

Notes techniques

DÉTERMINATION DES VALEURS LIMITES DE L'EXPOSITION AUX CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES. LES GRANDS PRINCIPES

La Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) a publié en 2020 ses nouvelles lignes directrices pour la limitation de l'exposition aux champs électromagnétiques de 100 kHz à 300 GHz. Cet article explique le principe de la détermination des valeurs de référence, tel que détaillé dans cette mise à jour.

LOUIS
LAURENT
INRS,
direction
des Études
et recherche

ROMAIN
MOUILLSEAUX
INRS,
département
Expertise
et conseil
technique

Normes européennes et réglementation française

Les travailleurs sont exposés à des champs électromagnétiques, comme ceux émis par des dispositifs de télécommunication ou des machines parcourues par de forts courants électriques. La directive n° 2013/35/UE¹ fixe des prescriptions minimales de sécurité et de santé pour les travailleurs exposés à de tels champs. Le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016² relatif à la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition aux champs électromagnétiques transpose cette directive en droit français. Les dispositions de ce décret, codifié dans le Code du travail, sont entrées en vigueur le 1^{er} janvier 2017. Ces dispositions réglementaires visent à prévenir l'apparition d'effets sur la santé. Elles prennent en compte les effets avérés, à court terme, qui apparaissent au-dessus d'un seuil dont le niveau est variable selon la fréquence. La prévention des risques professionnels repose sur une démarche d'évaluation qui conduit à mettre en œuvre des moyens de prévention lorsque l'exposition des travailleurs est susceptible d'atteindre les valeurs limites d'exposition réglementaires.

Il existe également des dispositions pour protéger la santé du public. Elles concernent aussi le monde du travail, dans la mesure où elles s'appliquent aux travailleuses enceintes. Afin de limiter l'exposition du public aux champs électromagnétiques, le Conseil de l'Union européenne a publié en juillet 1999 la recommandation n° 1999/519/CE³. La France a adopté, à travers le décret n° 2002-775 du 3 mai 2002⁴,

un cadre réglementaire qui repose sur ces recommandations. Les dispositions de ce décret se limitent aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques. Toutefois, il introduit dans le droit français l'ensemble des valeurs limites d'exposition du public définies dans la recommandation n° 1999/519/CE.

Les limites réglementaires sont établies en s'appuyant sur des publications internationales et en partie sur les lignes directrices éditées par l'ICNIRP en 1998. Ces dernières sont mises à jour en fonction des évolutions techniques et de l'avancée des connaissances scientifiques. Ainsi, en 2020, l'ICNIRP a publié de nouvelles lignes directrices concernant la limitation de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences de 100 kHz à 300 GHz [1]. Ce travail s'appuie sur :

- des considérations sur les effets des champs électromagnétiques sur la santé. Ces considérations mènent à des seuils à ne pas dépasser à l'intérieur du corps (comme la densité de puissance absorbée), les restrictions de base ;
- des calculs pour faire le lien entre les restrictions de base et les caractéristiques des champs auxquels le corps est exposé. Ces considérations mènent à des seuils de densité de puissance ou de champs électriques et magnétiques à ne pas dépasser à proximité de la personne exposée, les niveaux de référence.

Il existe deux jeux de valeurs : l'un pour l'exposition professionnelle et l'autre pour la population

RÉSUMÉ

La Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) est une organisation non gouvernementale créée en 1992, afin de poursuivre les travaux du Comité international des rayonnements non ionisants (INIRC) de l'Association internationale de radioprotection (IRPA).

Depuis lors, elle élabore et diffuse des recommandations scientifiques pour l'établissement de valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques pour le grand public et les travailleurs. Les conclusions de ses travaux sont reprises dans les réglementations des pays européens, telles qu'elles ou avec des marges de

précaution supplémentaires. L'ICNIRP a publié en 2020 ses nouvelles lignes directrices pour la limitation de l'exposition aux champs électromagnétiques de 100 kHz à 300 GHz. Le but de cette note technique est d'expliquer le principe de la détermination des valeurs de référence, tel que détaillé dans cette mise à jour.

Determination of exposure limit values for electromagnetic fields. The main principles

The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) is a non-governmental organisation founded in 1992 to pursue the work of the International Non-Ionizing Radiation Committee (INIRC) of the International Radiation Protection Association (IRPA). Since

then, it has drafted and disseminated scientific recommendations for the establishment of exposure limit values for electromagnetic fields for the general public and for workers. The conclusions of its work are adopted in European countries' regulations as such or with additional

precautionary measures. In 2020, ICNIRP published its new guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields in the 100 kHz to 300 GHz range. The goal of this technical note is to explain the principle for determining reference values, as described in this update.

générale (et les travailleuses enceintes). À noter que dans le Code du travail, les restrictions de base correspondent aux valeurs limites d'exposition et les niveaux de référence correspondent aux valeurs déclenchant l'action (Cf. Tableau 1). Pour le public, un facteur de sécurité supplémentaire a été appliqué afin de tenir compte notamment de la plus grande variabilité des personnes en termes d'âge, d'état de santé et de conditions physiques. D'autre part, les travailleurs sont « formés afin d'être sensibilisés aux risques potentiels liés aux champs électromagnétiques radiofréquences et de pouvoir prendre les mesures appropriées d'atténuation des effets néfastes ».

En ce qui concerne les effets sur la santé, on distingue deux cas. D'une part, il existe des effets aigus, bien documentés, dus à l'échauffement des tissus ou la stimulation des tissus nerveux et musculaires excita- bles. D'autre part, on soupçonne l'existence d'effets dits non thermiques qui se produisent dans le cadre

d'expositions chroniques à des niveaux de puissance plus modérés, comme l'apparition de tumeurs. Ainsi, en 2011, le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) a classé les champs électromagnétiques comme « peut-être cancérogènes pour l'homme » (groupe 2B). Ces effets continuent à faire l'objet de nombreuses publications, sans qu'un consensus en ressorte. Régulièrement des analyses de la littérature sont faites [2].

Les calculs de l'ICNIRP sont faits en prenant en compte les seuils associés uniquement aux effets thermiques et de stimulation, qui font l'objet d'un consensus. Ces derniers avaient été traités par l'ICNIRP en 2010 [3]. Dans la mise à jour de 2020, l'ICNIRP rappelle simplement qu'ils se produisent pour des fréquences jusqu'à 10MHz et que, dans la gamme de 100 kHz à 10 MHz, les niveaux de référence à ne pas dépasser pour le champ électrique et l'excitation magnétique sont fixés, respectivement, à 170 V/m et 80 A/m pour les travailleurs.

POPULATION GÉNÉRALE		TRAVAILLEURS	
ICNIRP	DÉCRET N° 2002-775 DU 3 MAI 2002	ICNIRP	CODE DU TRAVAIL
Restrictions de base applicables en cas d'exposition de la population générale	Restrictions de base	Restrictions de base applicables en cas d'exposition professionnelle	Valeurs limites d'exposition (VLE)
Niveaux de référence applicables en cas d'exposition de la population générale	Niveaux de référence	Niveaux de référence applicables en cas d'exposition professionnelle	Valeurs déclenchant l'action (VA)

← TABLEAU 1
Correspondance entre les termes utilisés par l'ICNIRP et ceux retenus dans la réglementation française.



L'objectif de cet article est d'expliquer de manière simplifiée la démarche de l'ICNIRP pour établir ses lignes directrices en reprenant le raisonnement détaillé dans la version 2020.

Physique des champs électromagnétiques dans la gamme de 100 kHz à 300 GHz

Les champs électromagnétiques sont caractérisés par un champ électrique (E) exprimé en volts par mètre et un champ magnétique qui s'exprime de deux façons, soit par l'excitation magnétique (H) exprimée en ampères par mètre, soit par le champ magnétique (B) exprimé en teslas⁵. Ils oscillent à la fréquence de la tension ou du courant qui en sont à l'origine. Dans le vide (ou dans l'air), loin de la source qui les a créés, ces champs prennent une forme simple, celle d'une onde plane qui se propage à la vitesse de la lumière en transportant de la puissance. Elle est caractérisée par une échelle de périodicité spatiale, la longueur d'onde, qui varie comme l'inverse de la fréquence, de 3 km (à 100 kHz), jusqu'à 1 mm (à 300 GHz). Pour les ondes, il existe une relation simple entre la puissance transportée par unité de surface et l'intensité du champ électrique ou l'excitation magnétique.

Pour fixer les idées, une antenne qui émet de manière isotrope une puissance P est à l'origine de champs donnés par la formule suivante où d est la distance à l'antenne.

$$E = 5,5 \frac{\sqrt{P}}{d} \text{ et } H = 0,0146 \frac{\sqrt{P}}{d} \text{ (Unités : V/m, A/m, watt, mètres)}$$

Les tissus humains sont des « matériaux » diélectriques, faiblement conducteurs de l'électricité. Leur conductivité varie en fonction du type de tissu (il y a donc de fortes inhomogénéités dans le corps parfois sur moins d'un centimètre) et de la fréquence du champ. Elle est de l'ordre de 1 siemens par mètre, avec une tendance à l'augmentation aux hautes fréquences. Cette conductivité suffit à modifier la propagation des champs, surtout à haute fréquence. Un concept important est la profondeur de pénétration des ondes. Pour un matériau conducteur, d'une conductivité de 1 siemens par mètre, valeur que l'on trouve pour les tissus, cette profondeur de pénétration est donnée par la formule :

$$\delta = \frac{503}{\sqrt{f}} \text{ où } f \text{ est la fréquence de l'onde. Les unités sont le mètre et le hertz.}$$

La majorité de la puissance est dissipée sur cette distance. Ainsi, pour une onde à 6 GHz, 86 % de la puissance est absorbée à moins de 6,5 mm de la surface du conducteur. Aux fréquences plus élevées, les ondes tendent à se localiser encore plus à la surface. Une autre propriété des tissus est leur capacité à s'échauffer en présence d'un champ électromagnétique du fait de deux phénomènes. À basse fréquence il s'agit de l'effet Joule, comme dans tout conducteur parcouru par un courant. Aux plus hautes fréquences s'ajoutent les pertes diélectriques (les molécules comme l'eau sont mises en mouvement par le champ électrique et oscillent à la fréquence de cette onde. Elles heurtent leurs voisines, ce qui a pour effet de chauffer le milieu). C'est la conjonction de ces deux phénomènes qui est à l'origine de l'échauffement des tissus.

Une partie importante du document de l'ICNIRP consiste à analyser les échauffements admissibles. Cette analyse est effectuée à partir de données expérimentales et de modélisations. Des facteurs de sécurité sont ajoutés (de 2 à 10 suivant les cas), pour prendre en compte la variabilité entre travailleurs, celle de l'environnement (température, vent, vêtements) et les incertitudes dans les évaluations des seuils. Pour la population générale, on applique un facteur de sécurité supplémentaire de 5.

Calcul des échauffements admissibles en régime stationnaire

Trois grandes familles de situations sont discutées qui correspondent à des limites différentes. Elles sont représentées sur la Figure 1.



© Fabrice Dimier pour l'INRS/2015

Échauffement corps entier

Lorsque le champ chauffe les tissus, le premier risque à considérer est que les mécanismes de régulation thermique soient débordés et que le corps ne puisse se maintenir autour de 37°C [4]. Pour fixer les idées, un humain dissipe environ 1 W par kilogramme de masse corporelle au repos ; et 10 fois plus en cas d'effort intense. La puissance cédée par les ondes s'y ajoute. Cette puissance moyennée sur le volume du corps est représentée par le DAS (Débit d'absorption spécifique), qui s'exprime en watt absorbé par kg de tissu. À partir de données expérimentales disponibles et de modélisations, l'ICNIRP estime que, tant que la puissance déposée est inférieure à 4 W/Kg durant 30 minutes, celle-ci peut être compensée par la régulation thermique. En ajoutant un facteur de sécurité de 10, l'ICNIRP fixe le DAS maximum pour les travailleurs à 0,4 W/kg.

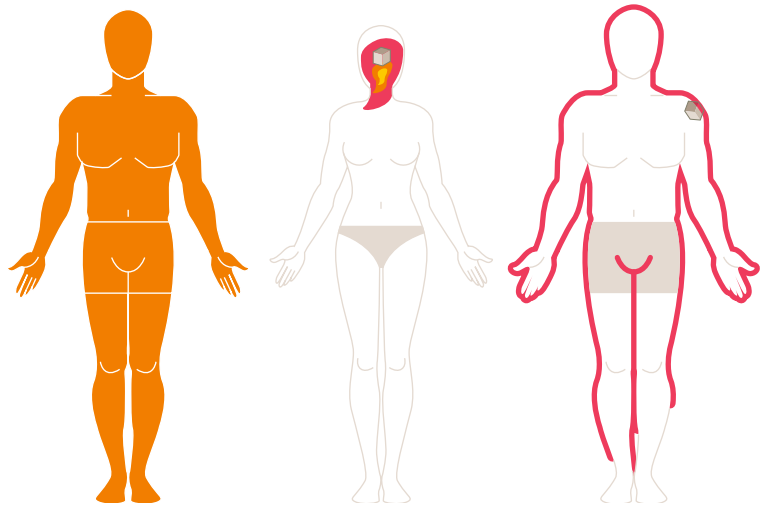
Lorsque le corps est exposé à des ondes haute fréquence, au-delà de 6 GHz, l'échauffement devient plus superficiel. On peut néanmoins calculer un DAS en faisant l'hypothèse protectrice que cette énergie déposée en surface n'est pas directement évacuée : le DAS est le flux de puissance déposée au niveau de la peau, multipliée par la surface de peau et divisée par la masse du corps. L'ICNIRP retient ce même seuil de 0,4 W/kg.

Échauffement local, fréquences inférieures à 6 GHz

Même si la puissance moyennée dans le volume du corps reste en dessous du seuil de 0,4 W/kg, il se peut qu'en présence d'un champ plus localisé, une partie du corps s'échauffe au-delà d'un seuil où les tissus vont être endommagés. L'ICNIRP fixe cette température critique à 41°C. Pour traiter l'échauffement local, on considère non plus le corps entier mais un petit morceau de tissus d'une masse de 10 grammes (il faut imaginer un cube de 2,15 cm de côté). L'ICNIRP considère qu'en cas d'échauffement très local, la chaleur diffuse et la température s'équilibre à l'échelle de ce cube, sur un temps de l'ordre de six minutes. On définit un DAS_{10g} qui est la puissance déposée dans ce cube par kg de tissu. Après avoir appliqué un facteur de sécurité de 2, l'ICNIRP retient pour les travailleurs un DAS_{10g} au maximum de 10W/kg dans la région « tête et torse » et 20 W/kg dans la région « membres » pour une exposition de plus de six minutes. Cette distinction entre deux DAS_{10g} est due au fait que les membres se refroidissent plus rapidement.

Cas des hautes fréquences, supérieures à 6 GHz

Aux fréquences élevées, la puissance se dépose au niveau de la peau avec, là aussi, des risques de brûlure. En revanche, les tissus internes ne sont pas atteints. Dans une première approche, on peut visualiser le petit cube de 2,15 cm de côté placé contre la peau. Toutes les ondes qui traversent la face contre la peau déposent leur énergie à proximité. Cela a



↑ FIGURE 1

Schéma représentant le dépôt de puissance dans trois cas.
 À gauche, un champ de fréquence modérée emplissant l'espace de manière plus ou moins homogène. L'ensemble du corps reçoit de la puissance et les mécanismes de régulation thermique peuvent être débordés. Au centre, la travailleuse est exposée à un champ plus localisé, par exemple parce qu'il est à proximité d'une antenne de petite taille. Le risque est plutôt celui d'une brûlure locale. À droite, le travailleur est en présence de champ haute fréquence au-delà de 6 GHz. La puissance se dépose alors essentiellement au niveau de la peau. Sont également représentés deux exemples des cubes fictifs servant à calculer le DAS_{10g} .

amené l'ICNIRP à discuter l'exposition en termes de flux de puissance moyennée sur cette face, qui représente environ 4 cm². En adoptant un facteur de sécurité de 2, l'ICNIRP a ainsi fixé une valeur maximum de la puissance absorbée moyennée sur six minutes, à 100 W.m⁻² pour les travailleurs. Ce flux induit un échauffement local inférieur à 2°C et est donc applicable à tous les tissus, donc à toutes les surfaces du corps.

Pour les fréquences supérieures à 30 GHz, la puissance peut être focalisée sur une zone plus petite que la face de 4 cm² du petit cube imaginaire cité ci-dessus. Pour prendre en compte cette capacité des ondes à se concentrer sur une petite zone, on est amené à considérer un cube plus petit, de 1 cm de côté. Dans ce cas, l'ICNIRP préconise ainsi une valeur maximum de puissance absorbée moyennée sur six minutes de 200 W.m⁻².

Calcul des échauffements admissibles en régime pulsé

En pratique, les tissus humains sont hétérogènes. Certaines zones absorbent plus de chaleur que d'autres. Tant que l'on considère des expositions moyennées sur les temps longs, cela a peu d'importance. En effet, la température s'équilibre rapidement dans le petit cube de 2,15 cm mentionné précédemment, de telle sorte que les points chauds sont effacés⁶. Toutefois, dans diverses applications, les ondes peuvent se présenter sous la forme de trains d'impulsions courts et de forte puissance. Dans ce cas, des petites parties du corps peuvent s'échauffer considérablement en une fraction de seconde, avant de refroidir au contact des tissus environnants



jusqu'à l'impulsion suivante. C'est particulièrement le cas dans la gamme [400 MHz - 6 GHz], gamme à laquelle la puissance se concentre déjà dans des épaisseurs de tissus comprises typiquement entre 1 et 5 cm. L'ICNIRP a été amené à définir des seuils spécifiques pour les impulsions courtes. Ceux-ci visent à limiter le nombre de joules déposés en six minutes, cette limite diminuant avec la brièveté de l'impulsion durant laquelle l'énergie est absorbée. Pour des expositions longues, le DAS_{10g} moyenné sur six minutes ne pouvait pas dépasser 10 W par kg. En d'autres termes, il ne faut pas déposer plus de 3600 J par kg sur six minutes. Si aucune correction n'était effectuée, cela signifie que si le travailleur est exposé à une impulsion de 100 ms une fois toutes les six minutes, la puissance instantanée déposée par kg ne devrait pas dépasser 36 kW. En pratique, pour une impulsion de 100 ms, la règle modifiée limite l'énergie à 250 J par kg, soit une puissance de crête inférieure à 2,5 kW.

Calcul des restrictions opérationnelles

Les restrictions de base définies par l'ICNIRP sont liées à la puissance déposée par les champs électromagnétiques dans les tissus, c'est-à-dire des grandeurs non directement accessibles à la mesure. Pour établir qu'on reste en dessous de ces seuils, il est nécessaire de définir une correspondance entre cette puissance et des caractéristiques du champ électromagnétique au poste de travail, plus faciles à mesurer, telles qu'excitation magnétique, champ électrique, puissance incidente, que l'ICNIRP nomme niveaux de référence.

Ces valeurs limites peuvent être estimées à partir de mesures. Pour cela, on simule le corps humain à l'aide d'un mannequin rempli d'une matière ayant des propriétés diélectriques proches de celles des tissus, dont on peut mesurer l'échauffement en fonction des caractéristiques des champs électromagnétiques à l'extérieur. On peut également effectuer un calcul de la puissance déposée sur un modèle numérique d'être humain, modélisé avec plus ou moins de précision (d'une forme rudimentaire jusqu'au modèle réaliste). Dans les deux cas, dans la mesure où on s'intéresse à la puissance déposée moyennée sur des temps longs, il n'est en général pas nécessaire de simuler les détails anatomiques internes, pour prendre en compte les inhomogénéités à l'intérieur des tissus.

Une question à traiter en amont est celle de la structure du champ au poste de travail, car elle joue un rôle déterminant sur la puissance déposée dans les tissus. Les situations sont très diverses : le champ peut être généré par un ensemble de conducteurs parcourus par des courants, par des conducteurs à haute tension, par des antennes qui émettent des ondes à différentes distances. Trois types de situations⁷ sont distinguées :

- **Champ lointain** : Lorsqu'on est assez loin de l'émetteur, le champ électromagnétique s'organise sous la forme d'ondes qui sont bien décrites par des ondes planes qui se propagent entre l'émetteur et le travailleur. Elles sont décrites par un champ électrique et une excitation magnétique qui oscillent dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Dans ce cas, la connaissance de E ou de H ou de la puissance transportée suffit à caractériser entièrement l'onde, et la restriction opérationnelle peut porter sur l'une de ces trois grandeurs.

- **Champ proche** : Lorsqu'on est près de l'émetteur, il n'y a pas d'onde bien formée mais un ensemble (E, H) avec une structure qui peut être complexe. La puissance déposée dépend de ces deux champs. Dans ce cas, pour effectuer un calcul, il est nécessaire de connaître à la fois E et H, et des seuils ne doivent pas être dépassés pour chacun de ces deux champs.

- **Champ proche réactif** : Lorsqu'on est encore plus près de l'émetteur (une fraction de longueur d'onde) tout se passe comme si le travailleur était directement couplé avec celui-ci et forme un circuit électrique. Le cas extrême est le contact entre le travailleur et l'émetteur (ou un objet métallique proche) avec, dans ce cas, un risque qui s'apparente à une électrocution.

L'énergie déposée dépend également de la fréquence du champ, car sa propagation est affectée. D'autre part la conductivité des tissus ou les pertes diélectriques, donc leur échauffement, augmentent avec la fréquence. Pour cette raison, les limites à ne pas franchir dépendent de la fréquence.

La *Figure 2a* représente les valeurs maximum de E et H incidentes à ne pas dépasser pour garantir qu'on est en dessous de la restriction de base 0,4 W/kg corps entier sur le dépôt de puissance. On remarque que la courbe est constituée de morceaux, qui correspondent à des régimes différents :

- Dans la gamme de fréquence [100 kHz – 30 MHz], la longueur d'onde dans le vide varie entre 10 m et 3 km. Le salarié est considéré dans la zone de champ proche et la notion d'onde n'est pas pertinente. On considère donc directement les champs créés par les charges et les courants à proximité. À ces basses fréquences, les équations qui décrivent ces champs se simplifient et il est possible de calculer deux contributions à l'énergie déposée dans les tissus, l'une issue du champ électrique et l'autre issue du champ magnétique. Il faut tenir compte du fait que, pour un champ d'une amplitude donnée, la résistivité des tissus, donc la puissance déposée, augmente avec la fréquence de l'onde, ce qui explique le fait que les valeurs limites décroissent avec la fréquence.

- Dans la gamme de fréquence [30 – 2 000 MHz = 2 GHz], la longueur d'onde dans le vide varie entre 10 m et 15 cm. Dans cette gamme de fréquence,

la profondeur à laquelle les ondes pénètrent passe d'environ 10 cm à 1 cm. La puissance incidente est donc déposée à l'intérieur du corps indépendamment de la valeur de la conductivité des tissus, ce qui explique que les valeurs seuils varient peu avec la fréquence. Selon le cas, le salarié peut être dans la zone de champ proche (dans ce cas, il faut respecter les deux valeurs limites pour E et H), soit dans la zone de champ lointain⁸ (dans ce cas, il suffit que E ou H ou la puissance incidente soit conforme). L'ICNIRP a également abordé la question des phénomènes de résonances qui se produisent lorsqu'une dimension du corps est proche de la demi-longueur d'onde dans le vide. Des calculs montrent que l'énergie déposée peut augmenter de 40 %, mais que cette augmentation reste dans les marges de sécurité. Dans certaines configurations, en dessous de 110 MHz, lorsque le salarié est en contact avec la terre, des courants significatifs peuvent traverser ses membres. L'ICNIRP mentionne un niveau maximum de 100 mA.

- Dans la gamme de fréquence [2 GHz - 300 GHz], la longueur d'onde dans le vide varie entre 1 mm et 15 cm. Le champ a le plus souvent la forme d'une onde qui est partiellement réfléchi par la peau et partiellement transmise à travers la peau et totalement absorbée. Dans ces conditions, il est logique d'exprimer la limite en termes de puissance incidente maximum (50 W/m²).

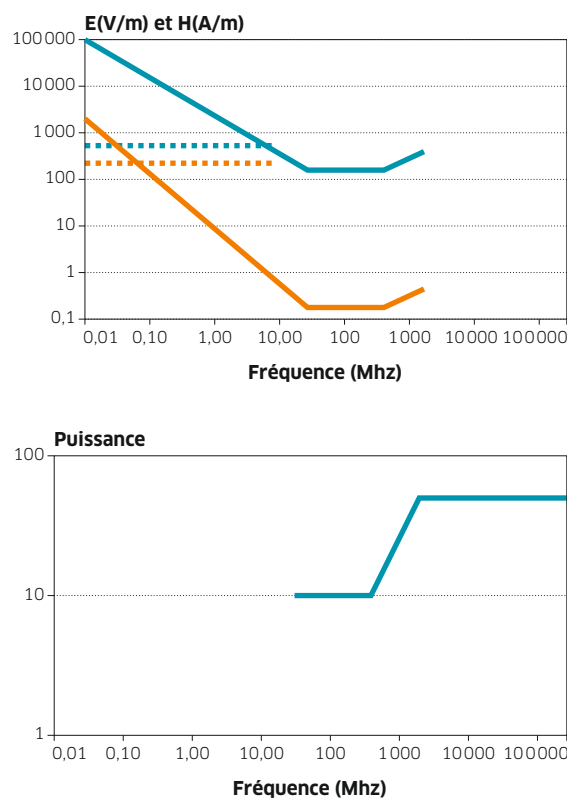
Des courbes similaires existent pour les DAS_{10g}, applicables lorsque l'exposition ne concerne qu'une partie du corps, le but étant alors d'éviter des brûlures locales. Les champs associés sont 2,3 fois plus élevés, ce qui correspond à des puissances cinq fois plus fortes que pour les limites corps entier. Aux plus hautes fréquences, la courbe s'infléchit vers le bas pour être en conformité avec le flux de 100 W/m² absorbés.

Moyens de prévention

La prévention des risques liés à l'exposition aux champs électromagnétiques repose sur les principes généraux de prévention. Le choix des solutions à mettre en œuvre dépend principalement du type de source et de l'organisation du poste de travail. En premier lieu, il convient de réduire l'émission de rayonnement à la source en remplaçant l'équipement par un autre qui ne génère pas de champs électromagnétiques ou qui émet des champs de plus faibles intensités. Il est également possible d'arrêter ou de réduire le niveau d'émission de la source lorsqu'un travailleur est amené à se trouver à proximité. D'autre part, l'achat d'équipements intégrant des dispositifs de protection à la conception tels que des blindages sont à privilégier.

Les champs électromagnétiques étant décroissants avec la distance par rapport à la source, l'éloignement permet de diminuer l'exposition.

Lors de la conception d'une installation, on veillera ainsi à implanter la source de façon à limiter au



↑ FIGURE 2
Niveaux de référence applicables en cas d'exposition professionnelle afin que le DAS corps entier ne dépasse pas la restriction de base correspondante de 0,4 W/kg. Dans la figure du haut (2a), sont représentés les niveaux de référence pour le champ électrique (bleu) et l'excitation magnétique (rouge) moyennés dans le temps à ne pas dépasser au poste de travail en fonction de la fréquence. Sont également représentées en pointillés, les valeurs de 170 V/m et 80 A/m qui définissent les niveaux de référence visant à se prémunir contre l'apparition des effets de stimulation des tissus excitables. En bas (2b), est représentée la puissance maximum incidente utilisée comme restriction de base pour les hautes fréquences.

maximum l'exposition au poste de travail et aussi à éviter toute proximité inutile avec d'autres postes de travail, ainsi que les zones de circulation.

Afin de limiter les risques de dépassement d'une valeur réglementaire (valeur déclenchant l'action du Code du travail ou niveau de référence concernant l'exposition du public), il est nécessaire de délimiter les zones correspondantes par un marquage au sol ou à l'aide de barrières matérielles.

Si aucune mesure de protection collective n'est réalisable ou si leur efficacité n'est pas suffisante, il est nécessaire de recourir à un équipement de protection individuelle (EPI). Les EPI disponibles sur le marché permettent d'atténuer uniquement le champ électrique d'un facteur 5 à 10, selon le modèle et pour des fréquences comprises entre 80 MHz et 2000 MHz⁹.

Enfin, une formation ou une information doit être dispensée à l'ensemble des travailleurs susceptibles d'être exposés à un risque lié à des champs électromagnétiques. Cette formation ou information doit être établie en lien avec les résultats de l'évaluation des risques et définir les moyens de prévention mis en œuvre.



LOCALISATION	GAMME DE FRÉQUENCE	ΔT°	MOYENNE SPATIALE	MOYENNE TEMPORELLE	NIVEAU EFFET SANTÉ	TRAVAILLEURS	POPULATION GÉNÉRALE
Corps entier	100 kHz - 300 GHz	1 °C	Corps entier	30 min	4 W/kg	0,4 W/kg	0,08 W/kg
Tête et tronc	100 kHz - 6 GHz	2 °C	10 g	6 min	20 W/kg	10 W/kg	2 W/kg
Membres	100 kHz - 6 GHz	5 °C	10 g	6 min	40 W/kg	20 W/kg	4 W/kg
Tête, tronc, membres	> 6 GHz - 300 GHz	5 °C	4 cm ²	6 min	200 W/m ²	100 W/m ²	20 W/m ²
	30 GHz - 300 GHz	5 °C	1 cm ²	6 min	400 W/m ²	200 W/m ²	40 W/m ²

↑ TABLEAU 2
Synthèse des différentes valeurs limites d'exposition et des considérations associées en fonction de la région anatomique à protéger.

Conclusion

L'établissement de valeurs limites d'exposition de l'homme aux champs électromagnétiques est un exercice complexe et fastidieux, qui repose sur une approche pluridisciplinaire (biologie, physiologie, physique...). Il s'appuie sur un état des connaissances, régulièrement remis à jour, issu d'analyses de la littérature scientifique, au regard des critères de qualité établis pour la conduite des études scientifiques. Sur certains sujets, il existe un consensus (propagation des ondes, effets thermiques ou sensoriels) alors que sur d'autres, la situation est plus contrastée.

Les valeurs limites d'exposition proposées dans les publications de l'ICNIRP ont été établies après analyse de la littérature scientifique par sa commission, et elles s'appuient sur les connaissances qu'elle juge faire consensus. Il convient de noter que, si les connaissances sur les effets sur la santé des ondes évoluaient, les méthodes mentionnées ci-dessus pour décrire le comportement des ondes resteraient en grande partie valables.

Le poids important des recommandations de l'ICNIRP dans l'établissement des prescriptions minimales de sécurité et de santé établies au niveau européen impose d'en prendre connaissance. En effet,

l'appropriation de son contenu permet d'anticiper les éventuelles évolutions réglementaires à venir et d'intégrer les nouveaux éléments le plus en amont possible dans la démarche de prévention de ce risque. ●

1. Directive n° 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013. Accessible sur : <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:179:0001:0021:FR:PDF>.

2. Décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000032974358/.

3. Recommandation du Conseil n° 1999/519/CE du 12 juillet 1999 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz). Accessible sur : <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1999:199:0059:0070:FR:PDF>.

4. Décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L. 32 du code des postes et télécommunications et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr/loda/article_lc/LEGIARTI000006211918/.

5. Ces deux grandeurs sont liées par la relation $B = \mu H$ dans laquelle μ représente la perméabilité magnétique du matériau. Dans l'air, $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ et 1 A/m correspond à environ 1,25 μT .

6. Ce phénomène est très visible lorsqu'on cherche à décongeler un plat trop vite. Certains ingrédients peuvent être brûlants alors que l'ensemble du plat est tiède.

7. Pour visualiser ces trois régimes, on peut faire une analogie (partielle) avec la houle au voisinage d'une côte rocheuse irrégulière. Loin de la côte la houle réfléchi par le rivage est bien formée ; près de la côte, la mer peut être agitée de manière bien plus irrégulière ; encore plus près, on peut être aspiré contre les rochers.

8. Un exemple de cas où l'on est dans une telle situation est celle de l'utilisation d'un téléphone portable, l'antenne étant proche du crâne.

9. Les EPI sont utilisés dans certaines conditions essentiellement par les personnes qui interviennent sur des installations équipées d'antennes qui ne peuvent pas être coupées pour des raisons de continuité de service (télévision, radio, sécurité aérienne..).

BIBLIOGRAPHIE

[1] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP) – Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 khz to 300 ghz). *Health Physics*, 118 (5), pp. 483-524. Accessible sur : www.icnirp.org/en/publications/article/rf-guidelines-2020.html

[2] AVIS DE L'ANSES – Rapport d'expertise collective « radiofréquences et santé 2013 ». Accessible sur : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2011sa0150Ra.pdf>

[3] ICNIRP – Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 hz - 100 khz). *Health Physics*, 2010, 99 (6), pp. 818-836.

[4] AUBRY C., SIANO B. ET AL. – Dossier : Travailler dans des ambiances thermiques chaudes ou froides : quelle prévention ? *Hygiène & sécurité du travail*, 2020, 259, DO 29, pp. 36-66. Accessible sur : www.hst.fr