennée sur une surface projetée d'1 cm² ne doit pas dépasser 2 fois les restrictions de base définies sur 4 cm².

L'Icnirp indique que la distinction établie entre les zones de champ proche et de champ lointain vise à garantir que les niveaux de référence soient « généralement » plus conservateurs que les restrictions de base. Cependant, en raison des complexités liées aux distinctions entre champ proche et champ lointain, l'Icnirp précise qu'il y aura toujours des situations où il ne sera pas possible d'utiliser des niveaux de référence.

Les évolutions des niveaux de référence pour l'exposition du corps entier dans les lignes directrices publiées en 2020 sont décrites et analysées ci-dessous.

- Par rapport à 1998, les lignes directrices de l'Icnirp publiées en 2010 concernant les basses fréquences, qui comprenaient des niveaux de référence pour les fréquences

²² À titre indicatif, les distances supérieures à $2D^2/\lambda$ (m), entre $\lambda/(2\pi)$ et $2D^2/\lambda$ (m), et inférieures à $\lambda/(2\pi)$ (m) d'une antenne correspondent approximativement au champ lointain, au champ proche radiatif et au champ proche réactif, respectivement. D et λ désignent la plus grande dimension de l'antenne et la longueur d'onde, respectivement, en mètres.

de champs électromagnétiques jusqu'à 10 MHz, ont diminué les niveaux de référence pour les champs électriques et augmenté ceux pour les champs magnétiques de 100 kHz à 10 MHz. En considérant de meilleures connaissances en lien avec la recherche sur les relations entre les restrictions de base et les niveaux de référence des champs électriques et magnétiques, l'Icnirp a augmenté ces niveaux de référence en 2020, réduisant ainsi le facteur de sécurité appliqué. Il en résulte que dans la gamme de fréquences de 100 kHz à 30 MHz, les niveaux de référence du champ E et du champ H sont plus élevés dans les lignes directrices datant de 2020 que dans celles publiées en 1998.

- Dans les lignes directrices de 1998, les niveaux de référence des champs E et H diminuaient avec l'augmentation de la fréquence, jusqu'à 20 MHz. Selon l'Icnirp, les recherches ont montré que pour correspondre aux restrictions de base pour le corps entier, cette diminution devrait se prolonger jusqu'à 30 MHz. Les lignes directrices 2020 prévoient donc une diminution des valeurs des niveaux de référence des champs E et H avec une fréquence croissante, qui se termine à 30 MHz.
- Il n'y a pas de différence entre les valeurs des niveaux de référence moyens pour le corps entier dans les lignes directrices publiées en 1998 et dans celles de 2020 au-dessus de 30 MHz. Cependant, les conditions d'application des niveaux de référence diffèrent entre les deux versions de ces lignes directrices. En 1998, les valeurs de niveau de référence de la zone de champ lointain pouvaient être utilisées pour les expositions dans la zone de champ proche. En 2020, l'Icnirp prévoit des niveaux de référence distincts dans les zones de champ proche et de champ lointain.
- Bien qu'en 1998 l'Icnirp ait autorisé l'utilisation du champ électrique E et du champ magnétique H pour les niveaux de référence moyens du corps entier sur l'ensemble de la gamme de fréquences de 100 kHz à 300 GHz, cette méthode peut potentiellement entraîner des inexactitudes pour les fréquences supérieures à environ 2 GHz dans la zone de champ proche. La mesure des champs E et H n'est donc plus autorisée en 2020 pour les niveaux de référence pour le corps entier au-dessus de 2 GHz. Des mesures de densité de puissance doivent être utilisées à la place.

3.4. Prise en compte des situations de coexposition

Les individus évoluent dans des environnements aux sources d'exposition multiples. De fait, les effets biologiques qui résultent de l'exposition aux radiofréquences peuvent s'ajouter à ceux causés par d'autres types d'exposition (ambiances thermiques chaudes, efforts physiques, ...). Typiquement, l'échauffement thermique lié aux radiofréquences peut venir s'ajouter à une température corporelle déjà élevée par ailleurs. Dans le cadre de l'évaluation des risques professionnels en lien avec l'exposition à des ambiances thermiques contraignantes, c'est bien le maintien de la température corporelle qui est visé ainsi que le renouvellement des moyens de régulation. L'évaluation tient compte de plusieurs facteurs influents : la température sèche ; l'humidité relative ; les vitesses d'air ; l'isolement vestimentaire ; le métabolisme (l'activité) ; la température de rayonnement (exposition au rayonnement infrarouge). Si les lignes directrices de l'Icnirp préconisent des facteurs de réduction importants pour les valeurs limites d'exposition, par rapport aux effets liés aux radiofréquences, il est nécessaire de prendre en compte d'autres sources de chaleur dans une évaluation globale du risque. Or, si les restrictions de l'Icnirp limitent les élévations de la température centrale du corps à moins de 0,1°C, les méthodes d'évaluation des risques pour

les ambiances thermiques contraignantes, et notamment le calcul d'indices de contraintes thermiques, ne prennent pas en compte l'accroissement de température lié à une exposition aux radiofréquences.

On peut donc s'interroger sur l'impact des effets thermiques liés aux expositions aux champs électromagnétiques en cas de coexposition : leur impact est-il négligeable ? Dans le cas contraire, il faudrait disposer d'outils d'évaluation adaptés à ces situations particulières.

3.5. Prise en compte de l'exposition des enfants

L'avis de l'Anses publié en 2016 sur l'exposition des enfants aux radiofréquences préconisait d'évaluer l'intérêt d'appliquer, dans certaines situations d'exposition, des valeurs limites plus basses pour tenir compte des spécificités des enfants par rapport aux adultes. Les travaux d'expertise avaient mis en évidence « que les enfants pouvaient être, dans certaines bandes de fréquences, plus exposés que les adultes. En effet, dans le cas des expositions « environnementales », c'est-à-dire liées à des sources lointaines (telles que les antennes relais de téléphonie mobile ou les émetteurs de radio et télédiffusion), la petite taille des enfants peut, par effet de résonance, engendrer des expositions moyennes sur le corps entier plus élevées que pour les adultes ». L'Anses avait alors recommandé, « dans ce contexte, que les niveaux de référence visant à limiter l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques radiofréquences (liée aux sources lointaines) soient reconsidérés, afin d'assurer des marges de sécurité suffisamment grandes pour protéger la santé et la sécurité de la population générale, et tout particulièrement celles des enfants ».

L'avis de l'Anses indiquait par ailleurs : « dans le cas d'expositions localisées, par exemple de la tête, avec des sources d'émission telles que le téléphone mobile, les études analysées montrent que, là encore, les enfants peuvent être plus exposés que les adultes, en raison de leurs spécificités morphologiques et anatomiques et de la nature de leurs tissus, avec toutefois une variabilité des résultats très importante ».

En 2020, l'Icnirp indique dans ses nouvelles lignes directrices que le facteur de sécurité appliqué aux valeurs limites d'exposition est plus protecteur qu'envisagé en 1998, compte tenu des nouvelles données scientifiques disponibles. L'Icnirp considère, en raison des spécificités notamment anatomiques des enfants, que les valeurs limites proposées sont davantage protectrices envers les enfants qu'envers les adultes. L'argument employé repose sur le fait que les niveaux d'exposition nécessaires pour provoquer une augmentation de 1°C de la température du corps chez l'enfant seraient supérieurs à ceux requis pour les adultes. L'efficacité de la thermorégulation serait en effet meilleure chez l'enfant, induisant une meilleure dissipation de la chaleur, en raison d'un ratio surface/masse plus favorable. Un DAS plus élevé serait donc nécessaire pour atteindre cette élévation de température chez les enfants. Cependant, considérant le peu de données de mesure disponibles, l'Icnirp a adopté une position conservatrice et utilise 4 W/kg moyennés sur 30 minutes comme niveau d'exposition limite aux radiofréquences (correspondant à une augmentation maximale de la température centrale du corps de 1°C), comme chez l'adulte.

Pour justifier l'application d'un seuil de sécurité identique pour les enfants et les adultes de la population générale, l'Icnirp s'appuie également sur le ratio surface/masse favorable aux enfants lors d'échanges thermiques, en considérant les tissus comme des masses inertes. Cependant, d'autres mécanismes physiques et biologiques doivent aussi être considérés, tels que :

- la possible concentration d'énergie en raison des résonances²³ dans le corps et/ou la tête des enfants, augmentant localement le DAS par rapport aux adultes à champ incident identique ;
- l'évaporation transcutanée qui dépend de la kératinisation et qui évolue en fonction du degré de prématurité et de l'âge chez le nourrisson ;
- et, d'une manière générale, la maturité du métabolisme de thermorégulation.

Ainsi, il subsiste une différence d'appréciation entre l'Icnirp et l'Anses concernant d'une part l'exposition des enfants aux radiofréquences et d'autre part la nécessité ou non de différencier ces derniers de la population adulte dans l'établissement des valeurs limites d'exposition. Cette situation nécessitera des investigations complémentaires, telles que celles engagées par l'Anses concernant l'élaboration d'une méthode de construction de valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques.

3.6. Prise en compte de l'évolution des technologies dans la construction des indicateurs d'exposition

Les valeurs limites d'exposition proposées par l'Icnirp visent à éviter tout effet sanitaire délétère scientifiquement établi, quelle que soit la source de l'exposition aux champs électromagnétiques. Avec l'évolution des technologies, notamment le déploiement de la 5G, les expositions liées par exemple à la téléphonie mobile se complexifient : de nouvelles bandes de fréquences, plus élevées, sont utilisées, les signaux de communication évoluent, rendant l'évaluation de l'exposition plus difficile. Les nouvelles lignes directrices de l'Icnirp ont donc été analysées afin d'évaluer leur adaptation aux évolutions technologiques en cours. L'annexe 5 présente en détail l'analyse synthétisée dans cette section.

Les nouvelles recommandations fournies par l'Icnirp pour évaluer la conformité de l'exposition aux valeurs limites en considérant les zones de champ proche ou lointain (cf. § 3.3.4) sont utiles dans le cadre des expositions aux nouvelles technologies. Les terminaux tels que les *smartphones* utilisés proches du corps par les particuliers génèrent en effet une exposition localisée. Actuellement, l'évaluation de la conformité aux valeurs limites de ces produits consiste à vérifier qu'une exposition maximale en régime permanent respecte les restrictions de base. Les lignes directrices publiées en 2020 pourraient apporter des pistes d'évolution quant à l'évaluation future des niveaux d'exposition à quelques centimètres d'un terminal, dans des conditions d'exposition maximale ou dans le cas de scénarios d'exposition plus proches de la réalité (par exemple en tenant compte de la durée de l'exposition selon les usages et les technologies).

En ce qui concerne les antennes relais dédiées aux communications mobiles, la distance aux personnes est généralement suffisante pour considérer que l'exposition se produit dans la zone de champ lointain. Dans certains cas cependant (*micro-* et *pico-cells*, internet des objets, travail sur les toits, etc.), on ne peut exclure qu'une exposition puisse avoir lieu dans la zone de champ proche. Comme mentionné plus haut, les lignes directrices publiées en 2020 ont été formulées pour prendre en compte ces différents scénarios et mentionnent explicitement

²³ Le corps humain absorbe préférentiellement des ondes radioélectriques dans certaines conditions de « résonance », en particulier lorsque la longueur d'onde du rayonnement est comparable avec les dimensions du corps. Voir le chapitre 4.4.3 du rapport d'expertise de l'Anses « Exposition aux radiofréquences et santé des enfants » (Anses, 2016).

dans quels cas l'évaluation devrait être réalisée à partir des restrictions de base plutôt qu'en utilisant les niveaux de référence.

Dans ses lignes directrices publiées en 2020, l'Icnirp a introduit des modifications qu'elle considère comme suffisantes²⁴ pour permettre d'éviter des effets délétères qui pourraient être liés à l'exposition aux technologies 5G. En particulier, pour les fréquences supérieures à 6 GHz, des restrictions ont été ajoutées pour le corps entier, pour les expositions locales brèves inférieures à 6 minutes, et en réduisant la surface de moyennage des indicateurs. Concernant les impulsions brèves, le concept d'absorption d'énergie spécifique (SA, en J/kg) a été introduit en complément du DAS, entre 400 MHz et 6 GHz. L'objectif était de s'assurer que des suites d'impulsions brèves produites par un système d'émission ne puissent pas provoquer une augmentation rapide de la température locale. Nonobstant la pertinence de ce nouvel indicateur pour la protection contre les effets des radiofréquences, sa mesure apparaît complexe en pratique : elle impliquerait de réaliser une analyse statistique des signaux, qui nécessiterait elle-même de connaître la distribution temporelle des impulsions courtes, dans le cas de la 5G par exemple (cf. annexe 5, section 5).

Pour évaluer les variations spatiales et temporelles des caractéristiques de l'exposition aux dispositifs des réseaux mobiles (antennes relais et téléphones), il est possible de se fonder soit sur des mesures faites en condition réelle d'exploitation, pour estimer les valeurs les plus élevées ou correspondant à un percentile donné des niveaux d'exposition (par exemple 95 ou 97 %), soit sur la valeur maximale que peut délivrer la source, mais accessible dans ce cas essentiellement lorsque la station de base n'est pas connectée au réseau, afin de la forcer à émettre à puissance maximale vers le point de mesure. Ces choix devraient être explicités et justifiés par les instances en charge de l'élaboration des normes techniques de mesure de l'exposition.

En tout état de cause, un suivi de l'évolution de l'exposition au fur et à mesure du développement de nouvelles technologies sera utile pour l'élaboration de ces normes.

Concernant les futurs déploiements de la 5G dans la bande de fréquences autour de 26 GHz, une attention particulière devra être portée sur la méthodologie de caractérisation de l'exposition, compte tenu des portées souvent courtes des liaisons, de la position et de la distribution des antennes dans un environnement donné. Par ailleurs, pour les liaisons dédiées à l'intérieur des bâtiments, le champ rayonné par l'antenne fixe placée dans un espace fermé pourra présenter de grandes inhomogénéités spatiales et temporelles. Dans ce cas, on peut donc se poser la question de la pertinence de la définition de l'exposition moyenne « corps entier » ou « membres et tête », donc des valeurs limites associées.

²⁴ À noter que l'Icnirp a publié un positionnement relatif aux technologies 5G et à la capacité de ses lignes directrices publiées en 2020 à protéger les personnes des effets des expositions associées à ces nouveaux signaux. <https://www.icnirp.org/en/applications/5g/5g.html>.

3.7. Conclusions et recommandations

3.7.1. Conclusions du CES

La protection des personnes et de l'environnement contre les effets néfastes de l'exposition aux rayonnements électromagnétiques non ionisants s'appuie essentiellement, au niveau européen, sur deux textes aux statuts juridiques différents : une recommandation et une directive²⁵. La recommandation 1999/519/CE, qui concerne la population générale, n'est pas contraignante pour les États membres. La France s'est cependant appuyée sur ce texte pour adopter des valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques, notamment ceux émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques. La Directive 2013/35/UE²⁶, quant à elle, a été transposée en droit français par décret²⁷, en 2016, afin de limiter l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques.

Les valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques utilisées dans ces textes européens proviennent principalement des travaux de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp), publiés en 1998. Afin de tenir compte de l'évolution des technologies et des connaissances en matière d'effets sur la santé des champs électromagnétiques, l'Icnirp a révisé ses lignes directrices en 2010 et en 2020, dans deux publications scientifiques concernant respectivement les basses fréquences et les radiofréquences.

Avec l'évolution des technologies mobiles (déploiement de la 5G par exemple) et de leurs usages (notamment leur utilisation par les enfants, à des âges de plus en plus précoces), la question de l'adéquation entre les valeurs limites d'exposition proposées par l'Icnirp et la protection de la santé des utilisateurs a été posée.

Le Comité d'experts spécialisé « agents physiques et nouvelles technologies », appuyé par des experts rapporteurs, expose dans cet avis une analyse des principales évolutions des lignes directrices de l'Icnirp concernant les radiofréquences entre 1998 et 2020.

La « fréquence de transition » (nommée ici fréq._{transition}), qui sépare l'absorption d'énergie électromagnétique par les tissus corporels en profondeur (fréquences inférieures à fréq._{transition}) de l'absorption en surface (fréquences supérieures à fréq._{transition}), a été modifiée de 10 à 6 GHz. Les valeurs limites préconisées en exposition corps entier et en régime permanent, pour les fréquences inférieures à 6 GHz, n'ont pas changé.

²⁵ Pour mémoire, l'Union européenne adopte différents types d'actes législatifs, qui visent à remplir les objectifs fixés dans les traités européens. Les règlements sont des actes législatifs contraignants. Ils doivent être mis en œuvre dans leur intégralité, dans toute l'Union européenne. Les directives sont des actes législatifs qui fixent des objectifs à tous les pays de l'UE. Toutefois, chaque pays est libre d'élaborer ses propres mesures pour les atteindre. Les recommandations ne sont pas contraignantes. Source : https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation_fr

²⁶ Directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques), abrogeant la directive 2004/40/CE.

²⁷ Décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques.

Pour les fréquences au-delà de 6 GHz, de nouveaux indicateurs, et donc de nouvelles valeurs limites, ont été introduits, notamment pour tenir compte de façon plus précise du lien existant entre le moyennage spatial de l'exposition et l'augmentation de la température des tissus.

L'Icnirp a également introduit de nouvelles valeurs limites (entre 400 MHz et 6 GHz) qui s'appliquent à des expositions localisées de durées inférieures à 6 minutes, afin de tenir compte de situations d'expositions brèves, notamment dans le contexte du déploiement de nouvelles technologies, telle la 5G.

Considérant les risques pour le fœtus, l'Icnirp assimile désormais les femmes enceintes, sur leur lieu de travail, à la population générale : elles sont donc soumises aux valeurs limites plus restrictives applicables au grand public, y compris dans le cadre professionnel, ce qui va dans le sens d'une plus grande protection.

A contrario, le CES relève que les valeurs limites associées à la survenue d'effets auditifs indésirables pouvant être provoqués par l'exposition à des champs pulsés ont disparu des lignes directrices publiées en 2020. De même, les courants de contact, qui peuvent se produire lorsqu'une personne touche un objet conducteur chargé sous l'action d'un champ électromagnétique, ne font plus l'objet que de « conseils » adressés aux personnes responsables de la prévention des risques liés aux expositions professionnelles.

Le CES observe qu'il subsiste une différence d'appréciation entre l'Icnirp et l'Anses concernant les spécificités de l'exposition des enfants aux radiofréquences. En effet, à l'inverse de l'Anses, l'Icnirp estime que les valeurs limites d'exposition pour la population générale sont plus protectrices pour les enfants que pour les adultes. L'Anses avait préconisé en 2016 que les niveaux de référence visant à limiter l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques radiofréquences (liée aux sources lointaines) soient reconsidérés, afin d'assurer des marges de sécurité suffisamment grandes pour protéger la santé des enfants.

S'agissant de l'exposition aux nouvelles technologies, notamment la 5G, l'Icnirp a introduit dans ses lignes directrices publiées en 2020 des modifications qu'elle considère comme suffisantes pour permettre d'éviter des effets délétères, en particulier dans le cas des systèmes d'antennes à faisceaux orientables. Cependant, le CES estime que l'émergence de nouvelles technologies (signaux, fréquences, ...) dans le futur pourrait amener à revoir les indicateurs d'exposition et les valeurs limites associées.

3.7.2. Recommandations du CES

- **Concernant la santé au travail**

Le CES remarque que les méthodes d'évaluation des risques liés au travail en ambiances thermiques contraignantes, et notamment le calcul d'indices de contraintes thermiques, ne prennent pas en compte l'accroissement potentiel de température interne lié à une exposition aux radiofréquences. On peut donc s'interroger sur l'impact des effets thermiques liés aux expositions aux champs électromagnétiques en cas de co-exposition. Le CES recommande de mettre en place des outils d'évaluation adaptés à ces situations particulières. Ainsi, le CES propose de mener :

- des études expérimentales (*in vitro* et *in vivo*) recherchant l'existence d'effets spécifiques biologiques/physiologiques d'une exposition aux radiofréquences dans un environnement sous contraintes thermiques chaudes ;
- des études cliniques sur les effets possibles sur la santé de la co-exposition aux radiofréquences et à des environnements thermiques élevés.

- **Concernant la santé des enfants**

Les enfants sont amenés à évoluer dans le même environnement et à utiliser les mêmes dispositifs de communication que les adultes, et ce de plus en plus jeunes. Le CES recommande donc que les valeurs limites d'exposition pour la population générale intègrent les éventuelles spécificités relatives aux enfants en matière d'exposition aux champs électromagnétiques et d'effets éventuels sur leur santé.

Dans cette perspective, le CES recommande que soient menées des investigations complémentaires afin :

- de mieux décrire les spécificités de l'absorption des ondes électromagnétiques par les enfants par rapport aux adultes (en considérant notamment les phénomènes de résonance, la teneur en eau du corps, le rapport entre masse et surface corporelles, ...), dans les différentes situations d'exposition (source proche, distante, différentes bandes de fréquence, ...) ;
- d'évaluer l'impact de la maturité du système de thermorégulation sur les effets thermiques.

- **Concernant l'exposition des organes reproducteurs**

L'évolution des usages des outils numériques dans la population générale (et tout particulièrement les enfants et adolescents) menant à une exposition en champ proche des organes reproducteurs (téléphone dans la poche, tablettes...), le CES recommande de poursuivre les études sur l'impact de l'exposition de ces organes.

- **Concernant la mesure et le contrôle des expositions**

- *Adapter les normes techniques de mesure de l'exposition à l'évolution des technologies*

L'introduction par l'Incirp de nouveaux indicateurs de l'exposition, adaptés à la prise en compte d'impulsions ou de groupes d'impulsions brèves, nécessitera d'élaborer des méthodes pratiques pour leur mise en œuvre sur le terrain. Le CES recommande que les travaux qui seront engagés sur ce sujet par les comités de normalisation veillent à prendre en compte les situations d'exposition maximale potentielles, afin de garantir en toutes circonstances le respect des valeurs limites. En pratique, les opérateurs du contrôle de l'exposition (Agence nationale des fréquences, laboratoires de mesure, ...) devraient pouvoir vérifier le fonctionnement des méthodes de limitation de puissance de l'émission en fonction du temps.

Par ailleurs, étant donnés les futurs déploiements de la 5G dans la bande de fréquences autour de 26 GHz et au-delà, et compte tenu des portées souvent courtes des liaisons, de la position et de la distribution des antennes dans un environnement donné, le CES préconise d'adapter si nécessaire les méthodes de caractérisation et de mesure de l'exposition.

Les terminaux mobiles ont la capacité d'adapter leur rayonnement à l'environnement (via les capteurs de mouvement, de proximité, etc.) et en particulier leur puissance électromagnétique émise. Le CES recommande donc que les comités de normalisation définissent des règles de test de conformité permettant de garantir la protection des utilisateurs en toutes circonstances, en intégrant notamment les nouveaux indicateurs proposés par l'Incirp qui prennent en compte les expositions brèves, inférieures à 6 minutes.

- *Poursuivre la surveillance des expositions aux champs électromagnétiques*

Compte tenu des prévisions d'évolution des technologies de communication mobile, à la fois en matière de taux d'occupation des réseaux, mais aussi d'utilisation de nouvelles bandes de fréquences, le CES souligne l'importance du suivi de l'évolution de l'exposition des personnes :

- par le dispositif national de mesure de l'exposition aux champs électromagnétiques géré par l'Agence nationale des fréquences ;
- par la réalisation de campagnes de mesures ciblées de l'exposition dans l'environnement ;
- par le suivi dans le temps de l'exposition réelle des personnes aux dispositifs de communication portés près du corps, et particulièrement en environnement intérieur.

- *Améliorer l'information sur les expositions aux champs électromagnétiques*

Le CES recommande de donner la possibilité aux utilisateurs de dispositifs émetteurs d'ondes électromagnétiques de suivre et connaître leur exposition dans leur usage quotidien.

• **Concernant l'exposition de l'environnement**

Le CES rappelle également qu'au-delà de la question des effets sanitaires chez l'humain, les effets éventuels des radiofréquences sur la faune et la flore mériteraient d'être mieux étudiés. Ces données spécifiques pourraient, à terme, être prises en compte dans l'établissement des valeurs limites d'exposition.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

Les premières propositions de valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques ont été publiées en 1998 par la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants. Ces valeurs et l'argumentaire scientifique qui les sous-tend ont été révisés en 2010 et en 2020, afin de tenir compte de l'évolution des technologies et des connaissances en matière d'effets sur la santé des champs électromagnétiques. Ces travaux servent de base aujourd'hui à la plupart des recommandations et réglementations prises dans le monde en matière de limitation de l'exposition des personnes et de l'environnement aux rayonnements électromagnétiques non ionisants. Ainsi, en France, les textes réglementaires limitant l'exposition aux champs électromagnétiques émis par les réseaux de téléphonie mobile, qu'il s'agisse des antennes relais ou des téléphones, ont été élaborés sur cette base.

L'Agence souligne que l'Icnirp a fondé l'élaboration de ses valeurs limites à partir d'effets sur la santé de l'exposition aux champs électromagnétiques considérés avérés. Elle rappelle qu'elle a mentionné, notamment en 2013 et en 2016, que des incertitudes persistent sur d'éventuels effets qui pourraient s'observer à long terme.

En 2013, en effet, l'expertise de l'Anses mettait en évidence, avec des éléments de preuve limités, différents effets concernant,

- sur des modèles animaux : le sommeil, la fertilité mâle et les performances cognitives ;
- chez l'humain : les gliomes pour les utilisateurs intensifs et le neurinome du nerf vestibulo-acoustique dans des études épidémiologiques, ainsi qu'avec un niveau de preuve suffisant une modification physiologique à court terme de l'activité cérébrale pendant le sommeil.

Plus spécifiquement chez les enfants, l'Agence concluait en 2013 à un effet possible des radiofréquences sur :

- les fonctions cognitives : les résultats montrant des effets aigus se basent sur des études expérimentales dont la méthodologie est bien maîtrisée ;
- le bien-être : ces effets pourraient cependant être liés à l'usage du téléphone mobile plutôt qu'aux radiofréquences qu'ils émettent.

L'Agence va engager des travaux méthodologiques sur la construction de valeurs limites d'exposition dans le domaine des champs électromagnétiques, dans l'objectif de proposer une méthode adaptée et de nouvelles valeurs limites d'exposition, tenant compte notamment des effets évoqués ci-dessus selon les niveaux de preuve associés.

Dans l'attente, l'Agence reprend les conclusions et recommandations exposées au § 3 de cet avis. En particulier, elle souligne l'importance de poursuivre la surveillance des expositions aux champs électromagnétiques et d'adapter les normes techniques de mesure de l'exposition à l'évolution des technologies.

Pr. Benoît Vallet

MOTS-CLÉS

Champs électromagnétiques, valeurs limites d'exposition, radiofréquences, effets sanitaires, lignes directrices.

Electromagnetic fields, Exposure limit values, Radiofrequencies, health effects, Guidelines.

BIBLIOGRAPHIE

Icnirp guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), health physics 74 (4):494-522, 1998.

Icnirp guidelines on limits of exposure to static magnetic fields, health physics 96(4):504-514, 2009.

Icnirp guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz), health physics 99(6):818-836, 2010.

Icnirp guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz), health physics 118(5): 483–524, 2020.

Recommandation 1999/519/CE du Conseil, du 12 juillet 1999, relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz).

Directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques), abrogeant la directive 2004/40/CE.

CITATION SUGGÉRÉE

Anses. (2023). Avis relatif aux lignes directrices visant à limiter l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques. (saisine 2021-SA-0192). Maisons-Alfort : Anses, 50 p.

ANNEXE 1 : LETTRE DE SAISINE



GOUVERNEMENT

Liberté
Égalité
Fraternité

2021-SA-0192

Ministère de la Transition Ecologique
Direction générale de la prévention des risquesService des risques sanitaires liés à l'environnement,
des déchets et des pollutions diffuses

Mission bruit et agents physiques

Ministère des Solidarités et de la Santé
Direction générale de la santéSous-direction de la prévention des risques
liés à l'environnement et à l'alimentation

Bureau environnement extérieur et produits chimiques

Nos réf. : D21-023309

Paris, le 02 NOV. 2021

Le directeur général de la santé
Le directeur général de la prévention des risques

à

Monsieur le Directeur général de l'Agence nationale
de sécurité sanitaire de l'alimentation, de
l'environnement et du travail (ANSES)**Objet** : saisine relative aux valeurs d'exposition de la population aux radiofréquences

En 2018, la Commission Internationale de Protection contre les Rayonnements Non Ionisants (ICNIRP) avait mis en consultation publique le projet de document relatif à la révision des lignes directrices d'exposition de la population aux radiofréquences. Lors de cette consultation, à la demande de la DGS, l'Anses avait transmis à la Commission un ensemble de remarques sur le projet de document.

En mars 2020, l'ICNIRP a publié le document final « ICNIRP Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz) ». De ce fait, la Commission européenne a donné mandat, en juin 2021, au comité scientifique des risques sanitaires, environnementaux et émergents (SCHEER) pour étudier les impacts éventuels sur la recommandation du 12 juillet 1999 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques. La France souhaite mobiliser toute son expertise dans cette consultation de l'UE et demande que l'Anses s'y prépare.

Tous les rapports de l'Anses ont conclu jusqu'à aujourd'hui à l'absence d'effets avérés sur la santé des ondes dès lors que les valeurs limites (qui reprennent celles de la recommandation précitée) sont respectées. Certains seuils pourraient être modifiés à la suite de cette révision et il est nécessaire le cas échéant de disposer d'éléments à faire valoir auprès de la Commission européenne.

Nous sollicitons votre agence afin de réaliser une expertise sur les lignes directrices visant à limiter l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques et la construction des valeurs limites (restrictions de base et niveaux de référence) proposées par la Commission européenne. Il s'agit dans un premier temps d'examiner :

- les évolutions majeures apportées par rapport aux lignes directrices de 1998 ;
- les éventuels écarts entre les valeurs proposées et les propositions faites par l'Anses lors des précédentes expertises sur l'exposition aux radiofréquences et en particulier celles issues du rapport « Exposition aux radiofréquences et santé des enfants » ;

Tour Séquoia – 92055 Paris La Défense cedex – Tél. 01 40 81 21 22 – www.ecologie.gouv.fr
14 avenue Duquesne – 75350 Paris 07 SP - Tél. 01 40 56 60 00 - www.social-sante.gouv.fr

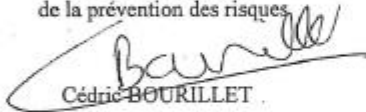
Le traitement de vos données est nécessaire à la gestion de votre demande et entre dans le cadre des missions confiées aux ministères sociaux.
Conformément au règlement général sur la protection des données (RGPD), vous pouvez exercer vos droits à l'adresse cms-rgpd@social-sante.gouv.fr ou par voie postale.
Pour en savoir plus : <https://solidarites-sante.gouv.fr/ministere/article/mentions-personnelles-et-cookies>

- la prise en compte des évolutions technologiques relevant des radiofréquences dans la construction des indicateurs d'exposition retenus par l'ICNIRP.

Vous engagerez des travaux méthodologiques sur la construction de valeurs limites d'exposition dans le domaine des champs électromagnétiques en vous appuyant sur des expertises similaires réalisées par l'agence sur d'autres thématiques (LED, éventuellement substances chimiques) dans l'objectif de proposer une méthode adaptée et de nouvelles valeurs limites d'exposition. Ce travail permettra de contribuer aux travaux menés par la Commission européenne.

Nous vous remercions de bien vouloir nous transmettre, dans les meilleurs délais, votre proposition de contrat d'expertise comprenant notamment les modalités de traitement et de restitution des travaux, dont le rendu final est attendu d'ici juin 2022 pour la gamme de fréquences 100 kHz-300 GHz (Opinion I du mandat du SCHEER) et d'ici juin 2023 pour la gamme de fréquences 1 Hz-100 kHz (Opinion II du mandat du SCHEER).

Le Directeur général
de la prévention des risques



Cédric BOURILLET

Le directeur général
de la santé



Jérôme SALOMON

Copies :
Direction générale des entreprises
Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes

ANNEXE 2 : PRESENTATION DES INTERVENANTS

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

RAPPORTEURS

M. Pierre DEGAUQUE – Professeur émérite à l'université de Lille, Institut d'électronique, microélectronique et nanotechnologies (IEMN – UMR CNRS 8520), Groupe Télécommunications, Interférences et Compatibilité Electromagnétique (TELICE) – Technologies de communication, exposition aux champs électromagnétiques.

M. René De SÈZE – Chercheur senior à l'Unité de Toxicologie Expérimentale, Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) - Médecine, toxicologie expérimentale, effets des champs électromagnétiques sur le vivant.

M. Jean-Christophe JOLY – Ingénieur en électromagnétisme, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), centre d'études de Gramat – Électromagnétisme, dosimétrie.

M. Stéphane TIRLEMONT – Contrôleur de sécurité référent : Centre de mesures physiques de la CARSAT Nord Picardie - Prévention des risques professionnels, risques liés aux expositions aux rayonnements électromagnétiques.

M. Benjamin VATOVEZ – Ingénieur civil physicien, responsable de la cellule champs électromagnétiques, Institut scientifique de service public (ISSeP), Liège, Belgique - Exposition, mesure et calcul des champs électromagnétiques.

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant :

- CES « Agents physiques et nouvelles technologies » – 16 décembre 2021, 9 mars 2023, 6 avril 2023, 11 mai 2023.

Présidente

Mme Anne PEREIRA DE VASCONCELOS – Chargée de recherche, Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), Laboratoire de neurosciences cognitives et adaptatives - UMR 7364, Centre national de la recherche scientifique (CNRS) – Université de Strasbourg.

Membres

Mme Valentina ANDREEVA - Maître de conférences à l'université Sorbonne Paris Nord, Équipe de recherche en épidémiologie nutritionnelle.

M. Serge BOARINI - Professeur agrégé en Philosophie, Bourgoin-Jallieu.

Mme Anne BOURDIEU - Médecin du travail, experte au pôle des risques physiques et psychosociaux, domaine des rayonnements ionisants et non ionisants, INRS, Département Études et assistance médicales, Paris.

M. Jean-Marie BURKHARDT - Directeur de recherche en Psychologie, Ergonomie Cognitive à l'université Gustave Eiffel (ex-IFSTTAR) - Laboratoire de Psychologie et d'ergonomie appliquée.

M. Philippe CHAUMET-RIFFAUD - Professeur des universités – Praticien hospitalier, spécialiste en Biophysique et Médecine nucléaire à l'université Paris-Saclay

M. Thomas CLAUDEPIERRE – Enseignant chercheur à l'université de Lorraine.

M. Pierre DEGAUQUE - Professeur émérite à l'université de Lille, Institut d'électronique, microélectronique et nanotechnologies (IEMN – UMR CNRS 8520), Groupe Télécommunications, Interférences et Compatibilité Electromagnétique (TELICE).

M. Thierry DOUKI – Chercheur / Ingénieur docteur en chimie, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

M. Didier DULON - Directeur de Recherche à l'INSERM, en Neurosciences, Institut de l'Audition, Institut Pasteur, Paris.

M. Guillaume DUTILLEUX - Professeur acoustique de l'environnement à l'université de sciences et techniques de Norvège, Trondheim, Département des Systèmes Électroniques.

M. Jack FALCÓN – Chercheur émérite du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), spécialisé en chronobiologie animale, Biologie des Organismes et Ecosystèmes Aquatiques (BOREA), CNRS 7208, Muséum National d'Histoire Naturelle.

M. Nicolas FELTIN - Responsable du Département matériaux au laboratoire national de métrologie et d'essais, direction de la métrologie scientifique et industrielle, Paris.

M. Luc FONTANA - Professeur de Médecine et santé au travail à l'université Jean Monnet Faculté de médecine, Consultation de pathologies professionnelles et environnementales, Saint-Etienne.

M. Pierre-Marie GIRARD - Chargé de Recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS) en biologie des radiations, Institut Curie – Centre de Recherche – UMR3347, Centre Universitaire, Orsay.

M. Fabrice GIRAUDET - Maître de Conférences - HDR, Faculté de Médecine - Université Clermont-Auvergne, UMR INSERM 1107 - NEURO-DOL, Clermont-Ferrand.

M. Pascal GUENEL - Directeur de recherche, directeur de l'équipe cancer et environnement, INSERM, Centre de recherche en épidémiologie et santé des populations (CESP Inserm U1018), Villejuif (démission le 20 juin 2022).

Mme Irina GUSEVA-CANU – Epidémiologiste, Professeur des universités, Université de Lausanne.

Mme Frédérique MOATI – Maître de conférences en biophysique et médecine nucléaire à l'Université Paris Sud XI / Praticien hospitalier / Radiopharmacienne / Biologiste, AP-HP Hôpital Bicêtre retraitée.

M. Jean-Luc MOREL - Chargé de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Institut des Maladies Neurodégénératives, Bordeaux.

Mme Catherine MOUNEYRAC – Vice-Recteur Recherche et Valorisation à l'Université catholique de l'ouest (UCO).

Mme Anne-Lise PARADIS – Chargée de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Mme Marie-Pierre ROLS – Directrice de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Mme Valérie SIMONNEAUX – Chercheuse en neurobiologie des rythmes au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Mme Alicia TORRIGLIA – Médecin, Directeur de recherche en ophtalmologie, Centre de Recherches des Cordeliers, Institut National de la Santé et de la recherche médicale (Inserm).

Mme Françoise VIÉNOT – Professeur émérite - Centre de Recherche sur la Conservation (CRC), Muséum national d'Histoire naturelle, Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Ministère de la Culture, 36 rue Geoffroy Saint Hilaire, 75005 Paris, France.

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Mme Marion BOYER – Coordinatrice d'expertise scientifique – Anses

M. Olivier MERCKEL – Chef d'unité - Anses

Contribution scientifique

Mme Oliva ROTH-DELGADO – Coordinatrice d'expertise scientifique - Anses

M. Olivier MERCKEL – Chef d'unité – Anses

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI – Anses

ANNEXE 3 – ARGUMENTAIRE BIOLOGIQUE DE L'ICNIRP POUR ETABLIR LES SEUILS D'APPARITION D'EFFETS

L'argumentaire biologique qui sous-tend l'établissement des valeurs limites d'exposition par l'Icnirp est développé d'une part dans le corps du texte de la publication (Icnirp, 2020) et d'autre part dans son annexe B (« littérature pour l'évaluation du risque »).

- **Effets auditifs**

Comme indiqué au paragraphe 3.3.3, les effets auditifs liés à l'expansion thermoélastique produite par l'absorption des micro-ondes constituent, selon l'Icnirp, un phénomène sensoriel sans indication d'un effet sanitaire délétère. L'Icnirp considère qu'il n'est donc pas justifié d'établir des valeurs limites pour les éviter : les valeurs limites associées ont été supprimées des lignes directrices publiées en 2020.

- **Stimulation nerveuse**

Les précisions sur les restrictions permettant d'éviter une stimulation nerveuse ont précédemment été mises à jour dans les recommandations de 2010 sur les champs électromagnétiques basses fréquences et ont été reprises dans les recommandations de 2020 pour la gamme de fréquences entre 100 kHz et 10 MHz.

En 2010, l'Icnirp indiquait explicitement ne pas considérer la stimulation nerveuse comme étant un effet sanitaire délétère, mais reconnaissait que cette stimulation peut être une gêne dans certaines circonstances de travail et devrait être évitée. On notera qu'en 2020, comme décrit ci-dessus, les effets auditifs ont été retirés des lignes directrices alors qu'ils sont également considérés comme une gêne.

La principale modification qui en résulte est le remplacement, dans les restrictions de base, de la densité de courant induite par le champ électrique induit. À noter que la densité de courant n'est pas directement mesurable, ce qui rend la vérification de sa conformité impossible. Le champ électrique induit est mesurable dans des mannequins, appelés « fantômes ».

- **Échauffement des tissus**

Le seuil de danger pour une exposition du corps entier était établi en 1998 à partir d'études chez le rongeur et le primate extrapolées à l'humain. Des études en IRM ont par ailleurs montré que la température chez l'humain augmente de moins de 1°C pour un DAS de 4 W/kg. À ce niveau de DAS, les processus de thermorégulation permettent de conserver un état d'équilibre et il n'y a pas de défaillance du corps.

Les conditions d'échauffement chez l'humain ont depuis été précisées : une heure d'exposition du corps entier à 6 W/kg ne produit pas d'élévation de température supérieure à 1°C en conditions de neutralité thermique (nu, au repos, à une température ambiante de 28°C). De fait, l'Icnirp considère que le seuil de danger déjà fixé de 4 W/kg est conservateur, mais que les connaissances acquises depuis la définition de ce seuil permettent d'allonger la durée de moyennage considérée, précédemment de 6 minutes, à 30 minutes.

Dans le cas des fréquences supérieures à 6 GHz, une élévation de température de 1°C peut être produite par une exposition supérieure à 1 000 W/m². Cette valeur est donc considérée comme seuil de danger pour l'humain dans cette gamme de fréquences.

À l'heure actuelle, selon l'Icnirp, l'échauffement excessif du corps ou des tissus est le seul danger scientifiquement avéré lié à une exposition aux radiofréquences. Cet échauffement

excessif intervient lors d'expositions à des niveaux supérieurs aux valeurs limites, au-delà desquelles peu d'études ont été effectuées chez l'humain. Afin de préciser ces niveaux de danger, l'Icnirp a donc considéré les données scientifiques obtenues chez l'humain sur l'échauffement induit par d'autres sources d'exposition que les ondes radiofréquences.

Pour les expositions locales, l'Icnirp considère que des effets potentiellement délétères peuvent apparaître à partir d'une température de 41°C, en restant conservatif. La température basale étant différente selon les régions du corps, l'Icnirp a identifié deux types de tissus.

- Les tissus superficiels comme la peau et les membres, parfois appelés « *shell* » (« écorce ») dans le domaine de la régulation thermique, pour lesquels la température d'équilibre se situe entre 33 et 36°C²⁸. Il est considéré pour ces tissus qu'une augmentation de température de 5°C représente un danger. Cette augmentation de température peut être produite par :
 - en-dessous de 6 GHz, un DAS_{10g} de 40 W/kg moyenné sur 6 minutes, préconisant une valeur limite de 20 W/kg en exposition professionnelle et de 4 W/kg en exposition de la population générale ;
 - au-dessus de 6 GHz, une densité surfacique de puissance S de 200 W/m² sur une surface supérieure ou égale à 4 cm², préconisant une limite de 100 W/m² pour les expositions professionnelles et de 20 W/m² pour l'exposition de la population générale ;
 - au-dessus de 30 GHz, une densité surfacique de puissance de 400 W/m² sur une surface supérieure ou égale à 1 cm², préconisant une densité de puissance absorbée limite de 100 W/m² en exposition professionnelle et de 20 W/m² en exposition de la population générale.
- Les tissus profonds comme la tête et le tronc, parfois appelés « *core* » (« noyau »), pour lesquels la température doit normalement rester en-dessous de 38,5°C en dehors d'un état fébrile, dans des conditions physiologiques pouvant inclure l'effort sportif²⁹. Il est considéré pour ces tissus qu'une augmentation de température de 2°C représente un danger. Cette augmentation de température peut être produite par :
 - en-dessous de 6 GHz, un DAS_{10g} de 20 W/kg moyenné sur 6 minutes, préconisant une valeur limite de 10 W/kg en exposition professionnelle et de 2 W/kg en exposition de la population générale ;
 - au-delà de 6 GHz, les valeurs limites d'exposition locales sont identiques à celles pour le corps entier.

À noter qu'en pratique seuls les tissus superficiels sont exposés au-dessus de 6 GHz.

Des expositions émises par impulsions brèves pourraient ne pas laisser à l'échauffement le temps de diffuser dans les tissus. Ceci a conduit l'Icnirp à définir des valeurs limites pour la densité d'énergie absorbée :

- volumique (SA) entre 400 MHz et 6 GHz ;
- surfacique absorbée totale (Uab) sur 4 cm² entre 6 et 30 GHz ;

²⁸ Ce type de tissu, dit type 1, inclut plus précisément la peau, la graisse, les muscles et les os, les membres qui sont principalement constitués de ces tissus, le pavillon de l'oreille, la cornée, l'iris et la chambre antérieure de l'œil.

²⁹ Ce type de tissu, dit type 2, inclut plus précisément la tête, les yeux, l'abdomen, le dos, le thorax et le pelvis (hors tissus de type 1), les testicules et le fœtus.

- surfacique absorbée totale (Uab) sur 1 cm² au-delà de 30 GHz.

- **Performances cognitives**

Des études chez le rongeur et le primate, citées en 1998 par l'Icnirp, se sont intéressées aux effets de l'exposition aux radiofréquences sur les performances cognitives. En 1998, l'Icnirp reconnaissait une altération des performances cognitives chez le rat et le singe pour un DAS corps entier de 1 à 3 W/kg. En 2020, l'Icnirp considère qu'une modification comportementale est observée chez le primate à partir d'une exposition de 1 W/kg corps entier environ, pour lui permettre de réduire sa température corporelle, mais attribue la décroissance des performances cognitives à une diminution d'appétence liée à l'échauffement (saturation énergétique) uniquement à des niveaux supérieurs à 5 W/kg chez le rat et 4 W/kg chez le primate.

Si l'Icnirp considère toujours, en 2020, que le niveau de DAS à partir duquel des effets sur la santé chez l'animal peuvent apparaître est de 4 W/kg, l'Icnirp précise désormais que l'altération des performances cognitives n'intervient plus à partir de 1-3 W/kg, mais de 4 W/kg, et que la modification du comportement, qui peut apparaître dès 1 W/kg n'est pas en soi un effet sur la santé.

Selon l'Icnirp, les nombreux travaux réalisés sur les fonctions cognitives, les potentiels évoqués ou le flux sanguin cérébral depuis 1998 n'ont pas mis en évidence d'effet sanitaire délétère avéré des ondes radiofréquences chez l'humain en-dessous des valeurs limites précédemment établies. L'Icnirp considère également que des modifications maintes fois confirmées et donc considérées comme fiables ont été observées dans la bande alpha de l'EEG d'éveil et dans la bande des fuseaux de l'EEG de sommeil, mais qu'il n'a pas été mis en évidence de conséquence sanitaire de ces modifications physiologiques.

- **Effets à long terme**

L'Icnirp déclare, dans ses lignes directrices de 1998, que seuls les effets établis ont été utilisés comme base pour définir les valeurs limites d'exposition. Les données disponibles n'étant pas suffisantes pour valider l'hypothèse d'effets d'une exposition à long terme tels que l'induction de cancer ou des effets sur la fertilité, seuls les effets immédiats ou à court terme d'une exposition aiguë étaient pris en compte.

À noter que la recommandation européenne 1999/519/CE, qui a adopté les valeurs limites des lignes directrices de l'Icnirp 1998, allait plus loin et interprétait l'analyse de l'Icnirp selon ces termes :

« L'induction du cancer en tant que risque d'une exposition à long terme n'a pas été considérée comme établie. Toutefois, étant donné qu'il y a un coefficient de sécurité d'environ 50 entre les valeurs seuils pour l'apparition d'effets aigus et les valeurs des restrictions de base, la présente recommandation couvre implicitement les effets éventuels à long terme dans la totalité de la gamme de fréquences. »

Cette hypothèse n'est pas énoncée par l'Icnirp, qui déclare seulement que les données disponibles ne permettent pas de définir des limites pour d'éventuels effets sanitaires à long terme dont l'existence n'a pas été établie. Le facteur de 50, utilisé pour définir les restrictions de base relatives à l'exposition de la population générale, a été déterminé suite à la prise en compte :

- des effets d'une exposition à des champs électromagnétiques dans des conditions environnementales sévères (température élevée, etc.) ou durant des activités intenses ;
- de la sensibilité thermique potentiellement plus élevée chez certains groupes de population, tels que les personnes fragiles et/ou âgées, les nourrissons et les jeunes enfants, et les personnes souffrant de maladies ou prenant des médicaments qui compromettent la tolérance thermique.

En l'occurrence, les limites sont 5 fois plus strictes pour le public que pour les travailleurs pour lesquels le facteur de réduction est de 10, la population générale étant constituée d'individus de tous âges et dans des états de santé variables, pouvant inclure des groupes ou des personnes particulièrement sensibles. Dans de nombreux cas, les membres du public n'ont pas connaissance de leur exposition aux champs électromagnétiques et on ne peut pas s'attendre à ce qu'ils prennent des précautions pour minimiser ou éviter l'exposition.

Compte tenu de cela, déclarer que « la présente recommandation couvre implicitement les effets éventuels à long terme dans la totalité de la gamme de fréquences » sur la seule base du facteur de sécurité choisi par l'Icnirp semble aller au-delà de la formulation adoptée dans les lignes directrices de 1998.

Les lignes directrices de 2020 consacrent une section aux études relatives aux éventuels effets cancérigènes des champs électromagnétiques. L'Icnirp mentionne notamment deux études relatives aux éventuels effets de la téléphonie mobile sur l'animal, à savoir les études menées par le *National Toxicology Program* (NTP) aux États-Unis et celle conduite par l'Institut Ramazzini en Italie. Selon l'Icnirp, les deux études présentent des inconsistances et des limitations importantes qui ne permettent pas de conclure que les champs électromagnétiques radiofréquences ont un effet cancérigène. Les études épidémiologiques, comme par exemple l'étude *Interphone*, ne permettent pas non plus, selon l'Icnirp, de soutenir que l'exposition aux champs électromagnétiques, aux niveaux d'exposition auxquels le public est habituellement soumis, puisse avoir un effet cancérigène.

ANNEXE 4 : COMPARAISON DES GRANDEURS ET VALEURS LIMITES D'EXPOSITION (LIGNES DIRECTRICES 1998 ET 2020)

Tableau 1 : grandeurs physiques et unités correspondantes

Table 1. Quantities and corresponding SI units used in these guidelines.

Quantity	Symbol ^a	Unit
Absorbed energy density	U_{ab}	joule per square meter ($J m^{-2}$)
Incident energy density	U_{inc}	joule per square meter ($J m^{-2}$)
Plane-wave equivalent incident energy density	U_{eq}	joule per square meter ($J m^{-2}$)
Absorbed power density	S_{ab}	watt per square meter ($W m^{-2}$)
Incident power density	S_{inc}	watt per square meter ($W m^{-2}$)
Plane-wave equivalent incident power density	S_{eq}	watt per square meter ($W m^{-2}$)
Induced electric field strength	E_{ind}	volt per meter ($V m^{-1}$)
Incident electric field strength	E_{inc}	volt per meter ($V m^{-1}$)
Incident electric field strength	E_{ind}	volt per meter ($V m^{-1}$)
Incident magnetic field strength	H_{inc}	ampere per meter ($A m^{-1}$)
Specific energy absorption	SA	joule per kilogram ($J kg^{-1}$)
Specific energy absorption rate	SAR	watt per kilogram ($W kg^{-1}$)
Electric current	I	ampere (A)
Frequency	f	hertz (Hz)
Time	t	second (s)

^a*Italicized* symbols represent variables; quantities are described in scalar form because direction is not used to derive the basic restrictions or reference levels.

Tableau 2 : comparaison des grandeurs et valeurs limites d'exposition associées proposées par l'Icnirp en 1998 et en 2020 (nouveautés/modifications soulignées)

Note : t = travailleur, pg = population générale

	Icnirp 1998	Icnirp 2020
DAS corps entier (W/kg)		
<i>Gamme de fréquences</i>	100 kHz à 10 GHz	100 kHz à <u>300 GHz</u>
<i>Calcul</i>	Moyenne sur 6 min et/ou en fonction de la fréquence	Moyenne sur <u>30 min</u>
<i>Valeurs</i>	0,4 (t) et 0,08 (pg) W/kg	0,4 (t) et 0,08 (pg) W/kg
DAS local (W/kg)		
<i>Gamme de fréquences</i>	Jusqu'à 10 GHz	Jusqu'à <u>6 GHz</u>
<i>Calcul</i>	Sur 10 g contigus de tissu Sur 6 min	Sur 10 g <u>cubique de tissu</u> Sur 6 min
<i>Valeurs</i>	10 (t) et 2 (pg) W/kg	10 (t) et 2 (pg) W/kg – tête et tronc 20 (t) et 4 (pg) W/kg - membres
Densité de puissance (W/m²)		
<i>Gamme de fréquences</i>	Incidente S 10 à 300 GHz	<u>Absorbée S_{ab}</u> À partir de <u>6 GHz</u>
<i>Calcul</i>	Sur 20 cm ² Sur 6 min	Sur <u>4 cm², voire 1 cm²</u> Sur <u>moins de 6 min</u>

	Icnirp 1998	Icnirp 2020
Valeurs	50 à 10 W/m ²	<u>100 à 20 W/m²</u>
Absorption spécifique SA (mJ/kg)	SA local pour la tête, pour champ pulsé	<u>Local tête, torse et membre</u>
Gamme de fréquences	0,3 à 10 GHz	<u>Pour une exposition entre 0 et 6 min</u> <u>400 MHz à 6 GHz</u>
Calcul	Sur 10 g	<u>Sur 10 g</u>
Valeurs	10 mJ/kg (<i>t</i>) 2 mJ/kg (<i>pg</i>)	<u>Dépend de la durée d'exposition</u> <u>Différente pour local tête/torse et pour local membre</u>
Densité surfacique d'énergie absorbée U_{ab} (J/m²)	Notion inexistante	<u>Densité d'énergie absorbée U_{ab} (kJ/m²) pour la tête et les membres</u>
Gamme de fréquences		<u>6 à 300 GHz</u>
Calcul		<u>Sur 4 cm²</u>
Valeurs		<u>Dépend de la durée d'exposition</u>
Densité de courant de contact (mA/m²)		<u>Pas de restriction ; donne des conseils pour informer sur les dangers potentiels et comment les atténuer</u>
Gamme de fréquences	Jusqu'à 10 MHz	
Intensité du courant	1 à 40 mA	
E (V/m) induit dans les tissus	Notion inexistante	<u>100 kHz à 10 MHz</u>
Gamme de fréquences		

	Icnirp 1998	Icnirp 2020
Calcul		<u>Sur 2x2x2 mm³</u>
Valeurs		<u>[1,35 (pg) à 2,7 (t)]x10⁻⁴f (avec f en Hz)³⁰</u>
Exposition « impulsionnelle »	E (V/m)	(Remplacé par :) <u>densité d'énergie incidente (kJ/m²) U_{inc}</u>
Calcul	Valeur fixe	<u>Sur 4 cm²</u> <u>Sur moins de 6 min</u>
Valeurs	32x champ efficace	Variable (Icnirp 2020 ; table 7)
E, H, B et S		(Remplacé par :) <u>E_{inc}, H_{inc} et densité de puissance incidente corps entier S_{inc}</u>
Calcul	Moyenne sur 6 min	<u>Sur 30 min</u> <u>Modifié en niveau et en fréquence</u>
		(Et par :) <u>E_{inc}, H_{inc} et densité de puissance incidente locale S_{inc}</u> <u>Sur 6 min</u> <u>Modifié en niveau et en fréquence</u>

À noter que dans les lignes directrices publiées par l'Icnirp en 2020, entre 30 MHz et 2 GHz, la densité de puissance équivalente en onde plane peut être substituée par la densité de puissance incidente.

³⁰ Ici, un facteur 2 est appliqué entre les valeurs appliquées à la population générale et les travailleurs.

ANNEXE 5 : PRISE EN COMPTE DE L'EVOLUTION DES TECHNOLOGIES

Cette annexe décrit tout d'abord les divers types de mesures qui doivent permettre de vérifier que les niveaux d'exposition au voisinage des nouvelles sources d'émission, comme celles de la 5G, restent compatibles avec les valeurs limites d'exposition préconisées par l'Icnirp. L'objectif de cette partie est de souligner les difficultés rencontrées et les interrogations qui en résultent. Celles-ci sont ensuite reprises pour proposer des évolutions dans les approches de l'Icnirp.

■ Introduction sur les notions de conformité intrinsèque et d'exposition

Les lignes directrices publiées par l'Icnirp ont uniquement pour but d'élaborer des valeurs limites pour les niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques afin d'éviter tout effet sanitaire délétère scientifiquement établi et, en conséquence, les aspects « métrologie » n'ont pas vocation à y être traités. Dans la démarche actuelle, une distinction claire doit être faite entre, d'une part, la conformité d'un système de rayonnement par rapport aux valeurs limites d'exposition et, d'autre part, les niveaux d'exposition réels auxquels sera soumis le public dans l'environnement formé par les systèmes de télécommunication.

Dans le premier cas, en effet, pour les systèmes de communication mobile, les antennes d'émission d'une station de base ou d'un terminal mobile sont envisagées séparément et sont supposées émettre de façon continue à leur niveau de puissance maximum (pire cas d'exposition). Ce sont ces valeurs maximales du champ (ou de la puissance) en un point quelconque accessible au public (ou du personnel habilité) qui doivent être inférieures aux valeurs limites préconisées par l'Icnirp en 2020. Tous ces aspects liés à la « conformité intrinsèque » d'une structure rayonnante donnée sont détaillés dans la section suivante.

Dans un système de télécommunication opérationnel sur le terrain, en revanche, la durée d'émission de chacun des ensembles rayonnants, donc la durée de leurs échanges, va jouer un rôle majeur sur le niveau d'exposition réel des personnes. Pour les liens « descendants » de la station de base vers le terminal, le champ reçu dépendra fortement de l'environnement et de la position relative du terminal par rapport à la station de base pour un usage donné et sera donc très variable au cours du temps. Dans le cas de la 5G, la possibilité des équipements à émettre des faisceaux très directifs et agiles, gérés par la station de base en fonction de la quantité d'informations à transmettre à chaque terminal, accentuent cette variabilité temporelle.

Comme la station de base va répartir la puissance rayonnée entre différents terminaux en fonction non seulement de leur nombre mais également du volume de données à échanger, le champ moyen au voisinage d'un de ces terminaux sera en général bien inférieur à celui mesuré lors de l'évaluation de la conformité intrinsèque, toute la puissance étant concentrée dans ce dernier cas sur un seul terminal. Pour tenir compte de cet aspect, l'Agence nationale des fréquences (ANFR) propose d'appliquer un « facteur de réduction », menant ainsi à la notion « d'indicateur d'exposition » qui sera présenté brièvement en page 39. La question sous-jacente est cependant de déterminer les probabilités d'observer, en conditions réelles, la situation de type « pire cas », utilisée pour la vérification de la conformité intrinsèque.

Compte tenu des fluctuations temporelles du signal, les mesures d'exposition dues à une station de base en situation opérationnelle, donc connectée au réseau de communication, soulèvent une difficulté importante pour déduire des mesures faites à un instant donné la valeur maximum du champ ou de la puissance qui pourrait être atteinte. Ces points sont repris en page 40, des approches statistiques étant également possibles (page 40). Dans ce qui précède, seule l'exposition à une seule source est envisagée. Le cas d'expositions multiples est brièvement évoqué en pages 40-41.

La dernière section est consacrée aux points critiques liés aux lignes directrices de l'Icnirp appliquées à un système global de communication, ainsi qu'à quelques pistes d'évolution.

■ Conformité intrinsèque d'une station de base ou d'un terminal mobile

• Conformité du terminal mobile

On s'intéresse dans ce cas essentiellement à la pénétration des ondes localement, dans la partie du corps située au voisinage du terminal mobile. De nombreux travaux ont été menés pour définir des procédures de mesure ou de calcul, soit du champ incident, soit de la densité de puissance ou d'énergie absorbée, soit du DAS, lorsque le mobile émet de façon continue à pleine puissance. L'influence de la position et de l'orientation relative de ce dispositif par rapport au corps et celle de la main ont déjà été clairement mises en évidence.

Cependant, le document publié par l'Icnirp en 2020 fait apparaître la notion d'impulsion brève avec des niveaux d'absorption spécifique (AS) à ne pas dépasser. Pour mettre en évidence si cette valeur d'AS pourrait avoir un impact sur les mesures de conformité d'un terminal mobile, on envisagera d'abord le cas d'une impulsion isolée quelconque, puis un exemple d'application pour une liaison 5G à 3,5 GHz.

• Cas d'une impulsion isolée sur une période d'observation de 6 minutes

Envisageons tout d'abord le cas d'une impulsion isolée (donc en absence d'autres impulsions dans un intervalle de temps de 6 minutes) et de durée 1 s, la fréquence porteuse étant comprise entre 400 MHz et 6 GHz. L'application des formules données par l'Icnirp (population générale) mène à une valeur maximum pour l'AS de 110 J/kg relative à l'exposition des membres, ce qui correspond donc à un DAS de 110 W/kg. Si on moyenne ce DAS sur 360 s, la valeur trouvée sera très inférieure à la limite du DAS membre moyen (sur 6 minutes) qui est de 4 W/kg. Pour des valeurs supérieures d'AS pendant 1 s, on pourrait ainsi conserver un DAS moyen qui respecte les restrictions de base bien que l'AS dépasse ses propres restrictions. Ceci est en relation directe avec l'objectif mentionné dans les lignes directrices de l'Icnirp, qui est d'éviter des niveaux d'exposition trop importants pour des impulsions courtes.

À noter que si on considère une impulsion isolée d'une durée de 6 min, l'AS calculé correspond évidemment à une valeur de DAS de 4 W/kg.

• Application à une liaison 5G à 3,5 GHz

Pour simplifier la présentation, envisageons, comme pour la 5G en France, un lien entre station de base et terminal avec le protocole TDMA (*Time Division Multiple Access*) dans lequel les trames de données échangées se succèdent, leurs durées (« slots ») étant respectivement notées T_m (liaison montante du terminal vers la station de base) et T_d (liaison descendante de la station de base vers le terminal). Les caractéristiques des protocoles de communication peuvent être adaptées par les opérateurs en fonction notamment du nombre de terminaux et

des quantités de données à échanger. À titre d'illustration, supposons que les durées choisies soient $T_m = 0,5$ ms et $T_d = 2,5$ ms et que les trames associées aux liaisons montantes et descendantes se suivent sans interruption.

Comme on s'intéresse à l'émission du mobile, la valeur d'absorption spécifique AS (membre) à ne pas dépasser dans ce cas devient, pour ces durées si courtes (très inférieures à 1 s), indépendante de la durée de l'impulsion et égale à 36 J/kg.

- Si le terminal n'envoie des données que sur un seul *slot* (durée 0,5 ms) pendant 6 minutes, le DAS maximum admissible « instantané » de cette impulsion est $36/T_m$ (W/kg), ce qui correspond à une puissance durant l'émission de 72 kW/kg, mais son DAS moyenné sur 6 minutes est égal à $\frac{36}{T_m} * \frac{T_m}{360} = 0,1$ W/kg. Ce DAS moyenné est indépendant de T_m et sa valeur est bien inférieure à la valeur limite du DAS membre moyen de 4 W/kg. Dans ce cas, ce sera la valeur de l'AS de l'impulsion qui sera critique et non le DAS moyen.
- En général, le terminal n'émettra pas dans un seul *slot* mais sur un nombre variable N de *slots* dépendant, entre autres, de la quantité d'informations à transmettre. On obtiendra ainsi N impulsions sur une durée de 6 minutes. À titre d'exemple, si $N = 40$, la durée totale d'émission sera de $N * T_m$, soit $40 \times 0,5 = 20$ ms. Les impulsions successives émises sont séparées d'un temps T_d de 2,5 ms.

D'après les lignes directrices publiées en 2020, pour déterminer la valeur limite d'AS, il faudrait considérer (cf. Tableau 3 des lignes directrices de l'Icnirp) la durée totale d'émission, soit 20 ms. Dans ce cas, l'AS sera de 46,4 J/kg, ce qui mène à un DAS moyen de 0,13 W/kg. Comme dans le cas d'une impulsion isolée, c'est la valeur de l'AS des impulsions qui sera critique et non le DAS moyen.

Supposons maintenant le cas « pire » (pratiquement irréaliste en situation opérationnelle) pour lequel le terminal voudrait émettre le maximum de données pendant une période de 6 minutes. La durée d'émission durant ces 360 s sera de $360 * \frac{T_m}{T_m + T_d} = 60$ s. L'application des lignes directrices publiées en 2020 mène à une AS maximum de 610 J/kg et à un DAS moyenné sur 6 minutes de 1,7 W/kg, donc inférieur à la valeur maximum de 4 W/kg.

Sur cet exemple, on pourrait conclure que c'est la valeur d'AS qui est plus critique que celle du DAS moyenné sur 6 minutes. Il faut cependant mentionner que ce résultat dépend de la pondération du nombre de *slots* affectés aux liens montants et descendants et d'autres paramètres, non mentionnés ici, gérés par la station de base.

Une approche statistique des durées d'échanges entre station de base et terminal, issue de résultats de mesure sur des réseaux 5G opérationnels, serait donc intéressante.

Les calculs précédents ont été menés en assimilant un groupe d'impulsions à une impulsion unique de durée égale à la somme des durées des impulsions individuelles. Supposons 2 impulsions, ayant chacune une durée 0,5 ms et une très forte puissance, chacune d'elle, prise individuellement, satisfaisant la valeur maximum d'AS. Il est surprenant que l'intervalle de temps séparant ces impulsions n'intervienne pas dans les formules. En effet, on peut se demander si 2 impulsions séparées soit de quelques ms, soit de plusieurs minutes mènent à des conclusions identiques quant à l'équilibre thermodynamique qui a dû être utilisé pour élaborer les valeurs maximales d'AS.

En conclusion, des travaux complémentaires devraient être menés pour mieux préciser l'importance des valeurs maximum d'AS pour la conformité des terminaux mobiles.

Pour les futures émissions 5G en ondes millimétriques, une approche similaire devra être faite, prenant en compte les diverses technologies de communication qui seront mises en œuvre.

Une démarche voisine pourrait également être suivie pour la conformité de la station de base traitée dans le paragraphe suivant.

■ Conformité intrinsèque d'une station de base

- Principe général de la démarche suivie

L'évaluation du rayonnement d'une station de base afin de valider sa conformité vis-à-vis des valeurs limites d'exposition préconisées par l'Icnirp peut se faire théoriquement et éventuellement expérimentalement en se plaçant dans le cas simple d'une propagation en espace libre, en absence de tout obstacle entre station de base et terminal.

Les paramètres qui interviennent dans le bilan de la liaison radioélectrique sont la puissance en sortie de l'émetteur – ou plus précisément en entrée d'antennes –, les caractéristiques de l'antenne ou du réseau d'antennes et notamment son gain, ainsi que la distance entre l'émetteur et le récepteur. L'antenne de la station de base est en général formée d'un réseau d'éléments rayonnants dont le nombre s'est accru au fur et à mesure du développement de la 3G, puis de la 4G, et enfin de la 5G. Pour la 4G et la 5G, un réseau d'éléments rayonnants est utilisé tant au niveau du terminal que de la station de base, ce qui mène à la technologie dite MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Un réseau MIMO dit « massif » utilisé dans la station de base est constitué de nombreux éléments, typiquement 64, voire plus. Pour évaluer la conformité du produit, on se place dans le cas « pire » pour l'exposition qui est celui où toutes les antennes du réseau sont alimentées de manière à obtenir un faisceau très étroit de rayonnement, donc à gain maximum, dirigé évidemment vers le terminal.

Le champ rayonné en espace libre par une structure antennaire se calcule à partir de ses caractéristiques, à condition de se trouver dans la zone de champ lointain de l'antenne, c'est-à-dire à des distances très supérieures à la longueur d'onde et aux dimensions du réseau. Ces conditions sont pratiquement toujours vérifiées pour les émissions dans la bande 5G à 3,5 GHz, tout au moins en ce qui concerne l'exposition du grand public.

Comme pour le terminal mobile, les aspects temporels du signal ne sont pas pris en compte, la station de base émettant pour l'évaluation de la conformité de façon continue à son niveau maximum. Notons cependant que le lien duplex entre la station de base et le terminal peut être réalisé au moyen d'un partage dans le temps entre la liaison montante et le lien descendant, connu sous le nom de TDD (*Time Division Duplexing*). Comme en pratique la station de base n'émet que 75 à 80 % du temps, un facteur de réduction de 0,75 à 0,80 sur le champ calculé est applicable.

Cette démarche permet de définir la puissance maximum et le périmètre de sécurité autour de l'antenne pour respecter les valeurs limites d'exposition, ces 2 valeurs étant évidemment liées.

- Approche fondée sur des mesures sur site au voisinage d'une station de base non connectée au réseau de télécommunications

Si on souhaite se rapprocher davantage de conditions réelles, on peut effectuer des mesures de rayonnement sur une station de base opérationnelle, en choisissant la configuration la plus

pénalisante menant donc au champ rayonné le plus important possible. Cette démarche a notamment été mise en œuvre par l'ANFR dans le cadre d'expérimentations précédant l'implantation de la 5G. Elle consiste à forcer une station de base, non encore connectée au réseau de communication, à émettre à puissance maximum vers un terminal situé en visibilité directe proche de l'antenne d'émission (mais au-delà de la zone d'exclusion pour le public) et en transmettant un flux continu de données. Le champ rayonné mesuré au voisinage immédiat de ce terminal doit vérifier les limites recommandées par l'Icnirp. La durée du moyennage a peu d'importance car les caractéristiques d'émission sont stationnaires dans le temps.

Il est important de souligner que cette mesure dans la situation de « pire cas » aboutit à une surestimation des niveaux d'exposition auxquels on peut s'attendre en situation opérationnelle. Un « facteur de réduction » a donc été proposé par l'ANFR en vue de définir un indicateur d'exposition.

■ **Indicateur d'exposition à une station de base proposé par l'ANFR**

Cet indicateur se fonde sur une simulation numérique ou sur la mesure de « conformité intrinsèque » définie précédemment, si possible sur site. Dans ce cas, la station de base n'est pas connectée au réseau et assure un lien continu vers un utilisateur unique (situation de « pire cas »). L'ANFR propose que le champ mesuré (ou calculé) soit pondéré par un facteur prenant en compte : i) une estimation de la taille moyenne des paquets de données envoyés par une station de base à chaque terminal situé dans sa zone d'action ; ii) le nombre moyen de terminaux ; iii) le débit des transmissions et donc la durée des échanges entre station de base et terminal. Dans les exemples donnés par l'ANFR, ce facteur de réduction est de l'ordre de 13 dB. L'exposition ainsi estimée sera donc beaucoup plus faible que celle en situation de « pire cas ». Il faut cependant noter que les valeurs des divers paramètres intervenant dans le calcul de ce facteur ne sont que des estimations qui peuvent évoluer avec le développement de nouveaux usages de la 5G.

Une façon plus réaliste de quantifier l'exposition à une station de base est d'effectuer des mesures lorsque celle-ci est opérationnelle au sein d'un réseau de télécommunication. Le paragraphe suivant décrit les difficultés rencontrées pour déduire de ces mesures une estimation du niveau maximum d'exposition pour la comparer aux valeurs limites de l'Icnirp.

■ **Extrapolation de mesures sur sites opérationnels afin de prédire le niveau maximum d'exposition due à une station de base**

● **Difficultés rencontrées**

Le champ rayonné par une station de base 5G dépend de nombreux paramètres dont quelques exemples, non exhaustifs, sont donnés ci-dessous.

- La largeur des faisceaux émis et leurs directions sont ajustés en permanence par la station de base en fonction de la densité des terminaux, de leur position relative par rapport à la station de base, comme par exemple la visibilité directe ou non entre station de base et terminaux.
- La distribution géographique des terminaux dans une certaine zone. Elle peut être purement aléatoire ou, au contraire, une forte densité d'utilisateurs est probable si, dans une zone donnée, un évènement par exemple a lieu.
- La puissance de l'onde émise à destination de chaque terminal est optimisée par la station de base pour obtenir le meilleur compromis entre la maximisation de la

puissance reçue et la minimisation des interférences avec les liaisons vers d'autres terminaux.

- L'importance du trafic de données.

La principale difficulté est donc de déduire le niveau maximum d'exposition qui pourrait être atteint en un point donné, à partir des mesures faites à un instant quelconque.

■ Principe d'évaluation du niveau maximum d'exposition

La méthode de mesure de l'intensité des champs, de la densité de puissance et du DAS à proximité d'une station de base de radiocommunications dans le but d'évaluer l'exposition humaine résultante, a fait l'objet de nombreux travaux et est décrite en détail dans la norme NF EN 62232 publiée en 2017. La dernière génération des systèmes de communication qui y sont traités est la LTE (*Long Term Evolution*) qui inclut la 4G et ses dernières évolutions basées sur la mise en œuvre de réseaux MIMO. Bien que la 5G n'y figure pas, nombre de principes de mesure décrits dans ce document peuvent être appliqués à la 5G. La publication d'une nouvelle édition de cette norme était prévue pour mi-2022.

L'idée de base est d'utiliser des signaux, dits de référence, émis périodiquement par la station de base à une puissance toujours constante. Il faut ensuite procéder à une extrapolation des résultats de mesure de ces signaux à partir des caractéristiques temporelles et fréquentielles de la structure fine des trames émises. Les différentes techniques actuellement proposées devront être validées par de nombreuses mesures sur des réseaux opérationnels. Cette approche prend en compte la réalité du trafic, contrairement aux mesures de « conformité intrinsèque » décrites en page 38 pour lesquelles toutes les capacités de la station de base sont utilisées pour maximiser le champ vers un seul utilisateur.

Le niveau maximum estimé pourra être comparé aux valeurs limites données par l'Icnirp. Il faut cependant souligner que la durée d'exposition associée à la valeur maximum du champ et la répartition temporelle d'expositions successives sont difficilement appréciables. De plus, l'Icnirp considère séparément une exposition permanente ou brève.

■ Approche statistique du niveau d'exposition dû à une station de base

Comme nous l'avons déjà signalé, l'utilisation de réseaux d'antennes 5G, notamment ceux comportant un très grand nombre d'éléments rayonnants (réseau massif), est associée à une gestion « agile » des faisceaux, donc à une variation de leurs orientations en fonction de la position des utilisateurs, de leur nombre dans la zone couverte par la station de base et de la quantité d'informations à transmettre. Il en résulte une fluctuation temporelle et spatiale très rapide du champ, une approche statistique trouvant ainsi son intérêt. Dans ce cas, seule la valeur moyenne du champ dans la bande de fréquences émises par cette station de base est mesurée en de nombreux points dans une zone étendue autour d'elle. À partir de cet ensemble de résultats, on en déduit la valeur médiane du champ et celle du 95^e voire du 97^e ou du 99^e percentile qui peuvent également constituer des « indicateurs d'exposition ».

Mentionnons que d'autres indicateurs ont été également proposés pour évaluer l'exposition des personnes en pondérant les champs par des facteurs faisant intervenir les tranches d'âge des utilisateurs, les usages de leurs téléphones mobiles, les flux de téléchargements, etc.

■ Exposition à des sources multiples identifiées

L'approche est fondée sur une estimation du niveau d'exposition dû à un certain nombre de sources parfaitement identifiées à l'aide d'une analyse fréquentielle en bande étroite. L'Icnirp n'ayant retenu comme source de risque sanitaire que des effets thermiques cumulatifs, les remarques faites précédemment restent valables.

■ Conclusion sur les évolutions possibles des valeurs limites d'exposition

- Remarque préliminaire sur l'application des recommandations publiées par l'Icnirp en 2020

Les durées de moyennage de 6 min ou 30 min peuvent bien entendu prêter à discussion dès lors que les champs sont éminemment variables dans le temps. Dans ce cas, c'est la relation entre durée d'exposition et effets sanitaires qui est en cause, mais cet aspect ne fait pas l'objet de ce paragraphe fondé uniquement sur le document Icnirp 2020 ; il sera traité dans le paragraphe suivant.

Les points délicats qui peuvent être soulevés concernent la distinction entre exposition en continu et exposition brève. Si la durée d'exposition est inférieure à 6 min, la variable temps, exprimée en secondes, est introduite dans le calcul des valeurs limites. Pour simplifier la présentation, envisageons une illumination due à une ou plusieurs stations de base 5G. Si la liaison duplex se fait en TDD, tous les liens entre les différents terminaux et stations de base sont synchrones pour éviter les interférences. En conséquence, tout le corps de l'utilisateur sera illuminé par la station de base lors du lien descendant d'une durée T_d , le dispositif mobile illuminant ensuite essentiellement une partie du corps lors du lien montant de durée T_m .

Il faut noter que, pour la 5G, les durées T_d et T_m peuvent être choisies par la station de base en fonction des quantités d'informations à transmettre dans les liens montants et descendants. En général, T_d et T_m sont de l'ordre de la ms ou d'une dizaine de ms, leur durée minimum correspondant à celle d'un *slot* étant comprise entre 125 μ s et 1 ms.

Comme il a été mentionné dans le paragraphe traitant de la conformité des dispositifs mobiles, la prise en compte des aspects temporels du champ avec les définitions actuelles des illuminations « brèves » ou « continues » devrait être revue à l'aune des caractéristiques des communications associées aux générations de technologies, telles que la 5G et au-delà.

- Problèmes éventuels liés à la mise en application des valeurs limites d'exposition

Pour élaborer des recommandations de limitation de l'exposition aux champs électromagnétiques, la principale difficulté est de faire le lien entre les caractéristiques temporelles et fréquentielles de l'exposition et des effets sanitaires possibles associés. Les valeurs limites actuelles, déduites des effets observés sur le monde du vivant, se fondent essentiellement sur des illuminations par une onde sinusoïdale à une fréquence donnée.

Si on envisage d'abord la configuration la plus simple qui est celle d'une seule source d'émission, 5G par exemple, les variations temporelles extrêmement rapides de la puissance reçue ne sont pas prises en compte ; seule l'énergie absorbée sert de référence, les effets thermiques étant les seuls considérés.

En zone urbaine dense, on va se trouver en présence d'un nombre croissant de sources d'émission radiofréquences émettant des faisceaux étroits dont les lobes de rayonnement peuvent se recouvrir pendant un bref instant. Cet aspect est d'autant plus critique que, bien

souvent, les stations de base de divers opérateurs se situent sur le même site et couvrent la même zone. La notion de dose de rayonnement, qui resterait à définir de façon précise, pourrait ainsi être introduite lors des études faites sur les effets sanitaires des ondes.

De façon générale, on pourrait imaginer définir des scénarios types d'exposition dans le domaine temps, fréquence et puissance, générés à partir des caractéristiques connues des systèmes de communications actuels ou futurs. Ceux-ci pourraient ensuite être simulés lors d'expérience d'illumination de cellules, d'organoïdes ou d'êtres vivants en laboratoire afin d'essayer de mettre en évidence les paramètres les plus critiques.

En conclusion, les valeurs limites actuelles fixées par l'Inirp sont fondées sur deux hypothèses d'ailleurs reliées entre elles : l'une sanitaire qui estime que seuls les effets thermiques jouent un rôle important et l'autre physique, en considérant que les fluctuations du signal sont suffisamment lentes pour qu'une notion d'intégration dans le temps puisse s'appliquer. Nous avons d'ailleurs souligné qu'en envisageant simplement les réseaux associés à la technologie 5G, la détermination d'une valeur d'exposition pour une probabilité d'apparition donnée, à comparer aux valeurs limites Inirp, pose question. En effet, la « couche physique » (réseaux ou subdivision en sous-réseaux, faisceaux multiples, puissance, etc.) est gérée par les algorithmes de traitement du signal pour assurer à tout instant le meilleur compromis entre débit maximum, grande fiabilité et robustesse, et minimisation des temps de latence. Ceci mène, comme mentionné précédemment, à des variations spatiales et temporelles des caractéristiques de l'exposition. Pour évaluer ces dernières, on peut se fonder soit sur des mesures faites en condition d'exploitation pour estimer des valeurs maximums ou pour un percentile donné (95 ou 97 %), soit sur la valeur maximum que peut délivrer la source mais dans des situations non opérationnelles.

En tout état de cause, un suivi de l'évolution de l'exposition au fur et à mesure du développement de nouvelles technologies sera aussi une aide pour l'élaboration de normes techniques pour le contrôle de l'exposition.

Une autre situation d'intérêt concerne l'exposition à la bande dite « FR2 » de la 5G, centrée autour de 26 GHz. Les applications envisagées sont extrêmement diverses, allant de la réalité augmentée, des *hot spots* haut débit permettant des téléchargements ultra rapides de vidéos, à la télécommande de robots dans l'industrie, pour ne citer que quelques exemples. Une attention particulière devra être portée sur la méthodologie de caractérisation de l'exposition, compte tenu des portées souvent courtes des liaisons, de la position et de la distribution des antennes dans un environnement donné.

Notons également que pour les liaisons dédiées à l'intérieur des bâtiments (liaisons *indoor*), le champ rayonné par l'antenne fixe placée dans un environnement confiné pourra présenter de grandes inhomogénéités spatiales et temporelles. Dans ce cas, on peut donc se poser la question de la pertinence de la définition de l'exposition moyenne « corps entier » ou « membres et tête », donc des valeurs limites associées.

Mentionnons enfin que les questions relatives aux effets sanitaires éventuels sur l'humain dus à l'exposition au champ électromagnétique ambiant font l'objet d'une action de recherche et innovation portée par la Commission européenne. Elle a débuté à la fin du premier trimestre 2022. Les thématiques de recherche incluent :

- la modification de l'exposition due aux nouvelles technologies des systèmes de télécommunication, du public et des groupes à risque tels que les enfants et travailleurs ;

- l'étude des effets biologiques combinant des approches *in vitro* et *in vivo* et tenant compte d'une combinaison d'expositions ;
- les liens de causalité entre durée et niveau d'exposition sur les effets sanitaires ;
- l'élaboration de nouveaux critères d'exposition.

ANNEXE 6 : COMMENTAIRES DE L'ANSES EN REPONSE A LA CONSULTATION PUBLIQUE SUR L'AVIS DU SCHEER DU 22 AOUT 2022

Avis provisoire du Comité scientifique des risques sanitaires, environnementaux et émergents : *Opinion on the need of a revision of the annexes in the Council Recommendation 1999/519/EC and Directive 2013/35/EU, in view of the latest scientific evidence available with regard to radiofrequency (100kHz - 300GHz).*

Page de la consultation publique

https://health.ec.europa.eu/consultations/scheer-public-consultation-preliminary-opinion-scientific-evidence-radiofrequency_en

Pour répondre à la consultation :

<https://ec.europa.eu/eusurvey/runner/emf2022>

Commentaires adressés au Scheer lors de la consultation publique (ouverte du 25 août au 25 septembre 2022), par sections de l'avis

Abstract

Anses

The Scheer supports the idea of a technical revision of the 2013 EU directive. The reason given for this is that recently dosimetric quantities and new limits, as those recommended by Icnirp 2020, must be taken into account. Unfortunately, the document does not clearly justify this choice, the new dosimetric quantities being not introduced, nor the links between new exposure limits and health effects. A critical review of the new dosimetric quantities suggested by Icnirp could be added to the document.

Acknowledgments

1 Mandate from the EU commission services

1.1 Background

1.2 Terms of reference

1.3 Deadline

2 Opinion

Anses

Same remark as that in the abstract.

Line 23: It does not seem that Scheer has tried to carefully analyze the ICNIRP2020 document to propose improvements or amendments, taking the experience of the Scheer members into account. Only a review of the possible health effects of RF exposure described in the ICNIRP and other documents is given, leading of course to an endorsement of the ICNIRP guidelines.

The 2020 ICNIRP guidelines indicate that two new restrictions are likely to further enhance health protection. The first concerns the development of technologies that use EMF frequencies above 6 GHz, such as 5G, with new restrictions to better protect people from excessive body temperature rise. The second concerns brief exposures to RF EMF (< 6 minutes) to ensure that the transient rise in temperature is not sufficient to cause pain or adverse effects in biological tissues. Other changes were made to improve the accuracy of the restrictions or resulted in more conservative restrictions. However, as the differences are small compared to the original restrictions themselves, stating that “the latest (2020) ICNIRP exposure guidelines introduce new dosimetric quantities and limits to them, that can protect humans more effectively from emerging technological applications of RF EMF” (lines 21 to 23), without clearly distinguishing which changes are affected, appears to be not sufficiently precise.

Directive 2013/35/EU was established for the protection of workers between 100 kHz and 300 GHz. A large number of applications expose professionals (induction, dielectric loss heating, microwaves, etc.). This opinion focuses on the need to develop the restrictions in line with developments in communication technologies. However, the modifications proposed by the ICNIRP for certain quantities concern the entire electromagnetic spectrum, and not only the frequencies dedicated to telecommunications, such as the suppression of the limit for contact currents or certain sensory effects such as auditory effects. All the changes proposed by the ICNIRP should be examined by the Scheer, in order to assess whether the new guidelines contribute to the improvement of health protection. The different exposure situations, not only for 5G communication technologies, but also for all other applications of EM fields, should be taken into account.

3 Minority opinions

4 Methodology

4.1 Data/Evidence

4.2 Background

4.2.1 Scenihhr (2015) Opinion – Summary on biological and health effects

4.2.2 Icnirp (2020) Guidelines – Summary on biological and health effects

Anses

In this summary of the biological and health effects considered by the ICNIRP in its guidelines published in 2020, it would be interesting to consider the thermal effects, as the main changes in quantities (for example increase from 6 to 30mn for SAR, change in frequency range) are linked to this effect. Indeed, it is essentially on these elements that the ICNIRP justifies the changes proposed in 2020.

Chapter 4.2.2.3 Auditory, Vestibular, and Ocular function

The auditory (sensory) effect was already mentioned in the guidelines published in 1998, with the same conclusions, and restrictions were proposed to guard against it. This is no longer the case, and the argument given to explain this change in position is that there is no evidence of a health effect under realistic exposure conditions. But restrictions should apply regardless of foreseeable exposure conditions, which may change. Furthermore, could repeated or prolonged exposure to the auditory effects of microwaves not cause stress and/or be a risk factor for accidents in the case of occupational exposures? Chapter 4.2.2.9 Cancer (lines 32-38)

The wording of this paragraph seems to reduce the relevance of case-control studies in favour of cohort studies. But in the case of rare tumours, cohort studies are not necessarily the most appropriate.

4.2.3 WHO Survey on Priority Outcomes

4.2.4 Differences in methodology from Scenihhr (2015)

5 Assessment

5.1 Exposure to RF EMF

5.1.1 Wireless communication technologies

Anses:

Page 13, Line 16: At the end of the Scheer document, in the list of references, the date of the Sagar et al. paper is 2018 and not 2017.

The first paragraph of 5.1.1.1 is a "copy and paste" of the Sagar paper without giving the definition of a "microenvironment" and the meaning of a "mean RF exposure". Is it a time average measurement, or a space-time averaging? In what frequency band? Conclusion on exposure due to uplink is presented but where the exposure level has been measured? Without any additional information, these results cannot be exploited.

Qualitative results of typical exposure are presented in the first two paragraphs of 5.1.1.1, but no analysis or physical interpretation is given. As an example, for exposure in public transport, it is written in the second paragraph that "highest level.. in public transport station .. with downlink as the most relevant contributor". However, in the previous paragraph, the uplink was the main contributor in the train. A very brief interpretation of these results based on characteristics of the wave propagation in these two environments is missing.

Page 14, line 5: It is surprising to describe results of a paper published in 2021 but related to a mobile phone of an old generation (2G network)

Page 14, line 17 and beyond: A rather long presentation dealing with the dose produced by mobile phone devices and published in various papers is given. This dose is expressed in mJ/kg/day. However, the possible correlation between dose and health effect is not treated. It is thus questionable whether this concept of dose is important and must be included in the guidelines for limiting the exposure.

Table 1 gives informative results on the use of telecommunication devices. However, there is no indication on how data presented in this Table could be used to evaluate health risk.

Page 16, lines 37-38

This recommendation could be extended to unrealistically low exposures. Deleting data should be considered with caution, as epidemiology takes into account biases in the analysis.

5.1.2 Exposure from emerging technologies

Anses

Page 17, line 8: It is mentioned that FR2 5G signals do not travel large distances. This statement is very vague. Indeed, in free space, the longitudinal attenuation does not depend on frequency. However penetration in structures and diffraction phenomena strongly decrease with frequency, leading to a smaller coverage area from a base station, as explained in a next paragraph. Reformulation of this sentence would be helpful

Lines 27-28: The paper from Ericsson cited in this paragraph, deals with the compliance distance for a transmission in the 28 GHz band. This paper is thus not related to the 200 W transmitting power of a 5G BS as mentioned in line 28.

Lines 28-35: The problem related to measurement or calculation of the exposure based on conservative assumptions has been raised in many papers, as those cited in the report. Nevertheless comments on these papers being incomplete and sometimes inaccurate, the following text is proposed from line 30:

These classical methods rely on conservative assumptions, e.g., all the users are in the same location that coincides with the testing point. These assumptions over-estimate the exposure from 5G BSs, leading to a lower maximum allowable power. To overcome this problem, a first approach (ANFR, 2020) introduces an exposure indicator based on the foreseeable use of 5G working in the FR1 frequency band, around 3.5 GHz, and assuming that one gigabyte of data is sent in a given direction every 6 minutes. These values result from an extrapolation of current 4G traffic. Furthermore assumptions as number of users, their spatial distribution in the network, number of beams of the fixed antenna array and statistical variations for fixed beam antennas, are introduced to evaluate a reduction factor. It is defined as the difference between the maximum level of exposure assuming that the power of the base station is sent in a single beam towards a user or a group of users close to each other, and the foreseen values with the previous mentioned assumptions. This reduction factor estimated by ANFR is 13.5 dB. It must

be outlined that this value will have to be modified over the years to take into account the change of the user behavior in terms of connection time and size of the downlink data packets.

The methodology of another approach (Baracca *et al.*, 2018) consists in performing system simulations that take into account realistic deployment scenarios in terms of installation height of the BS, users distribution and traffic, to evaluate the cumulative distribution function of the BS actual transmit power. By using channel models, the compliance boundary around the BS is calculated for a given percentile of the transmit power as the 95th or 99th percentile.

A stochastic geometry approach has been applied by Bonato *et al.* (2021), while Chiaraviglio *et al.* (2022) target the planning of a 5G cellular network, taking electromagnetic fields constraints into account.

For 5G massive MIMO working in the millimeter wave band, the distribution of exposure for different implementation scenarios is given by Al Hajj *et al.* (2020).

In conclusion, the important question arises as to whether the exposure values are those calculated or measured in the worst case (conservative approach), even if this configuration is highly unlikely, or whether a probabilistic approach must be used. In this last case, a related question deals with the choice of the percentile of the cumulative distribution function, 95th or 99th for example. This point has to be discussed.

5.1.3 Factors affecting exposure to RF EMF

Anses

To assess the realistic exposure of a population, the concept of an exposure index has been introduced and explained in a few papers. The basic principle recalled in the document is interesting but it depends on more than 10 parameters. A brief presentation of typical examples showing the interest of this approach is missing.

5.2 Interaction mechanisms

5.2.1 Thermal effects

5.2.2 Cellular interaction mechanisms

5.2.3 Conclusions on interaction mechanisms

The conclusion could be moderated, as this chapter is based on "narrative" reviews, for which, unlike systematic reviews, the exhaustiveness of publications is not aimed at. In addition, the conclusion asks about health effects, whereas the paragraph only refers to interaction mechanisms.

5.3 Health effects

5.3.1 Neoplastic diseases

Anses

Page 28, Line 41

In the previous sections, the terminology « CDMA-modulated signal » is used while here « UMTS signal » is mentioned. The same notation should be used.

5.3.2 Neurological and neurobehavioural effects

Chapter 5.3.2.1 Epidemiological studies

Line 14 - 17 The animal studies reported here are really epidemiological studies (subject of the paragraph).

Chapter 5.3.2.2 Neurophysiological and neuropsychological human studies

Editorial : p. 33 lines 18-19 : the title « animal studies » should be moved at the line under.

5.3.3 Symptoms

5.3.4 Other health effects

Chapter 5.3.4.1: Cardiovascular diseases

The opinion of “strong evidence for the lack of effects” could be better justified, as only one meta-analysis and a report are cited as references.

6 Recommendations for future work

Anses

The following recommendations could be added:

- Take better account of the very fast variability of the exposure characteristics in the vicinity of 5G base stations, in terms of field level and duration less than one second.
- Investigate the need of introducing: i) the notion of exposure level in operational conditions for a given percentage of occurrence and ii) the notion of RF EMF daily dose (duration-amplitude) and how this concept of dose may be introduced for studying health effects.
- Investigate the applicability of the Icnirp guidelines for mmWaves communication systems, taking into account the important space and time fluctuations of the electromagnetic field mainly occurring for indoor communications.
- Define typical scenarios of exposure in order to introduce their time – frequency characteristics in in-vitro and in-vivo configurations when studying health effect of EM waves.

If the guidelines published by Icnirp in 2020 are fully integrated into the European regulatory texts, certain hazards or effects taken into account in the guidelines published in 1998 (e.g. contact currents) will no longer be considered. and, if necessary, exposures to other factors influencing temperature, particularly for occupational exposures

7 References

8 Glossary of terms, units

9 List of abbreviations and acronyms