

POINT DE REPÈRE

LIGNES DIRECTRICES POUR L'ÉTABLISSEMENT DE LIMITES D'EXPOSITION AUX CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES VARIABLES DANS LE TEMPS (fréquences de 1 Hz à 100 kHz)

Ce document propose des lignes directrices pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques et magnétiques variables dans le temps dans le domaine des basses fréquences du spectre électromagnétique en vue de la protection de l'homme. Les principes généraux qui régissent l'établissement des guides de l'ICNIRP sont publiés par ailleurs (ICNIRP, 2002). Dans le cadre du présent document, le domaine des basses fréquences s'étend de 1 Hz à 100 kHz. Au-dessus de 100 kHz, il faut notamment tenir compte d'effets thermiques couverts par d'autres lignes directrices de l'ICNIRP. Dans la gamme des fréquences intermédiaires de 100 kHz à 10 MHz environ, il faut néanmoins prévoir une protection à la fois contre les effets des basses fréquences sur le système nerveux et contre ceux des hautes fréquences, en fonction des conditions d'exposition. C'est la raison pour laquelle certaines des valeurs limites figurant dans le présent document s'appliquent jusqu'à 10 MHz, afin de couvrir les effets sur le système nerveux dans cette gamme de fréquences. Des lignes directrices relatives aux champs magnétiques statiques ont été publiées dans un document distinct (ICNIRP, 2009). Des lignes directrices applicables aux champs électriques induits par mouvement et aux champs magnétiques variables dans le temps dont les fréquences vont jusqu'à 1 Hz seront publiées séparément.

La présente publication remplace la partie relative aux basses fréquences du document de 1998 (ICNIRP, 1998). Ce même document est en cours de révision par l'ICNIRP pour le domaine des hautes fréquences du spectre (au-dessus de 100 kHz).

OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

Cette publication a pour principal objectif l'établissement de lignes directrices destinées à limiter l'exposition aux champs électriques et magnétiques

(CEM)¹ à des niveaux qui permettent d'assurer la protection des personnes contre tous les effets nocifs connus de ces champs.

¹ Le sigle « CEM » utilisé dans ce document pour « champ électromagnétique » ne doit pas être confondu avec le sigle « CEM » utilisé couramment par ailleurs dans le sens de « compatibilité électromagnétique »

► Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP)

Cet article est la traduction de ICNIRP Guidelines *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)* publié par l'ICNIRP.

Il est reproduit avec l'aimable autorisation de l'ICNIRP.

La traduction française a été réalisée par Patricia Ceresa pour le département Etude, valorisation et assistance documentaires de l'INRS et validée par Martine Bloch, INRS, département EVAD et Jean-Pierre Servent, INRS, département Expertise et conseil technique

Des études portant à la fois sur les effets directs et indirects des CEM ont été évaluées ; les effets directs résultent d'interactions directes entre les champs et l'organisme humain, alors que les effets indirects font intervenir des interactions avec un objet conducteur dont le potentiel électrique est différent de celui du corps humain. Ont été pris en compte les résultats d'études épidémiologiques et de laboratoire, les principaux critères d'évaluation de l'exposition et les niveaux de référence pour l'évaluation pratique du risque. Ce document s'applique aussi bien à l'exposition des travailleurs qu'à celle du public.

Les valeurs limites qui figurent dans ce document ont été établies d'après des données probantes et validées concernant les effets aigus ; les connaissances disponibles à ce jour indiquent que le respect de ces valeurs limites permet de protéger les travailleurs et la population générale des effets nocifs d'une exposition aux CEM basses fréquences. Les données épidémiologiques et biologiques relatives à des affections chroniques ont été soigneusement passées en revue, avec pour conclusion l'absence de preuve irréfutable quant à leur lien de cause à effet avec une exposition à des CEM basses fréquences.

Ce document n'aborde pas les normes de performance de produits, qui sont destinées à limiter les émissions de CEM provenant de dispositifs particuliers dans des conditions d'essai spécifiées, et il ne traite pas non plus des techniques de mesure des grandeurs physiques caractérisant les champs électriques, magnétiques et électromagnétiques. L'instrumentation et les techniques de mesurage permettant de déterminer avec précision ces grandeurs physiques sont décrites de façon détaillée dans d'autres documents (IEC 2004, IEC 2005a, IEEE 1994, IEEE 2008).

Le respect de ces lignes directrices ne permet pas d'éviter systématiquement toute interférence avec les dispositifs médicaux tels que stimulateurs cardiaques, défibrillateurs implantables et implants cochléaires ou tout effet thermique sur les prothèses métalliques. Ces interférences peuvent survenir à des niveaux de champ inférieurs aux niveaux de référence recommandés. La prévention de ces problèmes n'entre pas dans le domaine d'application du présent document, mais est traitée dans d'autres documents (IEC 2005b).

TABLEAU I

Grandeurs et unités SI correspondantes utilisées dans le présent guide

| Grandeur | Symbole | Unité |
|-------------------------------|------------|---|
| Conductivité | σ | siemens par mètre (S.m ⁻¹) |
| Courant | I | ampère (A) |
| Densité de courant | J | ampère par mètre carré (A.m ⁻²) |
| Fréquence | f | hertz (Hz) |
| Intensité de champ électrique | E | volt par mètre (V.m ⁻¹) |
| Intensité de champ magnétique | H | ampère par mètre (A.m ⁻¹) |
| Densité de flux magnétique | B | tesla (T) |
| Perméabilité magnétique | μ | henry par mètre (H.m ⁻¹) |
| Permittivité électrique | ϵ | farad par mètre (F.m ⁻¹) |

Le présent document sera révisé et mis à jour périodiquement, au fur et à mesure des avancées scientifiques en rapport avec l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques et magnétiques basses fréquences variables dans le temps.

GRANDEURS PHYSIQUES ET UNITÉS

Alors que les champs électriques ne sont associés qu'à la présence d'une charge électrique, les champs magnétiques sont créés par le mouvement physique d'une charge électrique (courant électrique). Un champ électrique, E, exerce une force sur une charge électrique et s'exprime en volt par mètre (V.m⁻¹). De façon analogue, les champs magnétiques peuvent exercer des forces physiques sur des charges électriques, si ces charges sont en mouvement et/ou si le champ magnétique est variable dans le temps. Les champs électriques et magnétiques ont une intensité et une direction (ce sont donc des vecteurs). Un champ magnétique peut être spécifié de deux façons, soit par la densité de flux magnétique, B, exprimée en tesla (T), soit par l'intensité de champ magnétique, H, exprimée en ampère par mètre (A.m⁻¹). Ces deux grandeurs sont liées par la relation :

$$B = \mu \cdot H \quad (1)$$

dans laquelle μ représente une constante physique de proportionnalité (qui exprime la perméabilité magné-

tique) ; dans le vide et dans l'air, comme dans les matériaux non magnétiques (y compris les matériaux biologiques), la constante μ , exprimée en henry par mètre (H.m⁻¹), prend la valeur $4\pi \times 10^{-7}$. Il suffit donc, pour décrire un champ magnétique à des fins de prévention, de spécifier l'une des grandeurs B ou H.

L'exposition à des champs électriques ou magnétiques variables dans le temps génère des champs électriques internes et des courants à travers le corps, ainsi qu'une absorption d'énergie dans les tissus ; l'intensité de ces phénomènes varie selon les mécanismes de couplage et la fréquence. Le champ électrique interne E_i et la densité de courant J sont liés par la loi d'Ohm :

$$J = \sigma \cdot E_i \quad (2)$$

dans laquelle σ représente la conductivité électrique du milieu et E_i le champ électrique interne.

Les grandeurs en rapport avec la caractérisation des CEM utilisées dans ce document sont présentées [Tableau I](#).

FONDEMENTS SCIENTIFIQUES DE LA LIMITATION DE L'EXPOSITION

Les présentes lignes directrices pour la limitation de l'exposition ont été élaborées à la suite d'une analyse approfondie de la littérature scientifique publiée. Des

critères d'évaluation bien établis ont été employés pour examiner la validité scientifique de la méthodologie, des résultats et des conclusions des observations rapportées. Seuls les effets attestés par des données scientifiques dignes de foi ont été retenus comme fondements pour les valeurs limites d'exposition.

Les effets biologiques de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences ont été passés en revue par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) [IARC], l'ICNIRP et l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) [WHO] (CIRC [IARC, 2002] ; ICNIRP, 2003a ; OMS [WHO, 2007a]), ainsi que par des groupes d'experts nationaux. Ces publications ont fourni les fondements scientifiques de ce document.

Comme on le verra plus précisément dans ce qui suit, les bases de ce document sont de deux ordres : en premier lieu, l'exposition à des champs électriques basses fréquences peut provoquer des réactions biologiques bien définies, allant d'une simple perception à une gêne, en passant par des effets liés aux charges électriques superficielles ; par ailleurs, chez des volontaires exposés à des champs magnétiques basses fréquences, les seuls effets avérés sont une stimulation des tissus nerveux centraux et périphériques, et l'induction de phosphènes dans la rétine, c'est-à-dire la perception de légers scintillements lumineux à la périphérie du champ visuel. La rétine, qui fait partie du système nerveux central (SNC), est considérée comme un modèle approprié et très protecteur pour déterminer les effets des champs électriques induits sur l'ensemble des réseaux neuronaux du SNC.

Compte tenu de l'incertitude inhérente aux données scientifiques, des facteurs de réduction ont été appliqués pour l'établissement des valeurs limites d'exposition ; pour en connaître les détails, voir le document ICNIRP, 2002.

MÉCANISMES DE COUPLAGE ENTRE LES CHAMPS ET LE CORPS HUMAIN

Les organismes humains et animaux provoquent des perturbations significatives de la distribution spatiale des champs électriques basses fréquences. Aux basses fréquences, le corps est un bon conducteur, et les lignes de champ perturbées à l'extérieur du corps sont pratiquement perpendiculaires à la surface corporelle. Des mouvements de charges à la fré-

quence du champ externe apparaissent à la surface du corps exposé et génèrent ainsi des courants à l'intérieur du corps. En cas d'exposition d'êtres humains à des champs électriques basses fréquences, les principaux critères d'évaluation applicables sont les suivants :

- le champ électrique induit à l'intérieur du corps est beaucoup plus faible que le champ électrique externe, et par exemple d'un ordre de grandeur cinq à six fois moins élevé à 50/60 Hz ;

- pour un champ électrique externe donné, les champs les plus intenses sont induits lorsque le corps humain est en contact parfait avec la terre par l'intermédiaire des pieds (ce qui revient à une mise à la terre électrique), et les champs induits les plus faibles correspondent au cas où le corps est isolé par rapport à la terre (en « champ libre ») ;

- le courant total qui circule dans un corps en contact parfait avec la terre est déterminé par la taille et la forme du corps (y compris la position), plutôt que par la conductivité des tissus ;

- la distribution des courants induits à travers les différents organes et tissus dépend de la conductivité de ces tissus ;

- un effet indirect est également observable si le courant qui traverse le corps est produit par contact avec un objet conducteur situé dans un champ électrique.

En ce qui concerne les champs magnétiques, la perméabilité des tissus est la même que celle de l'air, et le champ à l'intérieur des tissus est donc identique au champ externe. Les organismes humains et animaux ne perturbent pas beaucoup les champs de ce type ; leur principale interaction avec les champs magnétiques se traduit, suivant la loi de Faraday, par l'induction de champs électriques et de courants associés à l'intérieur des tissus. Des champs électriques peuvent également être induits par mouvement dans un champ magnétique statique. Pour l'exposition des êtres humains à des champs magnétiques basses fréquences, les principaux critères d'évaluation applicables sont les suivants :

- pour un champ magnétique d'intensité et d'orientation données, les champs électriques les plus intenses sont induits dans le corps des personnes les plus corpulentes, car les dimensions des boucles de conduction éventuelles sont alors plus importantes ;

- le champ électrique induit et le courant qui lui est associé dépendent de l'orientation du champ magnétique

externe par rapport au corps exposé. D'une manière générale, les champs induits dans le corps ont une intensité maximale lorsque le champ est perpendiculaire au corps, bien que pour certains organes, les valeurs les plus élevées correspondent à d'autres directions du champ ;

- les champs électriques les plus faibles sont induits par des champs magnétiques orientés suivant l'axe longitudinal du corps ;

- la distribution du champ électrique induit est fonction de la conductivité des différents organes et tissus.

CONCLUSIONS RÉSULTANT DE LA REVUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE ACTUELLE

Système nerveux

L'exposition à des champs électriques basses fréquences provoque des réactions biologiques bien précises, allant d'une simple perception à une gêne, en passant par des effets liés aux charges électriques superficielles (Reilly 1998, 1999). Les seuils de perception directe observés sur les 10 % de volontaires les plus sensibles à la fréquence de 50/60 Hz sont compris entre 2 et 5 kV.m⁻¹, et 5 % d'entre eux éprouvent une gêne dès 15 à 20 kV.m⁻¹. Lorsqu'ils sont à l'origine d'une décharge d'étincelles vers la terre, 7 % des volontaires perçoivent ce phénomène comme douloureux dans un champ de 5 kV.m⁻¹, tandis qu'environ 50 % ressentent une douleur dans un champ de 10 kV.m⁻¹. Lorsqu'un objet chargé provoque une décharge d'étincelles à travers une personne reliée à la terre, les seuils de perception dépendent de la taille de l'objet, ce qui impose une évaluation au cas par cas.

Les tissus nerveux et musculaires excitables par l'électricité ont une faculté de réponse à des stimuli électriques bien connue depuis de nombreuses années, y compris pour les stimuli induits par l'exposition à des CEM basses fréquences, (par exemple, Reilly 2002 ; Saunders et Jefferys 2007). D'après un calcul théorique effectué sur un modèle de nerf, on a estimé que les fibres nerveuses myélinisées du système nerveux périphérique humain présentaient un seuil de réponse minimal pour une valeur d'environ 6 V_{crête}.m⁻¹ (Reilly 1998, 2002). Cependant, la stimulation des nerfs périphériques, induite chez des volontaires exposés à la commutation de gradient de champs magnétiques de certains systèmes à résonance magnétique (RM), a

suggéré que le seuil de perception pourrait ne pas dépasser environ 2 V.m^{-1} (Nyenhuys *et al.*, 2001), d'après des calculs sur un fantôme (réplique du corps humain, servant de modèle) homogène. Un calcul plus précis des champs électriques induits dans les tissus d'un fantôme hétérogène a été réalisé par So *et al.*, (2004), avec les données tirées de l'étude précitée sur la résonance magnétique. Ces auteurs ont estimé que le seuil minimal de stimulation des nerfs périphériques se situait autour de $4 \text{ à } 6 \text{ V.m}^{-1}$, dans l'hypothèse où la stimulation avait lieu dans la peau ou le tissu adipeux sous-cutané. Au-delà de cette valeur, les stimuli provoquent une sensation d'inconfort, puis de douleur ; le percentile le plus bas correspondant à une stimulation intolérable se situe environ 20 % au-dessus du seuil médian de perception (ICNIRP, 2004). Les fibres nerveuses myélinisées du système nerveux central (SNC) peuvent être stimulées par des champs électriques induits au cours d'une stimulation magnétique transcranienne (SMT) ; les champs pulsés induits dans le tissu cortical au cours d'une SMT sont assez élevés ($> 100 \text{ V}_{\text{cortex}}.\text{m}^{-1}$), même si le calcul théorique suggère que le seuil minimal de stimulation pourrait ne pas dépasser environ $10 \text{ V}_{\text{cortex}}.\text{m}^{-1}$ (Reilly 1998, 2002). Pour les deux ensembles de nerfs, les seuils augmentent à partir d'une fréquence située entre 1 et 3 kHz environ, car le délai disponible pour l'accumulation des charges électriques sur la membrane nerveuse diminue progressivement, et au-dessous de 10 Hz environ, dans la mesure où le nerf s'accommode à un stimulus lentement dépolarisant².

Les cellules musculaires sont généralement moins sensibles à une stimulation directe que les tissus nerveux (Reilly 1998). Le tissu du muscle cardiaque mérite une attention particulière, car une aberration de fonctionnement peut représenter un danger de mort ; cependant, les seuils de fibrillation ventriculaire sont au moins 50 fois plus élevés que les seuils de stimulation du muscle cardiaque (Reilly 2002), bien que cet ordre de grandeur diminue fortement si le cœur subit une excitation répétée pendant la phase vulnérable du cycle cardiaque. Les seuils augmentent pour les fréquences au-dessus de 120 Hz environ, car la constante de temps des fibres musculaires est beaucoup plus longue que celle des nerfs myélinisés.

Sous le seuil d'excitation nerveuse ou musculaire directe, l'effet des champs électriques le plus solidement établi chez des volontaires exposés à des champs

magnétiques basses fréquences est l'induction de magnétosphènes dans la rétine, c'est-à-dire la perception de légers scintillements lumineux à la périphérie du champ visuel. Le seuil minimal de densité de flux est d'environ 5 mT à 20 Hz, et il augmente aux fréquences supérieures et inférieures. Ces études considèrent que les phosphènes sont le résultat d'une interaction du champ électrique induit avec des cellules rétinienne excitables par l'électricité. La rétine se développe sous forme d'excroissance du prosencéphale et peut être considérée comme un modèle correct, et protecteur pour les processus à l'œuvre dans l'ensemble des tissus du SNC (Attwell 2003). Le seuil d'intensité des champs électriques induits dans la rétine a été estimé à une valeur comprise entre 50 et 100 mV.m^{-1} à 20 Hz environ, et il augmente aux fréquences supérieures et inférieures (Saunders et Jefferys 2007), bien qu'une incertitude importante reste attachée à ces valeurs.

Les propriétés d'intégration des tissus nerveux du SNC peuvent sensibiliser ces tissus aux champs électriques de faible intensité d'un point de vue physiologique et par conséquent affecter certaines fonctions telles que des processus cognitifs comme la mémoire. Saunders et Jefferys (2002) ont suggéré que la polarisation électrique des neurones du SNC par ces champs électriques faibles pourrait renforcer la synchronisation des groupes de neurones actifs et affecter le recrutement de neurones adjacents non actifs, influençant ainsi l'activité et l'excitabilité d'ensemble des cellules nerveuses. Des données probantes tirées d'études *in vitro* sur des coupes cérébrales suggèrent que le seuil minimal d'apparition de ces effets se situe à des fréquences inférieures à 100 Hz environ et pourrait ne pas dépasser 100 mV.m^{-1} (Saunders et Jefferys 2007).

Deux groupes de recherche ont étudié les effets qu'exercent des champs électriques de faible intensité, appliqués directement à la tête par l'intermédiaire d'électrodes³, sur le fonctionnement et l'activité électrique du cerveau chez l'être humain. L'un des groupes (Kanai *et al.*, 2008) a signalé que la stimulation du cortex visuel provoquait la perception de phosphènes corticaux (d'apparence semblable aux phosphènes induits dans la rétine) lorsque la fréquence du stimulus était caractéristique d'une activité du cortex visuel, soit dans l'obscurité (à environ 10 Hz), soit à la lumière (à environ 20 Hz), mais sans entraîner ce même effet à des fréquences supérieures ou inférieures.

L'autre groupe (Pogosyan *et al.*, 2009) a appliqué un signal à une fréquence de 20 Hz sur le cortex moteur de volontaires en train d'accomplir une tâche visuo-motrice, et a observé un ralentissement faible, mais statistiquement significatif du mouvement des mains pendant la réalisation de la tâche en question, ce qui correspondait bien à une synchronisation accrue de l'activité du cortex moteur à 20 Hz. Aucun effet n'a été constaté à une fréquence de stimulus inférieure. En résumé, les auteurs des deux groupes ont trouvé que des champs électriques d'une fréquence de 10 à 20 Hz et dépassant le seuil de perception des phosphènes rétinien peuvent perturber le rythme de l'activité électrique normale dans les cortex visuel et moteur, et affecter légèrement le traitement de l'information visuelle et la coordination motrice, le corollaire étant que les champs électriques induits par des champs électriques ou magnétiques de 10 à 20 Hz et d'une intensité suffisante pourraient exercer des effets similaires.

Il est toutefois beaucoup plus difficile d'établir clairement si d'autres effets affectant le système nerveux s'exercent sur l'activité électrique cérébrale, la cognition, le sommeil et l'humeur chez des volontaires exposés à des CEM basses fréquences (Cook, 2002, 2006 ; Crasson, 2003 ; ICNIRP, 2003a ; Barth *et al.*, 2009). D'une manière générale, ces études ont été menées pour des niveaux d'exposition d'environ 1 à 2 mT ou moins, c'est-à-dire inférieurs aux niveaux permettant d'induire les effets déjà décrits, et ont donné la preuve d'effets qui restent, au plus, discrets et transitoires. Les conditions nécessaires pour provoquer des réactions de cette nature ne sont pas encore bien définies.

Certains individus déclarent être hypersensibles aux CEM, d'une manière générale. Les éléments probants issus d'études de provocation en double aveugle suggèrent néanmoins que les symptômes signalés ne sont pas en relation avec une exposition à des CEM (Rubin *et al.*, 2005 ; OMS [WHO, 2007a]).

² Aucune accommodation ne se produit, par exemple, en réponse à la composante basse fréquence des impulsions rectangulaires ou trapézoïdales dont les temps de montée sont brefs, mais les fréquences de répétition faibles, comme celles de la commutation de gradients des champs magnétiques des systèmes de RM.

³ La stimulation transcranienne à courant alternatif ou « TACS » est appliquée à des niveaux inférieurs aux seuils de perception cutanée locale.

Les éléments tendant à démontrer que l'exposition à des champs électriques ou magnétiques basses fréquences provoque des symptômes dépressifs ou le suicide restent encore contradictoires et ne sont pas concluants (OMS [WHO, 2007a]).

Chez les animaux, l'éventualité qu'une exposition à des champs basses fréquences puisse affecter les fonctions neurocomportementales a été explorée suivant plusieurs perspectives dans toute une série de conditions d'exposition. Les effets démontrés sont peu nombreux. Des preuves convaincantes montrent que les champs électriques basses fréquences sont détectables par les animaux, vraisemblablement à la suite d'effets de charge superficielle, et peuvent provoquer un état de vigilance transitoire ou un stress modéré. D'autres changements apparaissant sous l'effet d'un champ sont moins bien définis (OMS [WHO, 2007a]).

Ainsi, la perception de charges électriques superficielles, la stimulation directe de tissus nerveux ou musculaires, et l'induction de phosphènes rétinien sont des effets bien établis qui peuvent servir de base pour déterminer des valeurs limites. De plus, certaines preuves scientifiques indirectes démontrent également que des fonctions cérébrales, comme le traitement de l'information visuelle et la coordination motrice, peuvent être affectées de manière transitoire par des champs électriques induits. Néanmoins, les éléments fournis par d'autres recherches neurocomportementales chez des volontaires exposés à des champs électriques et magnétiques basses fréquences ne sont pas suffisamment fiables pour permettre de fixer des limites à l'exposition humaine.

SYSTÈME NEUROENDOCRINIEN

Les résultats des études menées avec des sujets volontaires, ainsi que les enquêtes épidémiologiques réalisées dans des zones d'habitation et en milieu professionnel, suggèrent que le système neuroendocrinien ne subit pas d'effet défavorable lié à l'exposition à des champs électriques ou magnétiques de 50/60 Hz. Ces résultats s'appliquent en particulier aux taux circulants d'hormones spécifiques, y compris la mélatonine libérée par la glande pinéale, et à un certain nombre d'hormones libérées par l'hypophyse qui jouent un rôle dans le contrôle physiologique et métabolique de l'organisme. Des études ont été menées en laboratoire sur des volontaires pour rechercher les

effets d'une exposition à une fréquence de 50/60 Hz sur les taux nocturnes de mélatonine, mais la plupart d'entre elles n'ont découvert aucun effet lorsque des précautions avaient été prises pour éliminer les facteurs de confusion éventuels (OMS [WHO, 2007a]).

Parmi les multiples études sur l'animal qui ont recherché les effets des champs électriques et magnétiques de 50/60 Hz sur les taux de mélatonine dans le sérum et la glande pinéale du rat, certaines ont signalé que l'exposition se traduisait par une suppression de la synthèse nocturne de mélatonine, alors que d'autres études n'indiquaient pas ce résultat. Chez les animaux à reproduction saisonnière, les éléments cherchant à prouver l'effet d'une exposition à des champs de 50/60 Hz sur les taux de mélatonine et l'état reproductif lié à la mélatonine donnent des réponses essentiellement négatives (ICNIRP, 2003a ; OMS [WHO, 2007a]). Aucun effet probant n'a été observé sur les taux de mélatonine au cours d'une étude sur des primates non humains, exposés de manière chronique à des champs de 50/60 Hz.

Aucun effet systématique n'a été constaté sur les hormones liées au stress de l'axe hypophyso-surrénalien chez plusieurs espèces de mammifères, à l'exception peut-être d'un stress fugace au début de l'exposition à des champs électriques basses fréquences dont les niveaux étaient suffisamment élevés pour être perçus (ICNIRP, 2003a ; OMS [WHO, 2007a]). D'une manière comparable, même si peu d'études ont été réalisées, les résultats sont pour la plupart négatifs ou contradictoires quant aux effets observés sur les taux d'hormone de croissance et d'hormones impliquées dans le contrôle de l'activité métabolique, ou associées au contrôle de la reproduction et du développement sexuel.

Dans leur ensemble, ces résultats n'indiquent pas que les champs électriques et/ou magnétiques basses fréquences affectent le système neuroendocrinien d'une manière qui serait susceptible d'exercer un impact défavorable sur la santé humaine.

AFFECTIONS NEURODÉGÉNÉRATIVES

On a émis l'hypothèse qu'une exposition aux champs basses fréquences serait associée à plusieurs maladies neurodégénératives. En ce qui concerne la maladie de Parkinson et la sclérose en

plaques, les études ont été peu nombreuses, et aucune association entre ces maladies et une exposition aux basses fréquences n'a été démontrée. Des études en plus grand nombre ont été publiées pour la maladie d'Alzheimer et la sclérose latérale amyotrophique (SLA). Certaines de ces publications suggèrent que les personnes travaillant dans le secteur de l'électricité pourraient présenter un risque plus élevé de SLA (Kheifets *et al.*, 2009). Jusqu'à présent, on n'a pu établir aucun mécanisme biologique susceptible d'expliquer une telle association, qui aurait aussi bien pu être suscitée par des facteurs de confusion en lien avec les professions du secteur de l'électricité, comme les chocs électriques. Par ailleurs, les études qui ont utilisé des méthodes d'évaluation de l'exposition plus élaborées, par exemple des matrices emplois-expositions, n'ont généralement pas observé d'accroissement des risques (Kheifets *et al.*, 2009). Pour la maladie d'Alzheimer, les résultats ne sont pas cohérents. Les associations les plus solides ont été découvertes par des études reposant sur des données cliniques, mais susceptibles de comporter de nombreux biais de sélection ; cependant, un accroissement des risques a également été observé par quelques-unes, et non l'ensemble, des études en population générale. Les analyses de sous-groupes menées au sein des études renforcent l'impression que les données ne sont pas concordantes (Kheifets *et al.*, 2009). L'hétérogénéité statistique des résultats d'études différentes ne plaide pas en faveur d'une agrégation des résultats disponibles, même si des tentatives de cet ordre ont été entreprises (Garcia *et al.*, 2008). De plus, certains indices font entrevoir des biais de publication. D'une manière générale, les facteurs de confusion potentiels dus à d'autres expositions professionnelles n'ont pas été éliminés. A ce jour, on dispose d'une seule étude dans les zones d'habitation et, si elle indique bien un risque accru de maladie d'Alzheimer après une exposition de longue durée, elle ne repose que sur un très petit nombre de cas (Huss *et al.*, 2009).

Les études qui ont recherché une association entre exposition aux basses fréquences et maladie d'Alzheimer manquent de cohérence. Dans l'ensemble, les éléments tendant à démontrer une relation entre exposition aux basses fréquences et maladie d'Alzheimer ou SLA ne sont pas concluants.

AFFECTIONS CARDIOVASCULAIRES

Des études expérimentales portant aussi bien sur des expositions à court terme que sur des expositions à long terme indiquent – tout en reconnaissant que le choc électrique constitue un risque évident pour la santé – que d'autres effets cardiovasculaires dangereux associés aux champs basses fréquences sont peu probables aux niveaux d'exposition couramment rencontrés dans l'environnement ou en milieu professionnel (OMS [WHO, 2007a]). Bien que diverses altérations cardiovasculaires aient été signalées dans la littérature, les effets sont mineurs pour la plupart, et les résultats correspondants se sont révélés peu cohérents au sein d'une même étude ou entre études différentes (McNamee *et al.*, 2009). Dans leur majorité, les études de morbidité et de mortalité par maladie cardiovasculaire n'ont montré aucune association avec l'exposition (Kheifets *et al.*, 2007). L'existence d'une association spécifique entre exposition et altération du contrôle autonome de la fonction cardiaque appartient encore au domaine de la spéculation. Dans l'ensemble, les données probantes ne suggèrent pas d'association entre exposition aux basses fréquences et maladies cardiovasculaires.

REPRODUCTION ET DÉVELOPPEMENT

Globalement, les études épidémiologiques n'ont pas montré d'association entre des atteintes de la fonction de reproduction humaine et l'exposition maternelle ou paternelle à des champs basses fréquences. Quelques éléments limités témoignent en faveur d'une augmentation du risque de fausse-couche qui serait associée à l'exposition de la mère à un champ magnétique, mais l'association qui est signalée ne se retrouve pas dans d'autres études et, dans leur ensemble, les faits susceptibles d'établir une telle association sont peu probants.

Des expositions à des champs électriques basses fréquences d'une intensité allant jusqu'à 150 kV.m^{-1} ont été évaluées chez différentes espèces de mammifères, et certaines études ont été menées sur des groupes de grande taille avec des expositions couvrant plusieurs générations ; les résultats montrent systématiquement l'absence d'effets défavorables sur le développement (ICNIRP, 2003a ; OMS [WHO, 2007a]).

L'exposition de mammifères à des champs magnétiques basses fréquence n'entraîne pas de malformations macroscopiques externes, viscérales ou squelettiques, pour des champs allant jusqu'à 20 mT (Juutilainen 2003, 2005 ; OMS [WHO, 2007a]). Dans l'ensemble, les éléments susceptibles de démontrer une association entre les basses fréquences et des effets sur la reproduction et le développement sont très fragiles.

CANCER

Les enquêtes épidémiologiques qui ont été réalisées en très grand nombre, en particulier au cours des décennies 1980 et 1990, ont indiqué qu'une exposition à long terme à des champs magnétiques de 50/60 Hz, mais d'ordres de grandeur inférieurs aux limites préconisées par le guide d'exposition de l'ICNIRP en 1998, pourrait être associée au cancer. Les premières enquêtes n'ont examiné que les cancers de l'enfant en relation avec des champs magnétiques, mais les recherches ultérieures ont également analysé les cancers de l'adulte. D'une manière générale, les associations qui avaient été observées initialement entre les champs magnétiques de 50/60 Hz et plusieurs cancers n'ont pas été confirmées. La situation est toutefois différente en ce qui concerne la leucémie de l'enfant. Les recherches qui ont suivi la première enquête ont suggéré la possibilité d'une association faible entre les niveaux d'exposition les plus élevés à des champs magnétiques de 50/60 Hz en zone d'habitation et un risque de leucémie chez l'enfant, même si le lien de causalité n'est pas clairement établi : une combinaison de biais de sélection, de certains facteurs de confusion et du hasard pourrait tout aussi bien expliquer les résultats (OMS [WHO, 2007a]). Deux analyses regroupées (Ahlbom *et al.*, 2000 ; Greenland *et al.*, 2000) indiquent qu'un risque excédentaire peut être observé pour des expositions moyennes dépassant $0,3$ à $0,4 \text{ } \mu\text{T}$, bien que les auteurs de ces analyses mettent fermement en garde contre la tentation d'interpréter leurs résultats comme la démonstration d'un lien de causalité entre champs magnétiques et leucémie de l'enfant.

Parallèlement, aucun mécanisme biophysique n'a été identifié, et les résultats expérimentaux des études cytologiques et sur l'animal en laboratoire n'accréditent pas l'idée que l'exposition à des champs

magnétiques de 50/60 Hz pourrait être une cause de leucémie chez l'enfant.

Il faut remarquer qu'on ne dispose actuellement d'aucun modèle animal adéquat pour simuler la forme de leucémie la plus courante chez l'enfant, à savoir la leucémie aiguë lymphoblastique. La plupart des études menées sur des modèles animaux (rongeurs) ne signalent aucun effet des champs magnétiques de 50/60 Hz sur la leucémie ou le lymphome (ICNIRP, 2003a ; OMS [WHO, 2007a]). Plusieurs grandes études de longue durée sur des rongeurs n'ont pas montré d'augmentation systématique d'un type quelconque de cancer, qu'il s'agisse de tumeurs hématopoïétique, mammaire, cérébrale ou cutanée.

Des études en très grand nombre ont examiné les effets qu'exercent les champs magnétiques de 50/60 Hz sur les tumeurs mammaires induites chimiquement chez le rat (ICNIRP, 2003a ; OMS [WHO, 2007a]). Des résultats contradictoires ont été obtenus, ce qui pourrait être dû, entièrement ou en partie, à des divergences entre protocoles expérimentaux, comme l'utilisation de sous-lignées spécifiques. Pour la plupart, les études qui ont été consacrées aux effets de l'exposition à des champs magnétiques de 50/60 Hz sur des modèles de lymphomes ou de leucémies induits chimiquement ou par irradiation ont donné des résultats négatifs. Les études de lésions hépatiques pré-néoplasiques et de tumeurs cérébrales et cutanées induites chimiquement ont fourni elles aussi des résultats majoritairement négatifs.

D'une manière générale, les études portant sur les effets d'une exposition des cellules à des champs basses fréquences n'ont montré aucune induction de géotoxicité pour des champs ne dépassant pas 50 mT (Crumpton et Collins 2004 ; OMS [WHO, 2007a]). Dans l'ensemble, à la différence des résultats épidémiologiques qui démontrent l'existence d'une association entre la leucémie de l'enfant et l'exposition prolongée à des champs magnétiques aux fréquences de réseau, les données relatives au cancer animal, et en particulier celles qui proviennent des grandes études longitudinales, sont presque toutes négatives. Bien que plus équivoques, les données issues d'études cytologiques viennent généralement à l'appui des études sur l'animal.

JUSTIFICATION DES VALEURS RECOMMANDÉES EN BASSES FRÉQUENCES PAR CE DOCUMENT

L'ICNIRP tient compte des effets aigus et chroniques sur la santé et des progrès récents des techniques d'évaluation pour établir les présentes valeurs limites.

Effets aigus

L'exposition aux CEM basses fréquences exerce un certain nombre d'effets aigus avérés sur le système nerveux : la stimulation directe de tissus nerveux et musculaires, et l'induction de phosphènes rétiens. Des preuves scientifiques indirectes démontrent également que certaines fonctions cérébrales, comme le traitement de l'information visuelle et la coordination motrice, peuvent être affectées de manière transitoire par des champs électriques induits. Tous ces effets sont associés à des seuils au-dessous desquels ils n'apparaissent pas, et il est possible de les prévenir en se conformant aux restrictions de base appropriées pour les champs électriques induits dans le corps humain.

Conformément aux recommandations formulées dans le document pour l'établissement de limites d'exposition aux champs magnétiques statiques (ICNIRP, 2009), l'ICNIRP considère que dans certaines situations professionnelles, moyennant une assistance et une formation adaptées, il est acceptable que les travailleurs éprouvent, de leur plein gré et en connaissance de cause, des effets transitoires tels que des phosphènes rétiens et d'éventuelles variations mineures de certaines fonctions cérébrales, dans la mesure où l'on ne pense pas que de telles manifestations vont avoir des conséquences pathologiques ou des effets à long terme sur la santé. Simultanément, il est souhaitable de limiter l'exposition de toutes les parties du corps afin d'éviter une stimulation des nerfs myélinisés centraux et périphériques. L'ICNIRP prend note de la marge relativement étroite qui sépare les seuils de perception et de douleur par les nerfs périphériques (voir ci-dessus). Pour les deux types de nerfs, les seuils augmentent respectivement, à partir d'une fréquence située entre 1 et 3 kHz environ, car la myélinisation confère aux membranes des constantes de temps très faibles, et au-dessous de 10 Hz environ, en raison de l'accommodation à un stimulus lentement dépolarisant.

Le fait de prévenir l'apparition des phosphènes rétiens devrait assurer une protection contre de possibles effets sur le fonctionnement cérébral. Les seuils d'apparition des phosphènes sont à une valeur minimale pour les fréquences d'environ 20 Hz, et s'élèvent rapidement pour des fréquences supérieures ou inférieures, en rejoignant les seuils de stimulation des nerfs centraux et périphériques, à partir desquels il convient d'appliquer les limites correspondant à la stimulation des nerfs périphériques. Pour les travailleurs qui n'ont pas reçu de formation, et qui sont susceptibles de ne pas connaître et de ne pas maîtriser leur situation d'exposition, la restriction de base est fixée au seuil d'apparition des phosphènes, ce qui permet d'éviter ces effets transitoires mais potentiellement perturbants de l'exposition. Pour la population générale, un facteur de réduction de 5 est appliqué au seuil d'apparition des phosphènes.

L'exposition à des champs électriques basses fréquences provoque des réactions biologiques bien identifiées, par l'intermédiaire des charges électriques superficielles. La prévention des effets douloureux liés à une telle exposition est assurée par le respect des niveaux de référence.

Effets chroniques

La littérature consacrée aux effets chroniques des champs basses fréquences a été évaluée en détail par des scientifiques indépendants et des groupes d'experts. En 2002, l'institut de recherche sur le cancer de l'OMS, le CIRC [IARC] (Centre international de recherche sur le cancer [International Agency for Research on Cancer]), a étudié les champs magnétiques basses fréquences et les a classés en catégorie 2 B, ce qui correspond à la qualification de « cancérigène possible pour l'homme ». Cette classification était fondée sur les résultats épidémiologiques relatifs à la leucémie de l'enfant.

L'ICNIRP considère que les données scientifiques actuellement disponibles pour affirmer que l'exposition prolongée à des champs magnétiques basses fréquences présente un lien de causalité avec un risque accru de leucémie chez l'enfant ne sont pas assez solides pour servir de base à une limitation de l'exposition. En particulier si la causalité n'est pas établie, une réduction de l'exposition ne produira aucun bénéfice pour la santé.

Evaluation

Historiquement, la modélisation du champ magnétique s'est fondée sur l'hypothèse d'une conductivité homogène et isotrope du corps, et s'est d'abord servie de modèles simples à boucle conductrice circulaire pour estimer les courants induits dans différents organes et régions du corps. Les champs électriques induits par les champs électriques et magnétiques variables dans le temps étaient alors calculés à l'aide de simples modèles ellipsoïdaux homogènes du corps humain. Ces dernières années, des méthodes de calcul plus réalistes, fondées sur des modèles hétérogènes affinés sur les plans électrique et anatomique (Xi et Stuchly, 1994 ; Dimbylow, 2005, 2006 ; Bahr *et al.*, 2007) ont permis une bien meilleure connaissance des champs électriques internes générés dans le corps sous l'effet d'une exposition à des champs électriques ou magnétiques.

Les résultats les plus utiles à l'objet du présent document ont été obtenus par calcul du champ électrique induit, au moyen de traitements à haute résolution exploitant des voxels de taille inférieure à 4 mm (Dimbylow, 2005 ; Bahr *et al.*, 2007 ; Hirata *et al.*, 2009 ; Nagaoka *et al.*, 2004). Le champ électrique maximal est induit dans le corps lorsque les champs externes sont homogènes et de direction parallèle à l'axe longitudinal du corps (champ E) ou perpendiculaire à ce même axe (champ H). D'après ces calculs, le champ électrique de crête local qui est induit dans le cerveau par un champ magnétique de 50 Hz présente une intensité maximale d'environ 23 à 33 mV.m⁻¹.par mT, suivant l'orientation du champ et le modèle de représentation du corps. Aucun coefficient de conversion n'est encore disponible pour les tissus nerveux périphériques. La peau, qui comporte des terminaisons nerveuses périphériques, a donc été choisie comme tissu cible dans le cas le plus défavorable. L'intensité du champ électrique induit dans la peau par un tel champ est d'environ 20 à 60 mV.m⁻¹ par mT. L'intensité maximale du champ électrique local induit dans le cerveau par un champ électrique de 50 Hz est d'environ 1,7 à 2,6 mV.m⁻¹ par kV.m⁻¹, alors qu'elle est d'environ 12 à 33 mV.m⁻¹ par kV.m⁻¹ dans la peau.

Compte tenu des incertitudes qui pèsent tant sur les techniques d'évaluation disponibles à ce jour que sur l'influence

des paramètres corporels quant à la définition des niveaux de référence, l'ICNIRP a fait le choix de la prudence et calcule les niveaux de référence à partir des restrictions de base.

LIGNES DIRECTRICES POUR L'ÉTABLISSEMENT DE LIMITES D'EXPOSITION AUX CEM

Des valeurs limites distinctes sont fournies pour l'exposition professionnelle et pour l'exposition de la population générale. Dans le présent document, l'exposition professionnelle concerne des individus adultes qui sont exposés, sur leur lieu de travail, à des champs magnétiques et électriques variables dans le temps et d'une fréquence de 1 Hz à 10 MHz, généralement dans des conditions connues, et en accomplissant leurs tâches habituelles ou des activités qui leur sont assignées dans le cadre de leur emploi. À l'opposé, la population générale fait référence à des individus de tous âges et de tous états de santé, ce qui peut accroître la variabilité des susceptibilités individuelles. La plupart du temps, les individus constituant la population générale ne se rendent pas compte qu'ils sont exposés à des CEM. Telles sont les considérations qui sous-tendent l'adoption de valeurs limites d'exposition plus sévères pour la population générale que pour les travailleurs exposés professionnellement.

PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE SCIENTIFIQUE

Toutes les données scientifiques et leur interprétation sont affectées d'un certain degré d'incertitude. Les variantes méthodologiques, et les variabilités individuelles, entre espèces et entre souches d'une même espèce peuvent être citées à titre d'exemples. Des facteurs de réduction permettent de compenser de telles incertitudes dans les connaissances.

Toutes les sources d'incertitude ne sont cependant pas assez documentées pour permettre d'établir rigoureusement des facteurs de réduction sur toute la gamme de fréquences et pour tous les modèles de modulation. Par conséquent,

le degré de précaution qui est appliqué à l'interprétation des données disponibles et à la définition des facteurs de réduction relève, dans une large mesure, de l'appréciation des experts.

RESTRICTIONS DE BASE ET NIVEAUX DE RÉFÉRENCE

Les limitations d'exposition qui sont fondées sur la ou les grandeur(s) physique(s) en relation directe avec les effets avérés sur la santé sont appelées « restrictions de base ». Dans le présent document, la grandeur physique qui sert à spécifier les restrictions de base pour l'exposition aux CEM est l'intensité du champ électrique interne E_i , puisque c'est ce champ électrique qui affecte les cellules nerveuses et d'autres cellules sensibles à l'électricité.

Il est difficile d'évaluer l'intensité du champ électrique interne. Des niveaux d'exposition de référence sont donc fournis à des fins d'évaluation pratique de l'exposition. Pour la plupart, les niveaux de référence sont déduits des restrictions de base correspondantes au moyen de techniques de mesure et/ou de calcul numérique, mais certains d'entre eux sont en rapport avec la perception (cas d'un champ électrique) et les effets nocifs indirects de l'exposition aux CEM. Les grandeurs appropriées sont l'intensité du champ électrique externe (E), l'intensité de champ magnétique externe (H), la densité de flux magnétique externe (B) et les courants traversant les membres (I_L). La grandeur relative aux effets indirects est le courant de contact (I_C). Quelles que soient les conditions d'exposition, les valeurs mesurées ou calculées de l'une quelconque de ces grandeurs peuvent être comparées aux niveaux de référence appropriés. Le respect du niveau de référence garantit le respect de la restriction de base correspondante. Si la valeur mesurée ou calculée dépasse le niveau de référence, il ne s'ensuit pas nécessairement que la restriction de base soit dépassée. Toutefois, tout dépassement du niveau de référence impose de vérifier le respect de la restriction de base correspondante et de déterminer si des mesures de protection complémentaires sont nécessaires.

RESTRICTIONS DE BASE

Cette publication a pour principal objectif l'établissement de lignes directrices destinées à limiter l'exposition aux CEM à des niveaux qui permettent d'assurer la protection des personnes contre les effets nocifs de ces champs. Comme indiqué précédemment, les risques proviennent des réactions transitoires du système nerveux, incluant la stimulation du système nerveux périphérique (SNP) et du système nerveux central (SNC), l'induction de phosphènes rétinien et d'éventuels effets sur certains aspects du fonctionnement cérébral.

Compte tenu des considérations ci-dessus sur les fréquences situées dans la gamme de 10 Hz à 25 Hz, il convient que l'exposition professionnelle n'induisse pas de champs électriques d'intensité supérieure à 50 $mV.m^{-1}$ dans les tissus de la tête qui appartiennent au SNC (à savoir le cerveau et la rétine) afin d'éviter l'induction de phosphènes rétinien. Ces restrictions doivent également permettre de prévenir tout effet transitoire éventuel sur le fonctionnement cérébral. Ces effets ne sont pas considérés comme nocifs, et si l'ICNIPR admet qu'ils peuvent se révéler perturbants dans certaines situations professionnelles et devraient être évités, aucun facteur de réduction supplémentaire n'est appliqué. Les seuils d'apparition des phosphènes s'élèvent rapidement aux fréquences plus élevées ou plus basses, et rejoignent à 400 Hz les seuils de stimulation des nerfs myélinisés centraux et périphériques. Aux fréquences supérieures à 400 Hz, les valeurs limites correspondant à la stimulation des nerfs périphériques s'appliquent à toutes les parties du corps.

Dans les environnements contrôlés où les travailleurs sont informés des effets transitoires possibles d'une telle exposition, il convient que l'exposition professionnelle n'induisse pas de champs électriques d'intensité supérieure à 800 $mV.m^{-1}$ dans la tête et le corps, afin d'éviter une stimulation des nerfs myélinisés centraux et périphériques. Pour tenir compte des incertitudes précédemment décrites, un facteur de réduction de 5 a été appliqué au seuil de stimulation, qui est égal à 4 $V.m^{-1}$. Ces restrictions sont moins sévères au-dessus de 3 kHz.

Pour la population générale, un facteur de réduction de 5 est appliqué aux tissus de la tête appartenant au SNC, ce qui conduit à une restriction de base égale

à 10 mV.m^{-1} pour les fréquences comprises entre 10 et 25 Hz. Pour les fréquences situées au-dessus et au-dessous de ces valeurs, les restrictions de base sont moins sévères. A 1000 Hz, elles rejoignent les restrictions de base qui protègent contre la stimulation des nerfs myélinisés centraux et périphériques. Dans ce cas, le facteur de réduction est égal à 10 et donne une restriction de base de 400 mV.m^{-1} , qu'il convient d'appliquer aux tissus de toutes les parties du corps.

Les restrictions de base sont présentées au [tableau 2](#) et illustrées à la [figure 1](#).

MOYENNE TEMPORELLE

L'ICNIRP recommande que les restrictions relatives aux champs électriques internes induits par des champs électriques ou magnétiques, y compris des champs de crête transitoires ou de très courte durée, soient considérées comme des valeurs instantanées pour lesquelles il n'est pas pertinent de calculer une moyenne temporelle de l'exposition (voir aussi la section concernant l'exposition non sinusoïdale).

MOYENNE SPATIALE D'UN CHAMP ÉLECTRIQUE INDUIT

Pour limiter les effets défavorables des champs électriques induits sur les réseaux nerveux et les neurones, il est important de définir sur quelle distance ou quel volume le champ électrique induit local doit être moyenné. Pour répondre à l'impératif d'un fondement biologique solide et aux contraintes de calcul, l'ICNIRP recommande d'adopter un compromis pratique, qui consiste à déterminer le champ électrique induit sous forme de moyenne vectorielle du champ électrique dans un petit volume de tissu d'un seul tenant de $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$. Pour un tissu spécifique, la valeur du champ électrique au 99^e percentile est celle qu'il convient de comparer avec la restriction de base.

Fondamentalement, les effets d'un champ électrique sur les neurones et d'autres cellules électriquement excitables sont des effets locaux, mais certaines contraintes liées aux techniques d'évaluation, tant électrophysiologiques que pratiques, imposent une valeur minimale en volume ou en distance. Le principal facteur physique qui perturbe le fonctionnement des neurones et des réseaux neuro-naux est la tension produite par le champ

TABLEAU II

Grandeurs et unités SI correspondantes utilisées dans le présent guide

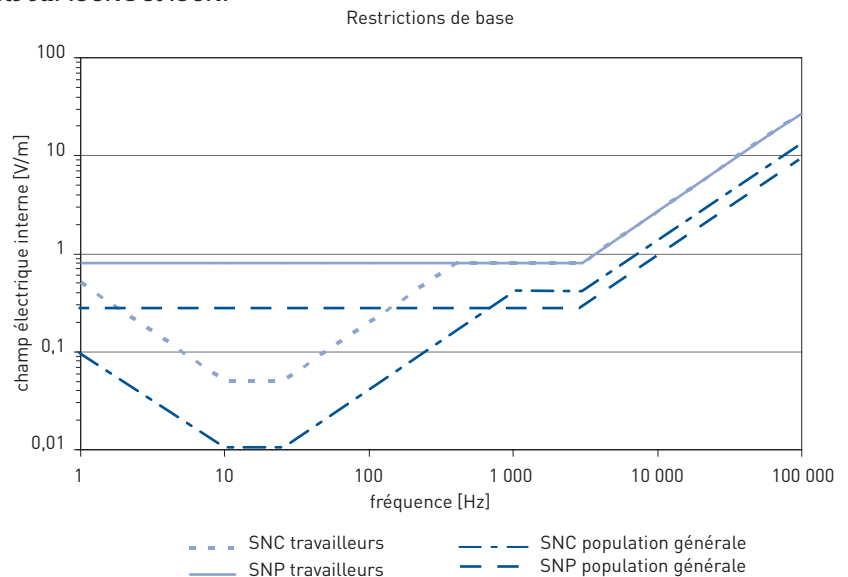
| Caractéristiques de l'exposition | Domaine de fréquences | Champ électrique interne V.m^{-1} |
|---|-----------------------|--|
| Travailleurs | | |
| Tissus de la tête appartenant au SNC | 1 - 10 Hz | $0,5 / f$ |
| | 10 Hz - 25 Hz | 0,05 |
| | 25 Hz - 400 Hz | $2 \times 10^{-3} f$ |
| | 400 Hz - 3 kHz | 0,8 |
| | 3 kHz - 10 MHz | $2,7 \times 10^{-4} f$ |
| Tous les tissus autres de la tête et du corps | 1 Hz - 3 kHz | 0,8 |
| | 3 kHz - 10 MHz | $2,7 \times 10^{-4} f$ |
| Population générale | | |
| Tissus de la tête appartenant au SNC | 1 - 10 Hz | $0,1 / f$ |
| | 10 Hz - 25 Hz | 0,01 |
| | 25 Hz - 1000 Hz | $4 \times 10^{-4} f$ |
| | 1000 Hz - 3 kHz | 0,4 |
| | 3 kHz - 10 MHz | $1,35 \times 10^{-4} f$ |
| Tous les tissus autres de la tête et du corps | 1 Hz - 3 kHz | 0,4 |
| | 3 kHz - 10 MHz | $1,35 \times 10^{-4} f$ |

Notes :

- f est la fréquence, en Hz
- toutes les valeurs sont des moyennes quadratiques (rms).
- dans la gamme des fréquences dépassant 100 kHz, il faut en plus tenir compte des restrictions de base spécifiques aux radiofréquences (« RF »).

FIGURE 1

Restrictions de base pour l'exposition de la population générale et l'exposition professionnelle, exprimées en intensité de champ électrique interne exerçant des effets sur le SNC et le SNP



électrique induit à travers la membrane de la cellule. Pour des fibres nerveuses isolées alignées suivant la direction du champ électrique (couplage maximum), cette tension est obtenue en intégrant le champ électrique sur la distance électrotonique, qui varie de 2 à 7 millimètres pour les nerfs non vertébraux (Reilly 1998 ; Reilly et Diamant 2003). Pour les cellules des

nerfs myélinisés, une bonne évaluation de la distance d'intégration est d'environ 2 mm, ce qui correspond à la distance internodale maximale séparant les nœuds de Ranvier. Ces distances sont applicables aux seuils de stimulation correspondant à des cellules nerveuses isolées. Dans le cas des effets des champs électriques faibles à des niveaux inférieurs au seuil de

stimulation de cellules isolées, comme les phosphènes rétinien, il faut tenir compte de l'effet de « réseau » qu'exercent collectivement de multiples cellules nerveuses en interaction. Le seuil de l'effet est alors beaucoup plus bas que le seuil de stimulation des cellules nerveuses isolées, car il y a sommation et intégration des petites tensions induites dans les synapses. Il a été suggéré de faire une moyenne du champ électrique induit sur le volume occupé par un nombre minimal de 1 000 cellules en interaction, ce qui représente environ 1 mm³ dans la plupart des tissus nerveux (Jefferys 1994). Une distance raisonnable d'un point de vue biologique sur laquelle cette moyenne pourrait être calculée serait de l'ordre de 1 à 7 mm. En pratique, il est difficile d'obtenir une précision satisfaisante en calculant le champ électrique induit avec une résolution millimétrique, et il est encore plus difficile de mesurer un tel champ. Les valeurs maximales obtenues dans un seul voxel de tissu spécifique sont souvent entachées d'erreurs importantes dues à des discontinuités aux sommets de chaque voxel cubique. Une solution permettant d'obtenir une approximation plus stable de la valeur de crête consiste à choisir la valeur correspondant au 99^e percentile du champ induit dans un tissu spécifique. D'un point de vue biologique, ce choix est cependant quelque peu arbitraire, puisque la valeur de crête dépend de la résolution. Une autre solution de calcul de la moyenne spatiale consiste à définir le champ électrique local comme une moyenne dans un petit volume ou sur un segment de droite (Reilly et Diamant 2003).

En règle générale, il convient d'effectuer le calcul de la moyenne sur un volume qui reste dans les limites du tissu concerné, excepté pour les tissus tels que la rétine et la peau qui sont trop minces pour être compris dans une forme cubique. Pour la peau, le volume de 2 x 2 x 2 mm³ déjà cité est admissible pour le calcul de la moyenne, et il peut se prolonger dans le tissu sous-cutané. En ce qui concerne la rétine, il est possible d'étendre le volume de calcul de la moyenne aux tissus qui sont situés devant et derrière elle.

NIVEAUX DE RÉFÉRENCE

Les niveaux de référence sont obtenus à partir des restrictions de base, par modélisation mathématique à l'aide de données

TABLEAU III

Niveaux de référence pour l'exposition professionnelle à des champs électriques et magnétiques variables dans le temps (valeurs rms en conditions non perturbées)

| Domaine de fréquences | Intensité de champ électrique E (kV.m ⁻¹) | Intensité de champ magnétique H (A.m ⁻¹) | Densité de flux magnétique B (T) |
|-----------------------|---|--|----------------------------------|
| 1 Hz – 8 Hz | 20 | 1,63 x 10 ⁵ / f ² | 0,2 / f ² |
| 8 Hz – 25 Hz | 20 | 2 x 10 ⁴ / f | 2,5 x 10 ⁻² / f |
| 25 Hz – 300 Hz | 5 x 10 ² / f | 8 x 10 ² | 1 x 10 ⁻³ |
| 300 Hz – 3 kHz | 5 x 10 ² / f | 2,4 x 10 ⁵ / f | 0,3 / f |
| 3 kHz – 10 MHz | 1,7 x 10 ⁻¹ | 80 | 1 x 10 ⁻⁴ |

Notes :

- f est la fréquence, en Hz,
- pour des recommandations en régime non sinusoïdal et à des fréquences multiples, voir les sections spécifiques ci-après,
- pour prévenir les effets indirects, en particulier dans les champs électriques de forte intensité, voir le chapitre intitulé « Mesures de prévention »,
- dans la gamme des fréquences dépassant 100 kHz, il faut en plus tenir compte des niveaux de référence spécifiques aux radiofréquences (« RF »).

TABLEAU IV

Niveaux de référence pour l'exposition de la population générale à des champs électriques et magnétiques variables dans le temps (valeurs rms en conditions non perturbées)

| Domaine de fréquences | Intensité de champ électrique E (kV.m ⁻¹) | Intensité de champ magnétique H (A.m ⁻¹) | Densité de flux magnétique B (T) |
|-----------------------|---|--|---------------------------------------|
| 1 Hz – 8 Hz | 5 | 3,2 x 10 ⁴ / f ² | 4 x 10 ⁻² / f ² |
| 8 Hz – 25 Hz | 5 | 4 x 10 ³ / f | 5 x 10 ⁻³ / f |
| 25 Hz – 50 Hz | 5 | 1,6 x 10 ² | 2 x 10 ⁻⁴ |
| 50 Hz – 400 Hz | 2,5 x 10 ² / f | 1,6 x 10 ² | 2 x 10 ⁻⁴ |
| 400 Hz – 3 kHz | 2,5 x 10 ² / f | 6,4 x 10 ⁴ / f | 8 x 10 ⁻² / f |
| 3 kHz – 10 MHz | 8,3 x 10 ⁻² | 21 | 2,7 x 10 ⁻⁵ |

Notes :

- f est la fréquence, en Hz,
- pour des recommandations en régime non sinusoïdal et à des fréquences multiples, voir les sections spécifiques ci-après,
- dans la gamme des fréquences dépassant 100 kHz, il faut en plus tenir compte des niveaux de référence spécifiques aux radiofréquences (« RF »).
- dans la gamme des fréquences dépassant 100 kHz, il faut en plus tenir compte des niveaux de référence spécifiques aux radiofréquences (« RF »).

publiées (Dimbylow 2005, 2006). Ces niveaux sont calculés pour les conditions de couplage maximal du champ à la personne exposée, assurant ainsi une protection maximale. La variabilité en fonction de la fréquence et les incertitudes des techniques d'évaluation ont été prises en compte. Les niveaux de référence indiqués tiennent compte de deux effets distincts, et sont l'approximation d'une combinaison entre les champs électriques induits dans le cerveau – qui correspondent aux effets sur le SNC – et les champs électriques induits dans les tissus n'appartenant pas au SNC, en tout autre point du corps – qui correspondent aux effets sur le SNP (en d'autres termes, à 50 Hz, le facteur servant à convertir la restriction de base correspondant aux effets sur le SNC en un niveau d'exposition à un champ magnétique externe est de 33 mV.m⁻¹ par mT, et pour les effets sur le SNP, ce facteur de

conversion est de 60 mV.m⁻¹ par mT. Un facteur de réduction supplémentaire égal à 3 a été appliqué à ces valeurs calculées pour tenir compte de l'incertitude des techniques d'évaluation).

Dans le domaine de fréquences allant jusqu'à 25 Hz, le niveau de référence du champ électrique en cas d'exposition professionnelle comporte en outre une marge suffisante pour prévenir les effets de stimulation provoqués par les courants de contact dans la plupart des conditions réelles. Entre 25 Hz et 10 MHz, les niveaux de référence ne sont établis que d'après la restriction de base relative aux champs électriques induits, et ils peuvent donc ne pas donner une marge suffisante pour prévenir les effets de stimulation qui sont provoqués par les courants de contact dans toutes les conditions envisageables sur cette bande de fréquences.

FIGURE 2

Niveaux de référence pour l'exposition à des champs magnétiques variables dans le temps (cf. tableaux 3 et 4).

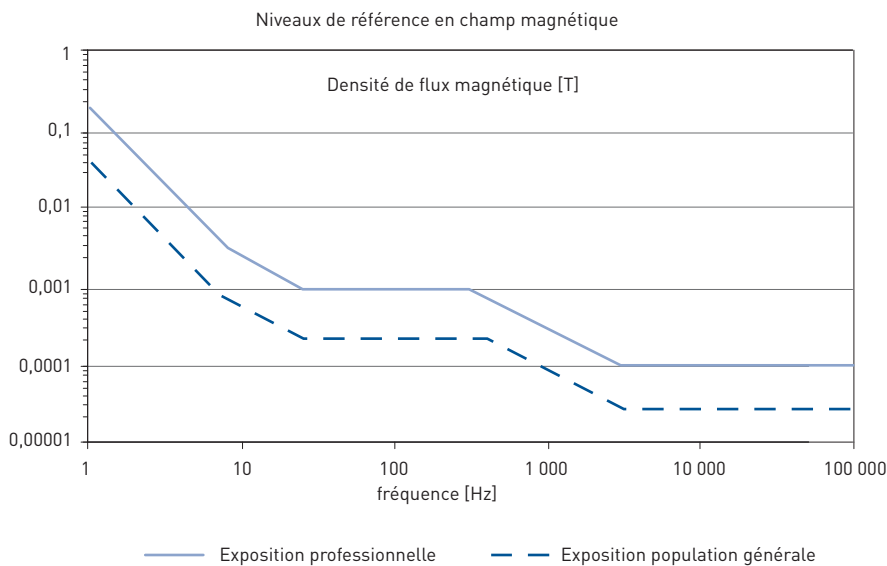
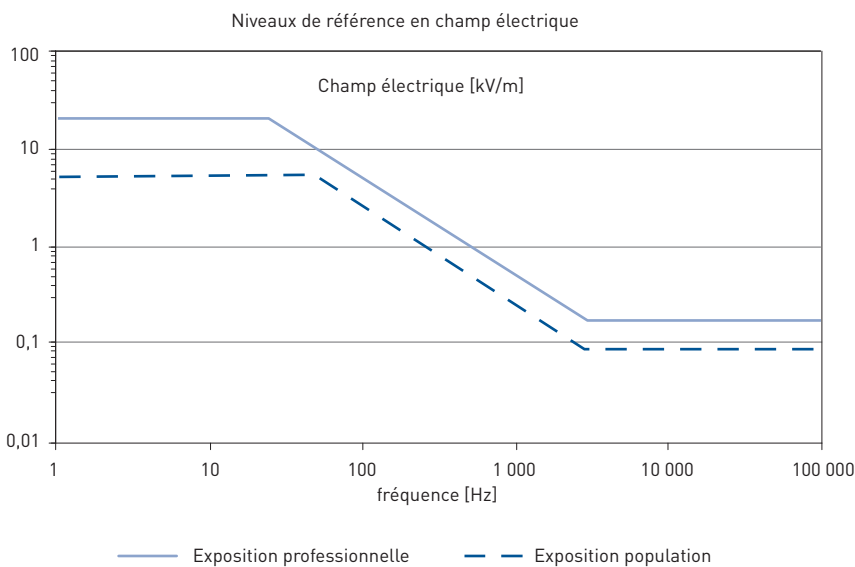


FIGURE 3

Niveaux de référence pour l'exposition à des champs magnétiques variables dans le temps (cf. tableaux 3 et 4).



Jusqu'à 10 MHz, les niveaux de référence de champ électrique en cas d'exposition de la population générale préviennent les effets nocifs indirects (chocs et brûlures) pour plus de 90 % des individus exposés. Dans la gamme de fréquences allant jusqu'à 50 Hz, les niveaux de référence de champ électrique pour l'exposition de la population générale comportent en outre une marge suffisante pour prévenir des effets de charge électrique superficielle (notamment, perception de ces charges) chez la plupart des individus.

Les *Tableaux III* et *IV* récapitulent les niveaux de référence pour l'exposition professionnelle et l'exposition de la population générale, respectivement, et ces niveaux de référence sont illustrés par les *Figures 2* et *3*. Les niveaux de référence sont fondés sur l'hypothèse que l'exposition est produite par un champ uniforme (homogène) dans l'espace occupé par le corps humain.

MOYENNE SPATIALE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES EXTERNES

Les niveaux de référence ont été déterminés dans des conditions d'exposition correspondant à une variation relativement faible du champ électrique ou magnétique dans l'espace occupé par le corps. Dans la plupart des cas cependant, la source du champ est tellement proche que le champ n'est pas distribué de façon uniforme ou reste localisé dans une petite partie du corps. La mesure de l'intensité de champ maximale dans la partie de l'espace qui est occupée par le corps donne alors une évaluation toujours sûre, quoique très protectrice, de l'exposition.

Dans le cas d'une source très localisée située à quelques centimètres du corps, la seule solution réaliste pour évaluer l'exposition consiste à déterminer au cas par cas le champ électrique induit, par une technique d'évaluation appropriée. Si la distance dépasse 20 cm, la distribution du champ devient moins localisée, mais reste non uniforme, et il est alors possible de calculer une moyenne spatiale sur le corps ou une partie du corps (Stuchly et Dawson 2002 ; Jokela 2007). En principe, la moyenne spatiale ne doit pas dépasser le niveau de référence. L'exposition locale peut quant à elle dépasser le niveau de référence, sous la réserve expresse de ne pas dépasser la restriction de base. Il revient aux organismes de normalisation d'émettre des recommandations complémentaires pour les conditions d'exposition spécifiques pour lesquelles l'application d'une moyenne spatiale est possible. Ces recommandations devront s'appuyer sur des données validées. Les organismes de normalisation sont eux-mêmes en mesure d'établir des niveaux de référence qui leur sont propres, applicables à des types particuliers d'exposition non uniforme.

ADDITIVITÉ DE L'EXPOSITION À DES CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES

Les champs électriques et magnétiques externes induisent chacun une composante de champ électrique qui s'ajoute aux autres par sommation vectorielle dans le tissu concerné. Pour analyser l'exposition à partir des champs électriques et magnétiques externes, une approche protectrice consisterait à supposer que les composantes des champs induits à la fois électriquement et magnétiquement atteignent une valeur maximale au même point

critique et de plus en phase. Cela signifie que les expositions aux champs électriques et magnétiques externes sont additives (Cech *et al.*, 2008). On estime cependant que de telles situations se rencontrent exceptionnellement, si l'on tient compte du fait que les champs électriques induits électriquement et magnétiquement présentent des distributions très différentes.

NIVEAUX DE RÉFÉRENCE POUR LES COURANTS DE CONTACT

Jusqu'à 10 MHz, les niveaux de référence qui sont fournis pour les courants de contact imposent de prendre certaines précautions afin de prévenir les risques de choc électrique et de brûlure. Les niveaux de référence en cas de contact ponctuel sont présentés au [Tableau V](#). Étant donné que les valeurs seuils des courants de contact qui provoquent des réactions biologiques chez l'enfant représentent à peu près la moitié des niveaux correspondants chez l'homme adulte, les niveaux de référence des courants de contact qui ont été fixés pour la population générale sont inférieurs d'un facteur 2 aux valeurs fixées pour l'exposition professionnelle. Il convient de rappeler que les niveaux de référence n'ont pas pour objet d'empêcher la perception, mais permettent seulement d'éviter les chocs électriques douloureux. La perception d'un courant de contact n'est pas dangereuse en soi, mais peut-être considérée comme une gêne. Des mesures techniques permettent de prévenir les courants de contact excessifs.

EXPOSITION SIMULTANÉE À DES CHAMPS DE FRÉQUENCES DIFFÉRENTES

Il est important de déterminer si, en cas d'exposition simultanée à des champs de fréquences différentes, les effets de l'exposition sont ou non additifs. Les formules ci-dessous s'appliquent aux fréquences rencontrées en conditions d'exposition réelles. Pour la stimulation électrique, c'est-à-dire aux fréquences allant jusqu'à 10 MHz, il est recommandé de sommer

TABLEAU V

Grandeurs et unités SI correspondantes utilisées dans le présent guide

| Caractéristiques de l'exposition | Domaine de fréquences | Courant de contact maximal (mA) |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Exposition professionnelle | jusqu'à 2,5 kHz | 1,0 |
| | 2,5 kHz – 100 kHz | 0,4f |
| | 100 kHz – 10 MHz | 40 |
| Exposition de la population générale | jusqu'à 2,5 kHz | 0,5 |
| | 2,5 kHz – 100 kHz | 0,2f |
| | 100 kHz – 10 MHz | 20 |

f est la fréquence, en kHz.

les intensités de champ électrique interne suivant la formule :

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_{i,j}}{E_{L,j}} \leq 1 \quad (3)$$

avec :

$E_{i,j}$: intensité de champ électrique interne induit à la fréquence j,

$E_{L,j}$: restriction de base pour l'intensité de champ électrique induit à la fréquence j, telle qu'elle figure dans le [Tableau II](#).

En pratique, l'application des critères suivants relatifs aux niveaux de référence garantit le respect des restrictions de base :

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_j}{E_{R,j}} \leq 1 \quad (4)$$

et

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{H_j}{H_{R,j}} \leq 1 \quad (5)$$

avec :

E_j : intensité de champ électrique à la fréquence j,

$E_{R,j}$: niveau de référence pour l'intensité de champ électrique à la fréquence j, tel qu'indiqué aux [Tableaux III et IV](#),

H_j : intensité de champ magnétique à la fréquence j,

$H_{R,j}$: niveau de référence pour l'intensité de champ magnétique à la fréquence j, tel qu'indiqué aux [Tableaux III et IV](#).

Pour le courant parcourant un membre et le courant de contact, respectivement, il convient de répondre aux exigences suivantes :

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_j}{E_{R,j}} \leq 1 \text{ ou } \sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{I_j}{I_{C,j}} \leq 1 \quad (6)$$

avec :

I_j : composante du courant de contact

à la fréquence j,

$I_{L,j}$: niveau de référence du courant dans les membres à la fréquence j

$I_{C,j}$: niveau de référence du courant de contact à la fréquence j, tel qu'indiqué au [Tableau V](#).

EXPOSITION NON SINUSOÏDALE

Aux basses fréquences inférieures à 100 kHz, les champs électriques et surtout magnétiques sont le plus souvent déformés par des composantes harmoniques qui sont réparties dans une large bande de fréquences. Les formes d'onde de ces champs présentent alors des structures complexes, souvent pulsées. Il est toujours possible de décomposer un tel champ en composantes spectrales discrètes en utilisant par exemple des techniques de transformation de Fourier (FT) et en appliquant la règle précédemment décrite pour les champs de fréquences différentes. Ce mode opératoire repose sur l'hypothèse que les phases des composantes spectrales s'additionnent en phase, c'est-à-dire que tous les maxima se produisent au même instant en donnant lieu à un pic étroit. Cette hypothèse est réaliste si les composantes spectrales sont en nombre limité et si leurs phases ne sont pas cohérentes, en d'autres termes si elles varient de manière aléatoire. Dans le cas de phases cohérentes constantes, l'hypothèse peut se révéler inutilement protectrice. En outre, l'échantillonnage et la fenêtre d'analyse spectrale par transformation de Fourier sont susceptibles de créer des fréquences parasites, ce qui peut majorer artificiellement le rapport d'exposition calculé par sommation linéaire.

Une autre solution consiste à pondérer les champs électriques et magnétiques externes, le champ électrique induit et le courant induit, à l'aide d'une fonction filtre qui est en relation avec la restriction de base ou le niveau de référence (ICNIRP, 2003b ; Jokela, 2000). Dans le cas d'un champ large bande à composantes harmoniques, la restriction de base imposée par le filtrage peut être représentée sous forme mathématique par la relation :

$$\left| \sum_i \frac{A_i}{E_{L_i}} \cos(2\pi f_i t + \theta_i + \varphi_i) \right| \leq 1 \quad (7)$$

dans laquelle t représente le temps, E_{L_i} désigne la valeur limite d'exposition à la i ème fréquence harmonique f_i , et A_i , θ_i , φ_i , représentent respectivement les amplitudes du champ, les angles de phase du champ et les angles de phase du filtre aux fréquences harmoniques. Si l'on excepte les angles de phase, cette relation est comparable aux formules de sommation (3), (4) et (5). Des indications complémentaires sur l'application pratique de la pondération (détermination de l'exposition crête pondérée) figurent en annexe informative.

MESURES DE PRÉVENTION

L'ICNIRP souligne qu'il est possible d'assurer la protection des personnes exposées à des champs électriques et magnétiques si toutes les mesures énumérées dans ce document sont respectées.

La protection des travailleurs comporte des mesures de prévention d'ordre technique et organisationnel, ainsi que des programmes de protection individuelle. Il faut mettre en œuvre des mesures de protection adéquates lorsque l'exposition sur le lieu de travail a pour effet un dépassement des restrictions de base. En premier lieu, il convient, autant que faire se peut, de prendre des mesures de prévention technique, afin de réduire à des niveaux acceptables les champs émis par les équipements. Ces mesures comprennent notamment une conception satisfaisante du point de vue de la sécurité et, si nécessaire, l'utilisation de dispositifs d'interverrouillage ou de mécanismes similaires destinés à la protection de l'opérateur.

Il est recommandé que des mesures d'ordre organisationnel, comme des res-

trictions d'accès et l'utilisation de signalisations auditives et visuelles, soient mises en œuvre en parallèle avec les mesures d'ordre technique. Si des mesures de protection individuelle, telles que des vêtements de protection, peuvent être utiles dans certaines conditions, elles ne sauraient constituer qu'un dernier recours pour assurer la protection des travailleurs ; il convient, autant que faire se peut, de donner la priorité aux mesures de prévention d'ordre technique et organisationnel. En outre, lorsque des équipements de protection individuelle tels que des gants isolants sont utilisés pour se protéger des chocs électriques, les restrictions de base ne doivent pas être dépassées, l'isolation assurée par ces équipements ne protégeant que contre les effets indirects des champs.

Exception faite des vêtements de protection et autres équipements de protection individuelle, on peut appliquer les mêmes mesures à la population générale, lorsqu'il existe un risque que les niveaux de référence déterminés pour cette population soient dépassés.

Il est également indispensable d'établir et de mettre en application des règles permettant de prévenir :

- les interférences avec des dispositifs ou équipements électroniques médicaux (en particulier, les stimulateurs cardiaques),

- la détonation de dispositifs électriques de mise à feu (détonateurs),

- les incendies et explosions résultant de l'inflammation de matières inflammables par des étincelles produites par un champ induit, un courant de contact ou une décharge disruptive.

CONSIDÉRATIONS RELATIVES À D'ÉVENTUELS EFFETS A LONG TERME

Comme indiqué, les études épidémiologiques ont régulièrement observé que l'exposition quotidienne chronique à un champ magnétique de faible intensité (plus de 0,3 à 0,4 μ T) à la fréquence du réseau est associée à un risque accru de leucémie chez l'enfant. Le CIRC [IARC] a classé ce type de champ comme cancérigène possible. Cependant, la relation causale entre champs magnétiques et leucémie infantile n'a pas été établie et aucun

autre effet à long terme n'a été confirmé. L'absence de causalité avérée signifie qu'il n'est pas possible de tenir compte de cet effet dans les restrictions de base. Des recommandations relatives à la gestion des risques, assorties de considérations sur les mesures de précaution, ont toutefois été émises par l'OMS [WHO] (WHO, 2007a, WHO, 2007b) et d'autres entités.

@*nnexe* : retrouvez l'annexe dans la version électronique (PDF) de cet article sur notre site www.hst.fr

Remerciements – La Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) tient à remercier l'Association internationale de radioprotection, l'Organisation mondiale de la santé, le Bureau international du travail, la Commission européenne, ainsi que le Ministère fédéral allemand de l'environnement, de la protection de la nature et de la sécurité nucléaire, pour le soutien qu'ils lui ont apporté. L'ICNIRP tient également à remercier ses propres experts-conseils et l'ensemble des autres relecteurs pour leurs contributions dans le cadre de la consultation ouverte en ligne.

Pendant la préparation de ce document, la composition de la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) et celle du groupe de travail de l'ICNIRP sur les champs à extrêmement basses fréquences (ELF) ont été les suivantes :

ICNIRP : P. Vecchia, Président (Italie), M. Hietanen, Vice-président jusqu'en 2008 (Finlande), R. Matthes, Vice-président depuis 2008 (Allemagne), A. Ahlbom jusqu'en 2008 (Suède), E. Breitbart jusqu'en 2008 (Allemagne), F. R. De Gruijl jusqu'en 2008 (Pays-bas), M. Feychting (Suède), A. Green (Australie), K. Jokela (Finlande), J. Lin (États-Unis), R. Saunders (Royaume-Uni), K. Schulmeister (Autriche), P. Söderberg (Suède), B. Stuck (États-Unis), A. Swerdlow (Royaume-Uni), M. Taki jusqu'en 2008 (Japon), B. Veyret (France), G. Ziegelberger, Secrétaire scientifique (Autriche), M.H. Repacholi, Président d'honneur (Suisse)

Groupe de travail de l'ICNIRP sur les champs extrêmement basses fréquences (ELF) :

R. Matthes (Allemagne), Président, A. Ahlbom (Suède), K. Jokela (Finlande), C. Roy (Australie), R. Saunders (Royaume-Uni)

BIBLIOGRAPHIE

- AHLBOM A, DAY N, FEYCHTING M, ROMAN E, SKINNER J, DOCKERTY J, LINET M, MCBRIDE M, MICHAELIS J, OLSEN J H, TYNES T, VERKASALO PK. - *A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia*. Br J Cancer 83:692-8; 2000.
- ATTWELL D. - *Interaction of low frequency electric fields with the nervous system: the retina as a model system*. Radiat Prot Dosimetry 106(4):341-348; 2003.
- BAHR A, BOLZ T, HENNES C. - *Numerical dosimetry ELF: accuracy of the method, variability of models and parameters, and the implication for quantifying guidelines*. Health Physics 92(6):521-530; 2007.
- BARTH A, PONOCNY I, PONOCNY-SELIGER E, VANA N, WINKER R. - *Effects of extremely low-frequency magnetic field exposure on cognitive functions: results of a meta-analysis*. Bioelectromagnetics. 2009 Sep 14. [Epub ahead of print].
- BENCSIK M, BOWTELL R, BOWLEY R. - *Electric fields induced in the human body by time varying magnetic fields in MRI: numerical calculations and correlation analysis*. Phys Med Biol 52:2337-2353; 2007.
- CECH R, LEITGEB N, PEDIADITIS M. - *Current densities in a pregnant woman model induced by simultaneous ELF electric and magnetic field exposure*. Phys Med Biol 53:177-186; 2008.
- COOK CM, THOMAS AW, PRATO FS. - *Human electrophysiological and cognitive effects of exposure to ELF magnetic and ELF modulated RF and microwave fields: a review of recent studies*. Bioelectromagnetics 23(2):144-157; 2002.
- COOK CM, SAUCIER D M, THOMAS AW, PRATO FS. - *Exposure to ELF magnetic and ELF-modulated radiofrequency fields: the time-course of physiological and cognitive effects observed in recent studies (2001-2005)*. Bioelectromagnetics 27:613-627; 2006.
- CRASSON M. - *50-60 Hz electric and magnetic field effects on cognitive function in humans: a review*. Radiat Prot Dosimetry 106(4):333-340; 2003.
- CRUMPTON MJ, COLLINS AR. - *Are environmental electromagnetic fields genotoxic? DNA Repair (Amst)* 3(10):1385-1387; 2004.
- DIMBYLOW PJ. - *Development of the female voxel phantom, NAOMI and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields*. Phys Med Biol 50:1047-70, 2005.
- DIMBYLOW PJ. - *Development of pregnant female, hybrid voxel-mathematical models and their application to the dosimetry of applied magnetic and electric fields at 50 Hz*. Phys Med Biol 51:2383-2394; 2006.
- GARCIA AM, SISTERNAS A, HOYOS SP. - *Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a meta-analysis*. Int J Epidemiol 37:329-40; 2008.
- GREENLAND S, SHEPPARD A R, KAUNE W T, POOLE C, KELSH M A. - *A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia*. Epidemiology 11(6):624-34; 2000.
- HIRATA A, WAKE K, WATANABE S, TAKI M. - *In-situ electric field and current density in Japanese male and female models for uniform magnetic field exposures*. Radiation Protection Dosimetry 135(4):272-275; 2009.
- HUSS A, SPOERRI A, EGGER M, RÖÖSLI M. - *Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population*. Am J Epidemiol 169:167-75; 2009.
- IARC International Agency for Research on Cancer - *Static and extremely low frequency electric and magnetic fields*. Lyon, France: IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans Volume 80; 2002.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*. Health Phys 74(4):494-522; 1998.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - *General approach to protection against non-ionizing radiation*. Health Physics 82 (4):540-548; 2002.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - *Exposure to Static and Low Frequency Electromagnetic Fields, Biological Effects and Health Consequences (0-100 kHz) - Review of the Scientific Evidence and Health Consequences*. Bernhardt JH, Matthes R, McKinlay A, Vecchia P, Veyret B (eds) ISBN3-934994-03-2; Munich: ICNIRP; 2003a.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - *Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines*. Health Phys 84:383-387; 2003b.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - *Medical magnetic resonance (MR) procedures: protection of patients*. Health Phys 87(2):197-216; 2004.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - *Guidelines on limiting exposure to static magnetic fields*. Health Phys 96(4):504-514; 2009.
- IEC International Electrotechnical Commission (IEC) 62226 - *Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body*; 2004.
- IEC International Electrotechnical Commission (IEC) 62233 - *Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure*; 2005a.
- IEC International Electrotechnical Commission (IEC) - *Medical electrical equipment - Part 1: General requirements for safety 2. collateral standard: electromagnetic compatibility - requirements and tests* IEC 60601-1-2; 2005b.
- IEEE 1308 - *Recommended Practice for Instrumentation: Specifications for Magnetic Flux Density and Electric Field Strength Meters - 10 Hz to 3 kHz*. IEEE, Piscataway; 1994.
- IEEE 644-1994 (Reaff 2008) - *IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*. IEEE, Piscataway; 2008.
- Jefferys JG - *Experimental neurobiology of epilepsies*. Curr Opin neurol. 7:113-122. 1994.
- Jokela K - *Restricting exposure to pulsed and broadband magnetic fields*. Health Phys. 79:373-388; 2000.
- Jokela K - *Assessment of complex emf exposure situations including inhomogeneous field distribution*. Health Phys 92:531-540, 2007.
- Juutilainen J - *Developmental effects of extremely low frequency electric and magnetic fields*. Radiat Prot Dosimetry 106(4):385-390; 2003.
- Juutilainen J. *Developmental effects of electromagnetic fields*. Bioelectromagnetics 7:107-115; 2005.

BIBLIOGRAPHIE

- AHLBOM A, DAY N, FEYCHTING M, ROMAN E, SKINNER J, DOCKERTY J, LINET M, MCBRIDE M, MICHAELIS J, OLSEN J H, TYNES T, VERKASALO PK - *A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia*. Br J Cancer 83:692-8; 2000.
- ATTWELL D - *Interaction of low frequency electric fields with the nervous system: the retina as a model system*. Radiat Prot Dosimetry 106(4):341-348; 2003.
- BAHR A, BOLZ T, HENNES C - *Numerical dosimetry ELF: accuracy of the method, variability of models and parameters, and the implication for quantifying guidelines*. Health Physics 92(6):521-530; 2007.
- BARTH A, PONOCNY I, PONOCNY-SELIGER E, VANA N, WINKER R - *Effects of extremely low-frequency magnetic field exposure on cognitive functions: results of a meta-analysis*. Bioelectromagnetics. 2009 Sep 14. [Epub ahead of print]. Bencsik M, Bowtell R, Bowley R. *Electric fields induced in the human body by time varying magnetic fields in MRI: numerical calculations and correlation analysis*. Phys Med Biol 52:2337-2353; 2007.
- Cech R, Leitgeb N, PEDIADITIS M - *Current densities in a pregnant woman model induced by simultaneous ELF electric and magnetic field exposure*. Phys Med Biol 53:177-186; 2008.
- COOK CM, THOMAS AW, PRATO FS - *Human electrophysiological and cognitive effects of exposure to ELF magnetic and ELF modulated RF and microwave fields: a review of recent studies*. Bioelectromagnetics 23(2):144-157; 2002.
- COOK CM, SAUCIER D M, THOMAS AW, PRATO FS - *Exposure to ELF magnetic and ELF-modulated radiofrequency fields: the time-course of physiological and cognitive effects observed in recent studies (2001-2005)*. Bioelectromagnetics 27:613-627; 2006.
- CRASSON M - *50-60 Hz electric and magnetic field effects on cognitive function in humans: a review*. Radiat Prot Dosimetry 106(4):333-340; 2003.
- CRUMPTON MJ, COLLINS AR - *Are environmental electromagnetic fields genotoxic? DNA Repair (Amst)* 3(10):1385-1387; 2004.
- DIMBYLOW PJ - *Development of the female voxel phantom, NAOMI and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields*. Phys Med Biol 50:1047-70, 2005.
- DIMBYLOW PJ - *Development of pregnant female, hybrid voxel-mathematical models and their application to the dosimetry of applied magnetic and electric fields at 50 Hz*. Phys Med Biol 51:2383-2394; 2006.
- GARCIA AM, SISTERNAS A, HOYOS SP - *Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a meta-analysis*. Int J Epidemiol 37:329-40; 2008.
- GREENLAND S, SHEPPARD A R, KAUNE W T, POOLE C, KELSH M A - *A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia*. Epidemiology 11(6):624-34; 2000.
- HIRATA A, WAKE K, WATANABE S, TAKI M - *In-situ electric field and current density in Japanese male and female models for uniform magnetic field exposures*. Radiation Protection Dosimetry 135(4): 272-275; 2009.
- HUSS A, SPOERRI A, EGGER M, RÖÖSLI M - *Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population*. Am J Epidemiol 169:167-75; 2009.
- IARC International Agency for Research on Cancer - *Static and extremely low frequency electric and magnetic fields*. Lyon, France: IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans Volume 80; 2002.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*. Health Phys 74(4): 494-522; 1998.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - *General approach to protection against non-ionizing radiation*. Health Physics 82 (4): 540-548; 2002.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - *Exposure to Static and Low Frequency Electromagnetic Fields, Biological Effects and Health Consequences (0-100 kHz) - Review of the Scientific Evidence and Health Consequences*. BERNHARDT JH, MATTHES R, MCKINLAY A, VECCHIA P, VEYRET B (eds) ISBN3-934994-03-2; Munich: ICNIRP; 2003a.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - *Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines*. Health Phys 84:383-387; 2003b.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - *Medical magnetic resonance (MR) procedures: protection of patients*. Health Phys 87(2):197-216; 2004.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - *Guidelines on limiting exposure to static magnetic fields*. Health Phys 96(4): 504-514; 2009.
- IEC International Electrotechnical Commission (IEC) 62226 - *Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body*; 2004.
- IEC International Electrotechnical Commission (IEC) 62233 - *Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure*; 2005a.
- IEC International Electrotechnical Commission (IEC) - *Medical electrical equipment - Part 1: General requirements for safety 2. collateral standard: electromagnetic compatibility - requirements and tests IEC 60601-1-2*; 2005b.
- IEEE 1308 - *Recommended Practice for Instrumentation: Specifications for Magnetic Flux Density and Electric Field Strength Meters - 10 Hz to 3 kHz*. IEEE, Piscataway; 1994.
- IEEE 644-1994 (Reaff 2008) - *IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*. IEEE, Piscataway; 2008.
- Jefferys JG. *Experimental neurobiology of epilepsies*. Curr Opin neurol. 7:113-122. 1994.
- JOKELA K - *Restricting exposure to pulsed and broadband magnetic fields*. Health Phys. 79:373-388; 2000.
- JOKELA K - *Assessment of complex emf exposure situations including inhomogeneous field distribution*. Health Phys 92:531- 540, 2007.
- JUUTILAINEN J - *Developmental effects of extremely low frequency electric and magnetic fields*. Radiat Prot Dosimetry 106(4):385-390; 2003.
- JUUTILAINEN J - *Developmental effects of electromagnetic fields*. Bioelectromagnetics 7:107-115; 2005.
- KANAI R, CHAIEB L, ANTAL A, WALSH V AND PAULUS W - *Frequency-dependent electrical stimulation of the visual cortex*. Curr Biol 18:1839-1843; 2008.

BIBLIOGRAPHIE

KHEIFETS L, AHLBOM A, JOHANSEN C, FEYCHTING M, SAHL J, SAVITZ D - *Extremely low-frequency magnetic fields and heart disease*. Scand J Work Environ Health 33(1): 5-12; 2007.

KHEIFETS L, BOWMAN JD, CHECKOWAY H, FEYCHTING M, HARRINGTON M, KAVET R, MARSH G, MEZEI G, RENEW DC, VAN WIJNGAARDEN E - *Future needs of occupational epidemiology of extremely low frequency electric and magnetic fields: review and recommendations*. Occup Environ Med 66(2):72-80; 2009.

MCNAMEE D A, LEGROS A G, KREWSKI D R, WISENBERG G, PRATO F S, AND THOMAS A W - *A literature review: the cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields*. Int Arch Occup Environ Health, 82, 919-933. 2009.

NAGAOKA T, WATANABE S, SAKURAI K, KUNIEDA E, WATANABE S, TAKI M AND YAMANAKA Y - *Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry* Phys. Med. Biol. 49:1-15; 2004

NYENHUIS JA, BOURLAND JD, KILDISHEV AV, SCHAEFER DJ - *Health effects and safety of intense gradient fields*. In *Shellock F, ed. Magnetic Resonance Procedures: Health Effects and Safety*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2001: 31-54.

POGOSYAN A, GAYNOR L D, EUSEBIO A AND BROWN P - *Boosting cortical activity at beta-band frequencies slows movement in humans*. Curr Biol 19:1-5; 2009.

REILLY J - *Applied Bioelectricity: From electrical stimulation to electropathology*. Springer-Verlag, New York ;1998.

REILLY JP - *Comments concerning «Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*. Health Phys 76(3):314-315; 1999.

REILLY JP - *Neuroelectric mechanisms applied to low frequency electric and magnetic field exposure guidelines - part I: sinusoidal waveforms*. Health Phys 83(3):341-355; 2002.

REILLY J, DIAMANT A - *Spatial relationships in electrostimulation: Application to electromagnetic field standards*. IEEE Trans. on Biomed. Eng. 50(6):783-785; 2003.

RUBIN GJ, DAS MUNSHI J, WESSELY S - *Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies*. Psychosom Med 67(2):224-32; 2005.

SAUNDERS RD, JEFFERYS JG - *Weak Electric Field Interactions in the Central Nervous System*. Health Phys 83(3): 366-375; 2002.

SAUNDERS RD, JEFFERYS JG - *A neurobiological basis for ELF guidelines*. Health Phys 92:596-603; 2007.

SO PPM, STUCHLY MA, NYENHUIS JA - *Peripheral nerve stimulation by gradient switching fields in magnetic resonance imaging*. IEEE Trans. on Biomed. Eng. 51:1907-1914; 2004.

STUCHLY MA, DAWSON TW - *Human body exposure to power lines: relation of induced quantities to external magnetic field*. Health Phys 83:333-340; 2002.

World Health Organization (WHO) - *Environmental Health Criteria 238. Extremely Low Frequency (ELF) Fields*. Geneva: World Health Organization; 2007a.

World Health Organization (WHO) - *Electromagnetic fields and public health: exposure to extremely low frequency Fields*. Fact Sheet No 322. Geneva: World Health Organization; 2007b.

XI W, STUCHLY MA - *High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields*. Appl Comput Electromagn Soc J 9:127-134; 1994.

Annexe

DÉTERMINATION DE L'EXPOSITION CRÊTE PONDÉRÉE

Il est possible d'appliquer la pondération en commençant par calculer le spectre de la forme d'onde et en appliquant ensuite la relation (7). Pour de nombreuses applications, il est toutefois plus commode d'utiliser un filtrage analogique ou numérique de la forme d'onde dans le domaine temporel. Il convient que le gain (G) du filtre (rapport du signal de sortie au signal d'entrée) varie en fonction de la fréquence de façon directement proportionnelle à la limite d'exposition, suivant l'équation $G = EL(f_{ref})/EL(f)$, dans laquelle EL représente la limite d'exposition à la fréquence f , et f_{ref} désigne une fréquence de référence arbitraire valant de 1 Hz à 100 kHz. Il est recommandé que la valeur de crête de la forme d'onde ainsi filtrée ne dépasse pas la limite d'exposition (restriction de base ou niveau de référence), convertie en valeur de crête (en amplitude) à la fréquence de référence. Le [tableau AVI](#) présente un exemple des limites de crête ainsi obtenues.

En plus de leur effet sur l'amplitude, les filtres physiques exercent une influence sur la phase du champ, ce qui modifie la valeur de crête du champ filtré. Comme illustré sur les [figures 1, 2 et 3](#), les limites sont rapportées aux gammes de fréquences dans lesquelles chacune d'entre elle varie en proportion directe des valeurs de $1/f^2$, $1/f$, f^0 (constante) ou f . Dans les intervalles de valeurs de $1/f^2$, $1/f$, f^0 et f , l'angle de phase du filtre ϕ_i (cf. [relation \(7\)](#)) vaut 180° , 90° , 0° et -90° , respectivement.

Il est possible d'obtenir une approximation du filtre de pondération avec un filtre électronique ou numérique dont l'atténuation ne doit pas dévier de plus de 3 dB et la phase de plus de 90° par rapport à la réponse en fréquence exacte, qui est linéaire par morceaux. À titre d'exemple, la [figure A1](#) représente l'atténuation et la phase en fonction de la fréquence, dans le cas du filtre employé pour la pondération du champ électrique induit. Les courbes d'approximation sont construites à l'aide d'un lissage simple par une fonction filtre de type RC (résistance-condensateur).

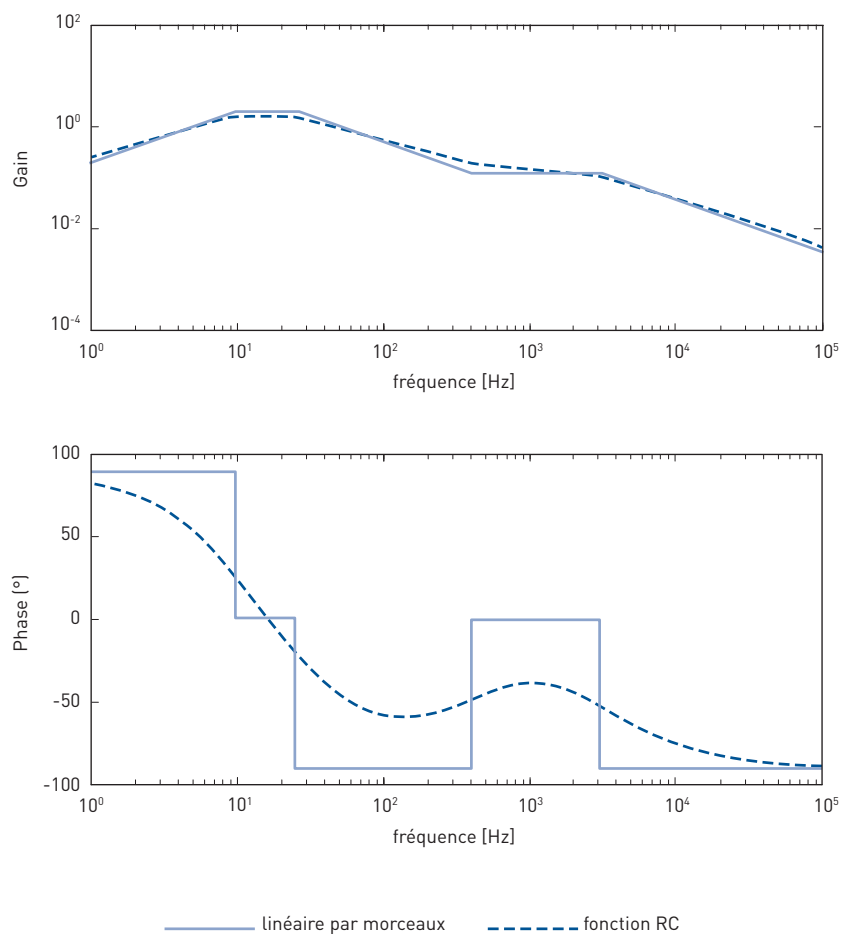
TABLEAU A VI

Limites de crête obtenues pour des champs électriques et magnétiques non sinusoïdaux. La fréquence de référence est égale à 50 Hz.

| | E_{induit} mV.m^{-1} | | E_{externe} V.m^{-1} | B μT |
|---------------------|--|-----------------------|--|--------------------------|
| | Cerveau | Autres tissus | | |
| Travailleurs | $\sqrt{2} \times 100$ | $\sqrt{2} \times 800$ | $\sqrt{2} \times 10\,000$ | $\sqrt{2} \times 1\,000$ |
| Population générale | $\sqrt{2} \times 20$ | $\sqrt{2} \times 400$ | $\sqrt{2} \times 5\,000$ | $\sqrt{2} \times 200$ |

FIGURE A1

Réponse en amplitude et en phase pour la pondération du champ électrique induit



L'approche par crête pondérée peut être employée à la fois avec des champs cohérents et des champs non cohérents. Dans ce dernier cas, la durée de mesure doit être suffisamment longue pour permettre de détecter la valeur de crête la plus défavorable avec une probabilité raisonnable. Dans le cas de champs non cohérents et constitués de quelques fréquences, l'approche par crête pondérée est assimilable à la sommation spectrale.

ADN (acide désoxyribonucléique)

Molécule de polymère dont les motifs structuraux sont des désoxyribonucléotides et qui, sous forme de doubles brins disposés en double hélice, constitue le matériel génétique de la plupart des organismes.

Cancer

Ensemble d'affections caractérisées par la division incontrôlée et anormale des cellules eucaryotes et par la dissémination de la pathologie (métastases) vers des sites variés de l'organisme.

Caractéristiques

Propriétés physiques détaillées des champs électriques et magnétiques, telles que l'intensité, le spectre de fréquences, la polarisation, la modulation, etc.

CC

Abréviation pour « courant continu », également utilisée pour signaler la nature constante de certains champs ; cf. *Champ statique*.

Champ électrique

Vecteur champ E mesuré en volt par mètre.

Champ magnétique

Grandeur vectorielle, H, qui définit un champ magnétique en tout point de l'espace et s'exprime en ampère par mètre ($A.m^{-1}$) ; voir aussi *Densité de flux magnétique*.

Champ non uniforme

Champ dont l'amplitude, la direction et la phase relative ne sont pas constantes dans toutes les dimensions du corps ou de la partie du corps considéré. Dans le cas des champs électriques, la définition s'applique à un champ environnemental non perturbé par la présence du corps.

Champs électromagnétiques

Combinaison de champs électriques et magnétiques dans l'environnement. Cette expression est souvent

confondue avec « rayonnement électromagnétique », et peut donc se révéler trompeuse si elle est employée pour des fréquences extrêmement basses auxquelles ce rayonnement n'est pas détectable.

Champ statique

Champ qui ne varie pas dans le temps. Dans la plupart des environnements, les champs électriques et magnétiques varient dans le temps, mais leur spectre de fréquences comporte une composante à 0 Hz. Cette composante « quasi-statique » du champ peut être déterminée en calculant la moyenne du signal d'oscillation sur la durée de l'échantillonnage.

Conductivité

Propriété d'un matériau, exprimée en siemens par mètre ($S.m^{-1}$), qui détermine la densité de courant électrique lorsqu'un champ électrique est appliqué à ce matériau ; c'est l'inverse de la résistivité.

Courant de contact

Courant traversant un milieu biologique par l'intermédiaire d'une électrode ou d'une autre source de courant en contact.

Courant de tétanisation musculaire

Seuil d'intensité de courant pour lequel une contraction musculaire involontaire empêche de lâcher prise sur un conducteur alimenté.

Crête spatiale

Expression servant à décrire la valeur maximale d'une grandeur particulière, moyennée sur une petite masse ou zone du corps humain.

Décharge d'étincelles

Transfert de courant à travers un espace d'air. Un tel transfert de courant nécessite une différence de potentiel suffisamment élevée entre deux conducteurs pour ioniser l'air. Ce phénomène est donc très différent du contact direct avec une source.

Densité de courant

Vecteur dont l'intégrale sur une surface déterminée est égale au courant qui traverse cette surface ; dans un conducteur linéaire, la densité de courant moyenne est égale à l'intensité du courant divisée par la section transversale de ce conducteur. La densité de courant est exprimée en ampère par mètre carré ($A.m^{-2}$).

Densité de flux magnétique (B)

Grandeur vectorielle déterminant la force qui s'exerce sur une ou plusieurs charges mobiles (courant électrique). La densité de flux magnétique s'exprime en tesla (T). Un gauss (*unité à éviter*) est égal à 10^{-4} T.

Dépolarisation (cellulaire)

Diminution du potentiel de repos de part et d'autre d'une membrane cellulaire.

Distance de calcul de la moyenne

Distance sur laquelle on calcule la moyenne le champ électrique interne pour déterminer si les restrictions de base sont respectées.

Durée de phase (t_p)

Délai qui sépare deux passages par zéro d'une forme d'onde dont la valeur moyenne est égale à zéro. Pour une onde sinusoïdale de fréquence f, $t_p = 1/(2f)$. Pour une forme d'onde exponentielle, t_p est définie comme la durée mesurée entre la crête de la forme d'onde et le point où elle descend à 0,37 (e^{-1}) fois sa valeur de crête.

Effet direct

Effet biologique résultant de l'interaction directe de champs électriques ou magnétiques avec des structures biologiques.

Effet nocif

Effet défavorable pour la santé d'un individu, provoqué par l'exposition à un champ électrique ou magnétique ou à un courant de contact.

Électrostimulation

Induction d'un potentiel d'action se propageant dans un tissu excitable, par application d'un stimulus électrique ; polarisation électrique des processus présynaptiques produisant un changement de l'activité des cellules post-synaptiques.

Électrostimulation directe

Stimulation par l'intermédiaire du champ électrique au sein du milieu biologique, induite par un champ électrique ou magnétique externe en l'absence de décharges d'étincelles ou de contact direct avec d'autres conducteurs.

CEM (EMF)

Champs électriques et magnétiques (« Electric and Magnetic Fields »).

Énergie électromagnétique

Énergie accumulée dans un champ électromagnétique ; elle s'exprime en joule (J).

Évaluation de l'exposition

Estimation de l'exposition d'une personne par mesurage, modélisation, recueil d'informations concernant les sources ou par d'autres moyens.

Exposition

Phénomène ayant lieu chaque fois qu'une personne subit les effets de champs basses fréquences ou de courants de contact.

Exposition de la population générale

Toute exposition à des champs basses fréquences reçue par des membres de la population générale. Cette définition exclut l'exposition professionnelle et l'exposition à des fins médicales.

Exposition du public

Toute exposition à des champs électriques ou magnétiques d'individus appartenant au grand public, à l'exclusion de l'exposition professionnelle et de l'exposition au cours d'un acte médical.

Exposition médicale

Exposition à des champs basses fréquences qu'une personne reçoit à titre de patient subissant un diagnostic médical ou recevant un traitement médical agréé, ou en tant que volontaire pour une recherche médicale.

Exposition professionnelle

Toute exposition à des champs électriques ou magnétiques d'individus accomplissant leurs tâches habituelles ou des activités qui leur sont assignées dans le cadre de leur emploi.

Exposition de longue durée

Exposition pendant une partie importante de la vie du système biologique concerné ; la durée d'une telle exposition peut ainsi varier de quelques semaines à de nombreuses années.

Facteur de réduction

Minoration du seuil d'effet permettant de compenser diverses sources d'incertitude dans le processus d'établissement de ce document. L'extrapolation de données animales à des effets sur l'être humain, les variabilités individuelles se traduisant par des tolérances différentes, et les incertitudes statistiques (limites de confiance) pesant sur la relation dose-réponse sont quelques exemples des sources d'incertitude touchant les niveaux seuils d'exposition et d'effet. L'ICNIRP considère que les incertitudes qui affectent les mesures réalisées pour mettre en œuvre ces lignes directrices sont du ressort des organismes chargés de développer les méthodes de vérification de la conformité. L'ICNIRP ne prend pas en compte les incertitudes de mesure pour fixer ses facteurs de réduction.

Fibre nerveuse

Axone distinct appartenant à un nerf.

Fibrillation ventriculaire

Arythmie des ventricules cardiaques, caractérisée par des contractions rapides et non coordonnées.

Forme d'onde

Variation d'une amplitude électrique dans le temps. Sauf indication différente, l'expression forme d'onde utilisée dans ce document désigne des valeurs (ou des mesures) observées en certains points au sein du milieu biologique.

Fréquence

Nombre de cycles sinusoidaux accomplis par une onde électromagnétique en une seconde ; elle s'exprime habituellement en hertz (Hz).

Fréquence cardiaque

Mesure du nombre de battements de cœur par minute.

Fréquence de réseau

Fréquence à laquelle est généré le courant électrique alternatif. Pour les réseaux publics de distribution d'électricité, la fréquence de réseau est de 60 Hz en Amérique du nord, au Brésil et dans certaines régions du Japon, et de 50 Hz dans presque tout le reste du monde.

Harmonique (fréquence)

Fréquence qui est un multiple entier de la fréquence de réseau ou d'une autre fréquence de référence.

Hertz (Hz)

Unité d'expression de la fréquence, (f). Un hertz est égal à un cycle par seconde. 1 kHz = 1000 Hz, 1 MHz = 1000 kHz, 1 GHz = 1000 MHz.

Induction

Champ électrique ou magnétique généré dans un milieu conducteur sous l'effet d'un champ électrique ou magnétique externe (environnemental) variable dans le temps.

Instantané

Adjectif qualifiant des paramètres particuliers qui doivent être mesurés ou évalués sur un intervalle de temps très court (typiquement 100 microsecondes ou moins).

Intensité de champ électrique (E)

Quotient de la force exercée par un champ électrique sur une charge électrique ponctuelle, par la valeur de cette charge électrique. L'intensité de champ électrique s'exprime en newton par coulomb ou en volt par mètre ($N.C^{-1} = V.m^{-1}$).

Intensité de champ magnétique (H)

Intensité du vecteur champ magnétique, exprimée en ampère par mètre ($A.m^{-1}$).

Magnétophosphènes

Sensation d'éclairs lumineux provoquée par des courants électriques induits qui stimulent la rétine.

Mécanisme établi

Mécanisme bioélectrique présentant les caractéristiques suivantes : (a) il peut servir à prédire un effet biologique chez l'être humain ; (b) il est possible d'en réaliser un modèle explicite à l'aide d'équations ou de relations paramétriques ; (c) il a été vérifié chez l'être humain, ou des données sur l'animal peuvent être extrapolées à l'être humain de manière sûre ; (d) il est attesté par de solides éléments probants ; et (e) il est largement accepté parmi les experts de la communauté scientifique.

Membrane plasmique

Double couche lipidique qui entoure le cytoplasme des cellules animales et végétales.

Mesure de l'exposition

Nombre unique résumant l'exposition à un champ électrique et/ou magnétique. La mesure est habituellement déterminée par une combinaison associant le traitement du signal des instruments de mesure et l'analyse de données réalisée après mesure.

Moyenne

Moyenne arithmétique d'une série de valeurs de mesure ou d'autres données.

Moyenne quadratique (valeur rms)

Racine carrée de la moyenne des carrés d'une fonction qui varie dans le

temps, $F(t)$, sur un intervalle de temps déterminé allant de t_1 à t_2 . On la calcule en portant d'abord la fonction au carré, puis en déterminant la moyenne des carrés ainsi obtenus et en extrayant la racine carrée de cette moyenne, autrement dit

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [F(t)]^2 dt}$$

Mutagène

Substance capable de provoquer une mutation.

Mutation

Toute modification héréditaire et détectable du matériel génétique qui n'est pas provoquée par recombinaison génétique.

Nerf

Faisceau d'axones.

Nerf périphérique

Nerf se trouvant à l'extérieur du système nerveux central, et qui ou bien part du système nerveux central soit mène à celui-ci.

Neurone

Unité cellulaire distincte, habituellement constituée d'un axone, d'un corps cellulaire et de ramifications dendritiques.

Niveaux de référence

Valeurs de crête et moyennes quadratiques (*rms*) des champs électriques et magnétiques et des courants de contact auxquels une personne peut être exposée sans effet défavorable et avec des facteurs de sécurité acceptables. Les niveaux de référence pour l'exposition à des champs électriques et magnétiques qui figurent dans le présent document peuvent être dépassés, s'il est possible de démontrer par ailleurs que les restrictions de base ne sont pas dépassées.

Ce sont ainsi des paramètres pratiques ou « de substitution », qui peuvent permettre de vérifier le respect des restrictions de base.

Perméabilité

Grandeur scalaire ou tensorielle, dont le produit par l'intensité de champ magnétique donne la densité de flux magnétique. Note : en milieu isotrope, la perméabilité est un scalaire, et en milieu anisotrope, une matrice. Synonyme : *perméabilité absolue*. Unité : henry par mètre ($H.m^{-1}$). Si la perméabilité d'un matériau ou d'un milieu est divisée par la perméabilité du vide (*constante magnétique*) μ_0 , le résultat est appelé *perméabilité relative* (μ_R).

Perméabilité relative

Perméabilité (absolue) (*voir ce terme*) divisée par la perméabilité du vide. Une valeur proche de 1 signifie que le matériau n'est que faiblement magnétisé par un champ externe.

Permittivité électrique

Constante qui définit l'influence d'un milieu isotrope sur les forces d'attraction ou de répulsion entre corps électrisés ; elle s'exprime en farad par mètre ($F.m^{-1}$) ; la *permittivité électrique relative* est la permittivité électrique d'un matériau ou d'un milieu divisée par la permittivité électrique du vide.

Phase relative

Angle de phase d'une forme d'onde sinusoïdale par rapport à l'angle de phase d'une autre forme d'onde mesuré en un point différent du milieu conducteur, ou par rapport à celui d'une forme d'onde de référence donnée.

Phosphène

Sensation visuelle provoquée par des stimuli non photiques. Les électrophosphènes sont induits par des courants électriques, et les magnétophosphènes sont induits magnétiquement.

Polarisation (cellulaire)

Potentiel électrique formé de part et d'autre d'une membrane cellulaire.

Population générale

Expression désignant l'ensemble de la population. Elle englobe des individus de tous âges et d'états de santé divers, ce qui inclut des groupes ou des sujets particulièrement vulnérables tels que personnes fragiles, personnes âgées,

travailleuses enceintes, bébés et jeunes enfants.

Protéine

Élément d'un ensemble de composés organiques azotés de masse moléculaire élevée, de forme et de composition complexes.

Radiofréquence (RF)

Énergie électromagnétique dont les fréquences vont de 3 kHz à 300 GHz.

Rayonnement non ionisant (RNI)

Expression englobant tous les rayonnements et les champs du spectre électromagnétique dont l'énergie est normalement insuffisante pour produire une ionisation de la matière ; ce rayonnement est caractérisé par une énergie du photon inférieure à 12 eV, ce qui équivaut à des longueurs d'ondes supérieures à 100 nm ou des fréquences inférieures à 3×10^{15} Hz.

Restrictions de base

Limitations impératives des grandeurs correspondant au mieux à l'ensemble des mécanismes connus d'interaction biophysique avec les tissus et qui sont susceptibles de produire des effets nocifs.

Risque relatif (RR)

Rapport du taux d'atteinte par une maladie dans un groupe expérimental à celui d'un groupe de comparaison, éventuellement assorti d'ajustements tenant compte de facteurs de confusion tels que l'âge. Pour les maladies rares, le risque relatif est pratiquement égal au risque relatif approché ou *odds ratio*.

Seuil

Niveau d'un stimulus marquant la frontière entre une réponse et absence de réponse à ce stimulus.

Seuil médian

Valeur seuil au sein d'une distribution statistique, pour laquelle 50 % de l'effectif présente des seuils plus élevés et 50 % des seuils plus bas.

S.I.

Abréviation désignant le système international d'unités.

Système nerveux central (SNC)

Partie du système nerveux des vertébrés, constituée par le cerveau et la moelle épinière, mais ne comprenant pas les nerfs périphériques.

Techniques d'évaluation

Mesurage ou calcul de l'intensité du champ électrique interne, de la densité de courant induit, de l'absorption spécifique (AS) ou du débit d'absorption spécifique (DAS), chez l'être humain ou l'animal exposé à des champs électromagnétiques.

Tesla (T)

Unité S.I. de densité de flux magnétique. 1 tesla = 10000 gauss (voir ce terme).

Travailleurs

Voir l'expression *Exposition professionnelle* dans le présent glossaire.

Voxel

Volume élémentaire à trois dimensions utilisé dans les modélisations informatiques de l'espace. Dans ce document, il est utilisé pour représenter des volumes de tissus humains et animaux dans des modélisations.