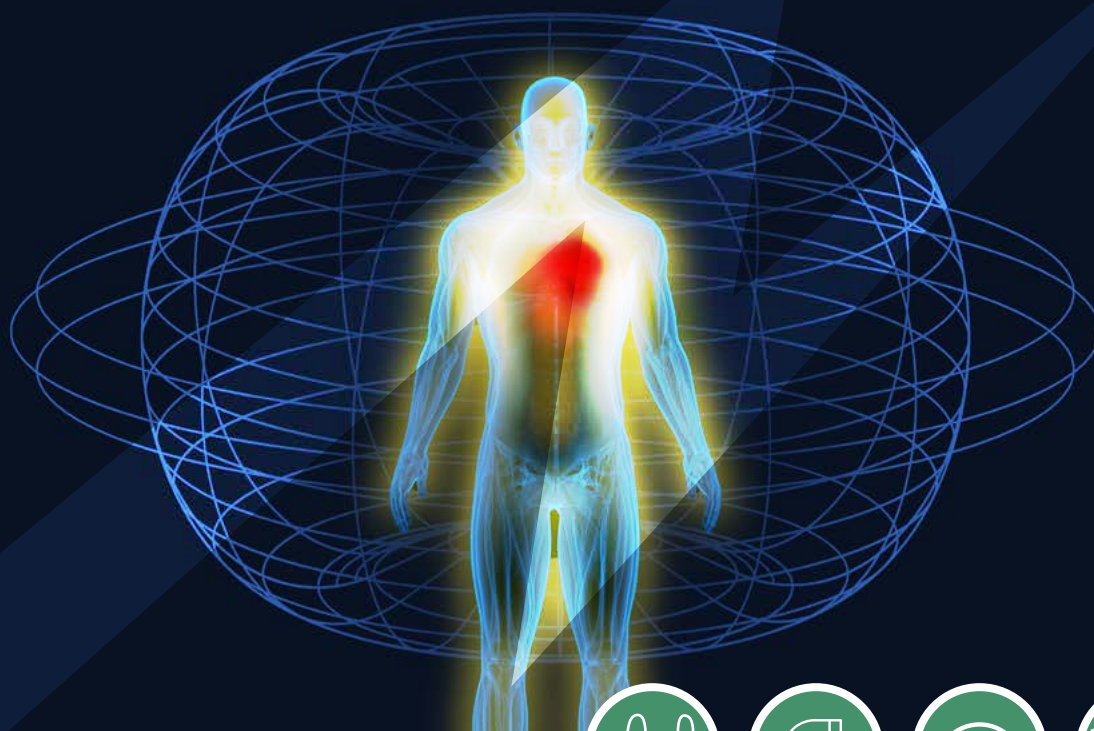




AFSEC

ORIENTATIONS SUR
**L'EXPOSITION AUX CHAMPS
ÉLECTROMAGNÉTIQUES**



Une Publication de l'AFSEC TC 77
Première édition

REMERCIEMENTS

La liste des auteurs du comité technique de l'AFSEC, TC 77 (ATC 77) ayant contribué au développement du guide de la CEM concernant les Orientations sur l'exposition aux champs électromagnétiques

1. Amevi **ACAKPOVI**
Président – Ghana
2. Ade **OGUNSOLA**
Ancien président et membre – Nigéria
3. Mai **ELHAFEZ**
Secrétaire – Égypte
4. Charles **NDAGIJE**
Rwanda
5. Chijioke **OBIEKEZIE**
Membre – Nigéria
6. Thelela **MVAMBO**
Membre – Afrique du Sud
7. Izaias **NDAPONA**
Namibie
8. Bwanga **MBULA**
Membre – Zambie
9. Phillip A. **CHINDARA**
Zimbabwe
10. Isaac **CHIRIDZA**
Zimbabwe
11. Romaric **ADEGBOLA**
Bénin

Initiative soutenue par



ORIENTATIONS SUR
**L'EXPOSITION AUX CHAMPS
ÉLECTROMAGNÉTIQUES**



TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	2
TABLE DES MATIÈRES	5
SOMMAIRE	6
1 INTRODUCTION	7
2 LES EFFETS BIOLOGIQUES DES CEM	9
2.1 Aperçu des effets biologiques des CEM	9
2.2 Champs électromagnétiques	9
2.3 Champs proches et lointains	9
2.4 Régions de champ	11
2.5 Augmentation de température	13
2.6 Champs de basse fréquence (BF)	14
2.7 Le mécanisme des interactions : la permittivité et la perméabilité	15
2.8 Le mécanisme de couplage	15
3 PROPRIÉTÉS DES TISSUS EN CHAMPS CONSTANTS	17
3.1 Aperçu	17
3.2 Les champs électriques statiques	17
3.3 Les champs magnétiques statiques	17
3.4 Les champs variables de temps	17
3.5 Les champs à basse fréquence	18
3.6 L'absorption d'énergie par rayonnement électromagnétique	19
3.7 Le couplage indirect	20
4 LES EFFETS BIOLOGIQUES	21
4.1 Aperçu des effets biologiques	21
4.2 Les effets biologiques des champs magnétiques statiques	23
4.3 Les effets biologiques des champs de basse fréquence	23
4.4 Les effets biologiques du rayonnement à haute fréquence	24
4.5 Les champs électromagnétiques et le cancer	25
4.6 La stimulation de champs électromagnétiques et de nerfs	25
4.7 Les CEM et les modifications de la perméabilité des membranes cellulaires	25
4.8 Les CEM et l'augmentation de la température	26
4.9 Les CEM et la fertilité, la reproduction ainsi que le développement de fœtus	26
5 LA PROTECTION	28
5.1 Aperçu de la protection contre l'exposition aux champs électromagnétiques	28
5.2 Basic Restriction	28
5.3 Le niveau de référence	30
6 LES SCÉNARIOS RÉELS	33
6.1 Le premier cas : les appareils électroménagers	33
6.2 Le deuxième cas : les lignes électriques à haute tension (HT)	35
6.3 Le troisième cas : les systèmes radio	38
7 LES MESURES DE PROTECTION SUPPLÉMENTAIRES	41
8 CONCLUSION	41
REFERENCES	42

SOMMAIRE

L'apparition, la croissance et l'expansion de l'ère du numérique entraînent une croissance sans précédente de l'exposition aux champs électromagnétiques non ionisants. Le fonctionnement de la plupart des nouveaux appareils et machines électriques et électroniques introduisent un environnement électromagnétique complexe auquel le corps humain est exposé. Ce guide met en évidence l'existence de ces champs électromagnétiques non ionisants basses et hautes fréquences, et montre les effets biologiques de ces champs sur la santé. Commencé par une description des propriétés de tissus dans des champs constants, le guide décrit les effets biologiques possibles sur l'homme du point de vue des champs magnétiques statiques, des champs à basses fréquences (BF) et des champs à hautes fréquences (HF). Le document présente une brève description de la relation entre le cancer et les champs électromagnétiques (CEM), les CEM et la simulation nerveuse, l'augmentation de température, la fertilité et la reproduction.

Ce guide fournit également un aperçu des mesures existantes de protection conformément aux dispositions des normes de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI), des normes de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) et des normes sur le matériel brouilleur (NMB). Des limites d'exposition pour le public et les travailleurs ont été présentées pour les basses et hautes fréquences conformément à l'ICNIRP, 2010 et 2020.

En outre, trois scénarios de cas liés à l'exposition aux CEM ont été présentés pour mettre en évidence l'émission des champs électromagnétiques et leurs impacts sur l'environnement. Le premier présente des résultats de laboratoire sur l'exposition due aux appareils électroménagers. Le deuxième présente l'exposition aux CEM à proximité des lignes d'alimentation et leurs effets potentiels sur l'environnement et, enfin, le troisième aborde les niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques des antennes radio.

Le guide apporte un bref résumé des informations importantes relatives à l'exposition aux CEM et des mesures nécessaires de protection du public ainsi que des personnes travaillant dans les secteurs des systèmes d'énergies électriques, d'électroniques de télécommunications et des TIC.

1 INTRODUCTION

L'exposition à un champ électromagnétique se produit lorsqu'un individu (ou toute partie du corps) est influencé par des émissions électriques et magnétiques produites par des sources de tension et de courant électrique. À travers cela, l'énergie électromagnétique sera transférée au corps exposé, induisant ainsi des effets biologiques. Cependant, lorsque cette énergie devient élevée, cela peut entraîner des problèmes de santé. Un effet néfaste sur la santé entraîne des troubles détectables sur la santé de la personne exposée ou de sa progéniture ; en revanche, un effet biologique peut ou non entraîner un effet néfaste sur la santé.

Cette publication de l'AFSEC fournit des lignes directrices basées sur des critères internationaux pour la protection contre les effets néfastes avérés sur la santé humaine et associés à l'exposition aux CEM. Le champ électromagnétique dans le vrai sens du terme n'est pas un phénomène nouveau car toute créature est entourée de diverses activités électromagnétiques et de sources des CEM, à la fois naturelles et artificielles.

Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), au cours du 20ème siècle, l'exposition environnementale aux CEM d'origine humaine est en augmentation constante, étant donné que la demande croissante d'électricité et des technologies de télécommunication en perpétuelle évolu-

tion et les changements du comportement social ont conduit à la création de sources de plus en plus artificielles.

Tout le monde est exposé à un ensemble complexe de champs électriques, magnétiques et électromagnétiques, tant à la maison qu'au travail, qu'il s'agisse de la production et de la transmission d'électricité, du fonctionnement d'appareils ménagers et d'équipements industriels ou des télécommunications et de la radiodiffusion. De plus, de minuscules courants électriques existent dans le corps humain en raison de la réaction chimique qui se produit dans le cadre des fonctions corporelles normales, même en l'absence de champs électriques externes. Par exemple, les nerfs relaient des signaux en transmettant des impulsions électriques. La plupart des réactions biochimiques, de la digestion aux activités cérébrales, vont de pair avec le réarrangement des particules chargées. Même le cœur est électriquement actif et peut être retracé à l'aide d'un électrocardiogramme. Par conséquent, le phénomène n'est pas étranger aux systèmes biologiques humains, mais le niveau d'exposition aux sources externes doit être contrôlé pour s'assurer qu'aucun effet à court ou à long terme ne se produira.

Au cours de la dernière décennie, de nombreuses sources de champs électromagnétiques sont



Figure 1 : Champs électromagnétiques autour du corps humain

devenues le centre de préoccupations en matière de santé, notamment les ferroviaires électrifiées, les lignes électriques à haute tension, les fours à micro-ondes, les ordinateurs et les écrans de télévision, les dispositifs de sécurité, les radars et, plus récemment, les téléphones mobiles ainsi que leurs stations de base. De plus, les champs électromagnétiques sont classés en types de rayonnements ionisants ou non ionisants. Le présent document d'orientation vise à assurer la protection de l'homme contre les types de rayonnements non ionisants. Des références sont faites aux types de rayonnements ionisants, le cas échéant, à des fins de clarification. Le contenu de ces lignes directrices est basé sur des travaux de recherche menés principalement par les membres du Comité de compatibilité électromagnétique ainsi que du TC77 de l'AFSEC et s'appuie également sur les rapports des organisations suivantes :

- L'Organisation mondiale de la santé
- La Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP)
- Le Comité international sur la sécurité électromagnétique (ICES)

Il est à noter que le document fait référence aux résultats de recherche de chercheurs indépendants ainsi qu'aux analyses effectuées par l'AFSEC. Selon l'ICNIRP et l'ICES, les mécanismes humains établis entrent dans la catégorie des effets à court terme et ces effets sont compris en termes de mécanismes d'interaction reconnus. Les limites d'exposition, définies dans les publications de l'ICNIRP et de l'ICES, ne sont donc pas fondées sur les effets potentiels d'une exposition à long terme pour les raisons suivantes :

- Il n'existe pas de preuves suffisantes et fiables pour conclure que l'exposition à long terme aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques à des niveaux observés dans les communautés ou les environnements professionnels est nocive pour la santé humaine ou provoque une maladie, y compris le cancer.
- Il n'existe aucun mécanisme confirmé qui fournirait une base solide pour prédire les effets nocifs d'une exposition à long terme et à de faibles niveaux.

Par conséquent, à l'instar de l'ICNIRP et de l'ICES, ce document d'orientation vise à prévenir les effets établis à court terme des CEM sur le corps.

2 LES EFFETS BIOLOGIQUES DES CEM

2.1 Aperçu des effets biologiques des CEM

Les organismes vivants sont soumis à de nombreuses formes différentes de champs électromagnétiques et de rayonnements d'origine humaine. Outre les rôles principaux prévus, ces énergies produisent d'autres effets susceptibles d'influencer les activités vitales des organismes vivants. Le changement produit dépend de nombreux facteurs biologiques et physiques. Ces effets peuvent être très apparents et visibles rapidement après l'exposition de l'organisme vivant ou ils peuvent ne pas être apparents du tout et prendre un certain temps à se manifester. L'objectif de ce document d'orientation est de fournir des informations relatives à l'exposition aux CEM dans la gamme de fréquences allant des fréquences extrêmement basses aux micro-ondes. Il est à noter que les champs électromagnétiques dans cette gamme de fréquences contiennent des photons à faible énergie ; ils sont alors trop faibles pour produire une ionisation ou une excitation dans des circonstances ordinaires. Par conséquent, les champs d'intérêt sont souvent appelés rayonnements à faible énergie ou rayonnements non ionisants. L'absorption de l'énergie électromagnétique est régie par les propriétés électromagnétiques des milieux tissulaires, en particulier la permittivité et la perméabilité. De plus, la profondeur de pénétration dans le tissu dépend de la fréquence. En général, lorsqu'on considère l'interaction des champs électromagnétiques avec les systèmes biologiques, il est nécessaire de tenir compte de la fréquence ou de la longueur d'onde et de sa relation avec la dimension physique du corps.

2.2 Champs électromagnétiques

Les champs électriques et magnétiques font partie du spectre électromagnétique qui s'étend des champs électriques et magnétiques statiques, en passant par des hautes fréquences ou des radiofréquences, le rayonnement infrarouge et la lumière visible jusqu'aux radiographies et rayons gamma, comme illustré à la figure 2.

2.3 Champs proches et lointains

Les termes « champ lointain » et « champ proche » décrivent les champs autour d'une antenne ou

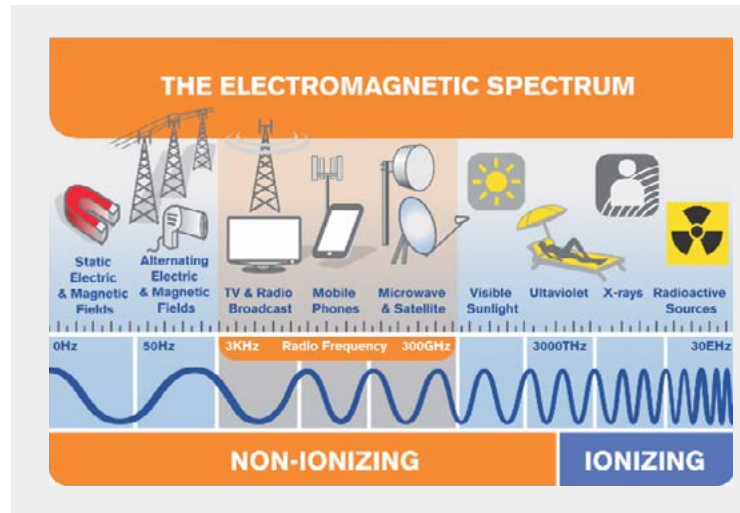


Figure 2 : Spectre de champs électromagnétiques

d'un objet émettant du champ électromagnétique. En générale, le champ proche se produit dans une région proche de l'antenne et s'étend sur une distance inférieure à une longueur d'onde. Cependant, le champ lointain est considéré dans les régions éloignées de l'antenne en multiples longueurs d'onde.

Une structure n'est capable de rayonner efficacement des ondes électromagnétiques que lorsque ses dimensions sont significativement petites par rapport à la longueur d'onde, λ , définie comme suit dans l'espace libre :

$$\lambda = \left(\frac{c}{f} \right) \quad (1)$$

$$\lambda_{50\text{Hz}} = \frac{3 \times 10^8}{50} = 6000 \text{ km} \quad (2)$$

Ainsi à 50Hz, la plupart des structures artificielles disponibles sont beaucoup plus petites qu'une longueur d'onde. La faible efficacité de rayonnement des structures électriquement petites - des structures dont la plus grande dimension $L \ll \lambda$, peut être facilement illustrée pour une antenne de ligne.

Pour une antenne rayonnante, illustrée à la figure 3, le rapport tension/courant aux points a et b, définit son impédance comme suit :

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (3)$$

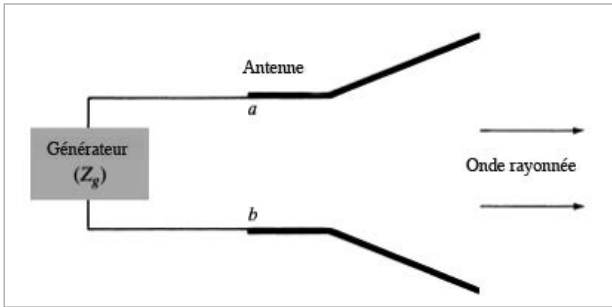


Figure 3 : Antenne en mode de transmission

Où :

- Z_A = impédance d'antenne aux bornes **a-b**
- R_A = résistance d'antenne aux bornes **a-b**
- X_A = réactance d'antenne aux bornes **a-b**

En général, la partie résistive de l'équation (3) se compose de deux composantes ; c'est-à-dire :

$$R_A = R_r + R_L \quad (4)$$

Où :

- R_r = résistance au rayonnement de l'antenne
- R_L = résistance ohmique de l'antenne

L'antenne rayonne sa puissance réelle à travers la résistance au rayonnement R_r .

Pour une antenne dipôle infinitésimale (généralement $l \leq \lambda/50$), la résistance au rayonnement R_r d'un élément courant est défini par le formule suivant :

$$R_r = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \quad (5)$$

Alors que pour un petit dipôle, sa puissance rayonnée est d'un quart ($1/4$) de celle obtenue pour le dipôle infinitésimal. Ainsi, la résistance aux rayonnements se réduit à

$$R_r = 20\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \quad (6)$$

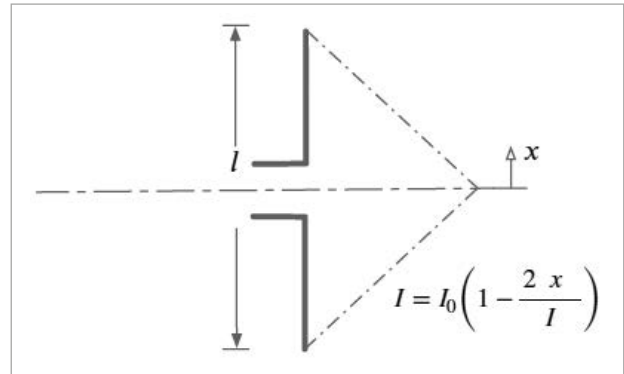


Figure 4 : Antenne à alimentation centrale

- La puissance rayonnée $P_r = I^2 R_r$, I étant le courant circulant à travers l'antenne.
- La puissance dissipée sous forme de chaleur dans les fils d'antenne, $I^2 R_L$ puisque R_r est beaucoup plus grand que R_L .
- Tout objet soumis à des champs électriques et magnétiques à basse fréquence subit généralement des effets de rayonnement.
- Toute configuration porteuse du courant crée des composants de champs électriques et magnétiques qui stockent l'énergie sans contribuer au rayonnement. Une antenne linéaire en espace libre, lorsqu'elle est soumise à un courant alternatif, en plus du champ rayonné E_r génère un champ électrostatique et un champ d'induction :
 - un champ électrostatique, E_s et
 - un champ d'induction, E_i

Notez que E_i et E_i ne contribuent pas à la puissance rayonnée.

- E_r est proportionnel à $\frac{1}{r}$; E_s est proportionnel à $\frac{1}{r^2}$; et E_i est proportionnel à $\frac{1}{r^3}$.
- Aux distances $r = \frac{\lambda}{2\pi}$, $E_i = E_r$

Ainsi, les objets situés à quelque distance de l'ordre de la longueur d'onde d'un système sont exposés à des composants de champ non rayonnant. Cette composante est d'un ordre de grandeur supérieur à la partie qui contribue au rayonnement.

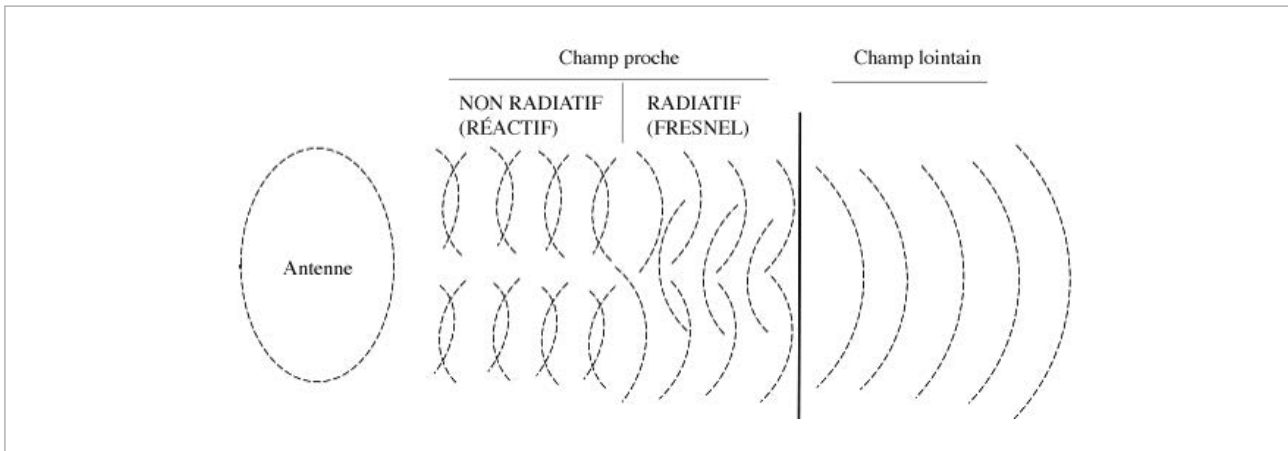


Figure 5 : Champ proche versus champ lointain

2.4 Régions de champ

L'espace entourant une antenne est généralement subdivisé en trois régions : (a) région du champ proche réactif, (b) région du champ proche rayonné (Fresnel) et (c) région du champ lointain (Fraunhofer), comme le montre la figure 6.

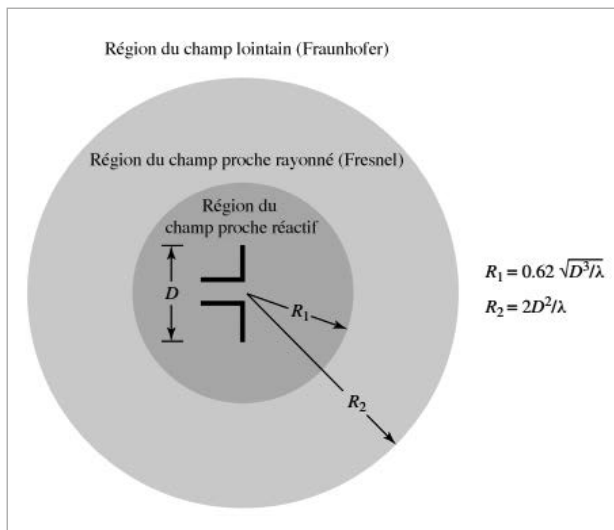


Figure 6 : Régions de champ d'une antenne

2.4.1 Région du champ proche réactif

La région du champ proche réactif est définie comme « la partie de la région du champ proche immédiatement entourant l'antenne, dans laquelle le champ réactif prédomine ». Pour la plupart des antennes, la limite extérieure de cette région est généralement considérée comme existante à une distance de

$$R < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

de la surface d'antenne, où λ est la longueur d'onde et D est la plus grande dimension de l'antenne.

Le nombre d'onde k est défini par :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

Le rapport entre les champs électriques et magnétiques est égal à

$$Z_w = \frac{E}{H} \approx \eta \quad (8)$$

Où :

- \mathbf{E} est l'intensité du champ électrique
- \mathbf{H} est l'intensité du champ magnétique
- Z_w = impédance d'onde
- η = impédance intrinsèque
($377\Omega = 120\pi$ ohms pour l'espace libre)

Dans des conditions où $k.r \ll 1$ les composantes du champ électromagnétique peuvent être approximées par l'équation 9 ci-dessous :

$$\left. \begin{aligned} E_r &\simeq -j\eta \frac{I_0 l e^{-jkr}}{2\pi k r^3} \cos \theta \\ E_\theta &\simeq -j\eta \frac{I_0 l e^{-jkr}}{4\pi k r^3} \sin \theta \\ E_\phi &= H_r = H_\theta = 0 \\ H_\phi &\simeq \frac{I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r^2} \sin \theta \end{aligned} \right\} kr \ll 1 \quad (9)$$

Où r est la distance de l'antenne au point d'observation.

2.4.2 Région du champ proche rayonné (Fresnel)

Elle est définie comme « la région du champ d'une antenne entre la région du champ proche réactif et la région du champ lointain dans laquelle les champs de rayonnement prédominent et dans laquelle la distribution du champ angulaire dépend de la distance de l'antenne. Si l'antenne a une dimension maximale qui n'est pas grande par rapport à la longueur d'onde, cette région peut ne pas exister. Pour une antenne focalisée à l'infini, la région du champ proche rayonné est parfois appelée la région de Fresnel sur la base d'analogie avec la terminologie optique. Si l'antenne a une dimension globale maximale qui est très petite par rapport à la longueur d'onde, cette région de champ peut ne pas exister. La limite intérieure est considérée comme la distance

$$R \geq 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

et la limite extérieure est la distance $R < \frac{2D^2}{\lambda}$

où D est la plus grande dimension de l'antenne. Dans cette région, la configuration du champ est, en général, une fonction de la distance radiale et les composantes à champ radial sont parfois non négligeables.

Dans les conditions où ($kr > 1$), les composantes du champ électromagnétique peuvent être approximées par l'équation 10 comme suit :

$$\left. \begin{aligned} E_r &\simeq \eta \frac{I_0 l e^{-jkr}}{2\pi r^2} \cos \theta \\ E_\theta &\simeq j\eta \frac{k I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \\ E_\phi &= H_r = H_\theta = 0 \\ H_\phi &\simeq j \frac{k I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \end{aligned} \right\} kr > 1 \quad (10)$$

2.4.3 Région du champ lointain (Fraunhofer)

Elle est définie comme « la région du champ d'une antenne lorsque la distribution du champ angulaire est essentiellement indépendante de la distance de l'antenne. Si l'antenne a une dimension globale maximale D , la région du champ lointain est généralement considérée comme existante à des distances supérieures à $\frac{2D^2}{\lambda}$ de l'antenne, λ , étant la longueur d'onde.

Dans les conditions où ($k.r \gg 1$), les composantes du champ électromagnétique peuvent être approximées par l'équation 11 comme suit :

$$\left. \begin{aligned} E_\theta &\simeq j\eta \frac{k I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \\ E_r &\simeq E_\phi = H_r = H_\theta = 0 \\ H_\phi &\simeq j \frac{k I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \end{aligned} \right\} kr \gg 1 \quad (11)$$

La figure 7 montre le rapport E sur H à $\theta = 90^\circ$.

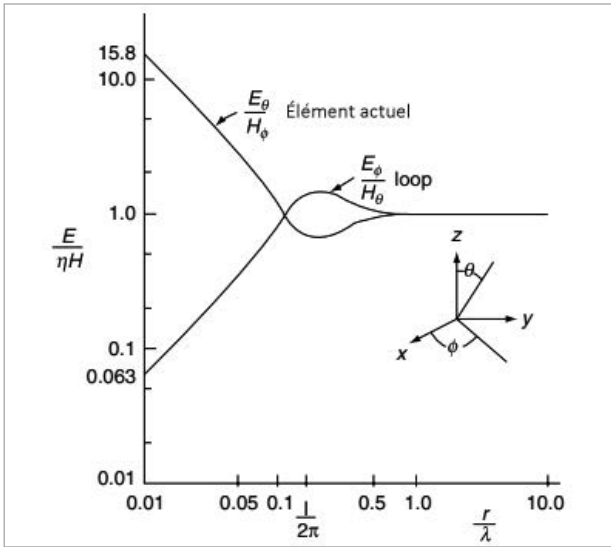


Figure 7 : Le rapport des champs E sur H à $\theta = 90^\circ$

Lorsque la distance d'observation varie du champ proche réactif au champ lointain, la forme de l'amplitude de l'antenne élémentaire change de forme en raison des variations de l'intensité et de la phase des champs. Une évolution typique de la forme d'une antenne, avec la plus grande dimension D , est illustrée à la figure 8. Il est évident que dans la région du champ proche réactif, la forme soit plus étalé et presque uniforme, avec de légères variations.

Au fur et à mesure que l'observation est déplacée vers la région du champ proche rayonné (Fresnel), la forme commence à se lisser et à former des lobes. Dans la région du champ lointain (Fraunhofer), la forme est bien formé, généralement composé de quelques lobes mineurs et d'un ou plusieurs lobes majeurs.

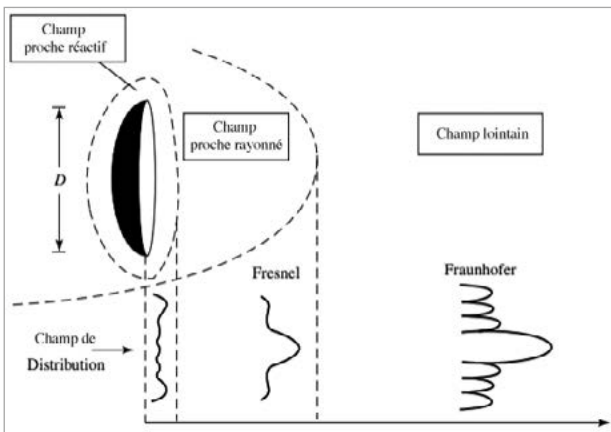


Figure 8 : Changements typiques de la forme du diagramme d'amplitude de l'antenne du champ proche réactif vers le champ lointain. [1]

Un organisme vivant exposé à un champ statique ou à un champ proche non rayonné peut en extraire de l'énergie, mais le mécanisme de couplage est très différent de celui des hautes fréquences, où l'énergie est transférée par rayonnement.

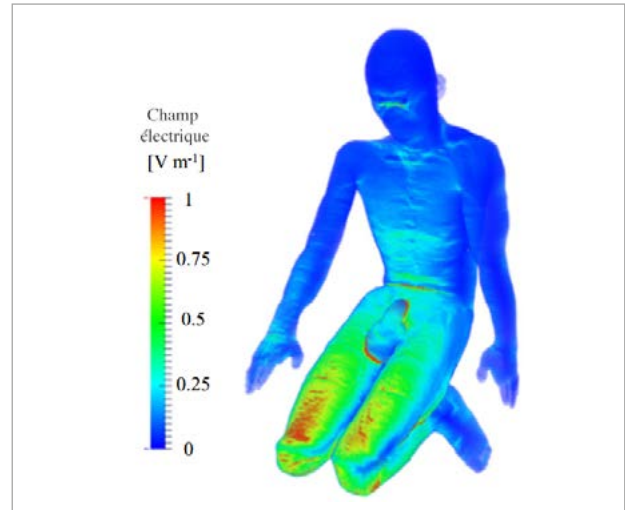


Figure 9 : Un organisme vivant exposé à un champ électrique, représenté en position accroupie

Dans le champ proche, l'intensité relative des champs électriques et magnétiques est une fonction de la configuration du courant ou de la charge et de la distance par rapport au système électrique.

Dans le champ de rayonnement (champ lointain), le rapport entre le champ électrique et le champ magnétique est fixe. Les champs électriques et magnétiques générés par les systèmes électriques à courant continu ou à courant basse fréquence, ne sont suffisamment pas énergétiques pour produire des effets thermiques sauf dans des circonstances très exceptionnelles. Notez que les effets non thermiques sont possibles, donc un champ électrique d'intensité suffisante peut orienter des dipôles, traduire des ions ou polariser des particules neutres.

2.5 Augmentation de température

L'énergie rayonnée peut générer de la chaleur dans le corps. Par conséquent, il est important de maintenir cette chaleur induite à un niveau sûr.

2.6 Champs de basse fréquence (BF)

Les basses fréquences appartiennent à la bande de 1Hz à 100 KHz et couvrent, donc, une large gamme d'applications. Les principales sources de champs de basse fréquence sont les lignes de transmission à haute tension et tous les appareils contenant des fils électriques de courant, y compris les équipements et les appareils électriques fonctionnant à des fréquences industrielles de 50 Hz dans la plupart des pays africains.

Le champ de basse fréquence créé par les lignes de transmission à haute tension peut être décrit à l'aide des équations générales de Maxwell. Cette basse fréquence peut être caractérisée par le caractère quasi-stationnaire du champ.

La champ quasi-stationnaire est due à sa faible fréquence. Ainsi, chaque composante du champ peut être calculé séparément. L'approche électrostatique est alors utilisée pour déterminer l'intensité du champ électrique et la densité du flux magnétique. Les sources de tension et de courant de ces champs sont en représentation de phase.

2.6.1 Champ électrique basse fréquence

Le calcul du champ électrique basse fréquence \mathbf{E} commence par la loi de Coulomb, sous sa forme intégrale. Équation 11

$$\mathbf{E}(p) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_1 \frac{\tau dl}{r^3} \mathbf{r} \quad (11)$$

τ est la charge linéaire sur le conducteur ; p est n'importe quel point de calcul désiré dans l'espace de \mathbf{E} ; le vecteur \mathbf{r} est dirigé de l'élément conducteur dl vers p ; ϵ_0 est la permittivité de l'espace libre.

Les caractéristiques de ces champs dépendent de la tension de ligne ainsi que de dimensions géométriques et de positions des conducteurs de la ligne de transmission. Pour éviter les effets de la végétation ou des irrégularités sur le terrain, l'intensité du champ non perturbé est généralement calculée ou mesurée à une certaine hauteur au-dessus du niveau du sol.

2.6.2 La densité de flux magnétique basse fréquence, \mathbf{B}

Le calcul de \mathbf{B} est beaucoup plus simple que celui de \mathbf{E} , en raison du caractère global de la densité de flux magnétique. Les sources de \mathbf{B} ne sont que des courants, le sol n'a donc aucun effet sur celles-ci. L'équation générale est obtenue à partir de la loi de Biot-Savart qui peut être dérivée des équations de Maxwell à l'aide d'une hypothèse quasi-statique, comme suit :

$$\mathbf{B}(p) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_1 \frac{I d\mathbf{l} \wedge \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3} \quad (12)$$

Où I est le courant circulant dans le conducteur, le vecteur \mathbf{r} est dirigé du conducteur $d\mathbf{l}$ vers le point d'observation ; μ_0 est la perméabilité du vide.

2.7 Le mécanisme des interactions : la permittivité et la perméabilité

Les propriétés électromagnétiques des matériaux biologiques sont caractérisées par la permittivité électrique et la perméabilité magnétique. Les tissus biologiques ont des valeurs de perméabilité indépendamment de la fréquence et ces valeurs sont proche de celle du vide. Cependant, les tissus biologiques ne sont pas exempts de matériaux ferromagnétiques.

Alors que la permittivité des matériaux biologiques présente des caractéristiques dépendantes de la fréquence. Typiquement, la constante diélectrique diminue tandis que la conductivité augmente avec l'augmentation de la fréquence. Les matériaux biologiques présentent une constante diélectrique très élevée, en particulier aux basses fréquences, par rapport à de nombreux autres solides et liquides homogènes. Les tissus biologiques sont composés de macromolécules, de cellules et d'autres substances liées aux membranes.

1. Les contre-ions mobiles associés aux charges fixes sur les membranes cellulaires et aux capacités des membranes dominent le comportement de la constante diélectrique aux basses fréquences.
2. La dépendance à la fréquence résulte du changement radical de la capacité de la membrane lorsque la fréquence augmente à des fréquences extrêmement basses.
3. Un champ électrique appliqué provoque l'accumulation de charges aux frontières, séparant les régions de tissus de propriétés diélectriques différentes - par exemple, l'espace intracellulaire et extracellulaire.

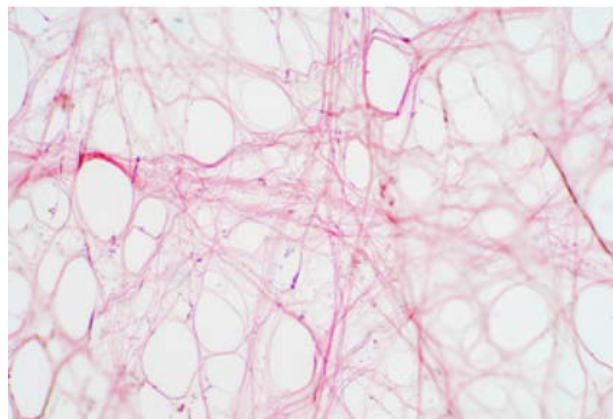


Figure 10 : Tissu conjonctif aréolaire vu au microscope

4. Lorsque la fréquence augmente, le temps alloué à chaque cycle est insuffisant pour permettre une charge complète des membranes cellulaires. Lorsque la fréquence augmente, les charges totales par cycle doivent diminuer ainsi que la capacitance membranaire.

Les propriétés électriques des tissus des organismes vivants peuvent être divisées en trois groupes, en fonction de leur teneur en eau :

- Les suspensions de cellules et de molécules protéiques de consistance liquide (sang, lymphe),
- Les suspensions similaires à l'état condensé (muscle, peau, foie, etc.), et
- Les tissus à faible teneur en eau (graisse, os). Les cellules, les particules colloïdales, les molécules de protéines et d'autres micro-particules acquièrent un moment dipolaire lorsqu'elles sont en suspension dans une solution électrolytique.

Les charges électriques dans les tissus sont également représentées par des molécules dipolaires d'eau et, enfin, par des ions électrolytes.

2.8 Le mécanisme de couplage

Un effet biologique est un effet établi provoqué par ou en réponse à l'exposition à un agent biologique, chimique ou physique, y compris l'énergie électromagnétique. Un effet biologique se produit lorsque l'exposition à un champ électromagnétique provoque une réponse physio-

logique perceptible ou détectable dans un corps biologique, telle que des altérations en matière de la structure, du métabolisme ou des fonctions d'un organisme entier, de ses organes, de ses tissus et de ses cellules [1,2]. Ces changements ne sont pas nécessairement nocifs pour les individus et peuvent également avoir des conséquences bénéfiques sur la santé ou le bien-être d'une personne.

Le corps humain dispose de mécanismes complexes pour s'adapter aux diverses influences auxquelles il est exposé dans son environnement. Cependant, il ne possède pas de mécanismes de compensation adéquats pour tous les effets biologiques. Si certains effets biologiques dépassent les limites de compensation du corps humain, cela peut entraîner des effets néfastes sur la santé. Par exemple, si le système humain est stressé pendant de longues périodes et les changements induits sont irréversibles, ces conditions peuvent être considérées comme un risque pour la santé. Par conséquent, l'effet biologique peut ou non entraîner un effet néfaste sur la santé, tandis qu'un effet néfaste sur la santé entraîne une altération détectable de la santé chez la personne exposée.

Les effets nocifs sur la santé sont souvent le résultat d'effets biologiques accumulés au fil du temps et dépendent de l'intensité et de la fréquence de l'exposition. Il est avéré que les champs électromagnétiques au-dessus de certains niveaux peuvent induire des effets biologiques. Des expériences réalisées sur des sujets sains suggèrent qu'une exposition à court terme, aux niveaux présents dans l'environnement, n'entraîne pas d'effets nocifs apparents. D'autre part, l'exposition à des niveaux élevés, qui pourraient être nocifs, est limitée par les directives nationales et internationales.

Jusqu'à présent, il n'existe actuellement aucune preuve scientifique bien établie permettant de conclure que l'exposition prolongée de faible intensité aux champs électromagnétiques, à des niveaux trouvés dans l'environnement, est nocive pour la santé humaine et il n'existe pas non plus de mécanisme confirmé qui pourrait fournir une base solide pour prédire ces effets nocifs [3].

Une connaissance fondamentale et détaillée des effets biologiques est nécessaire pour bien comprendre le risque potentiel sur la santé. La

compréhension des mécanismes d'interaction pourrait être utilisée pour identifier la dosimétrie appropriée, prédire les relations dose-effet, concevoir de meilleures expériences et déterminer si des effets néfastes sont attendus à des niveaux d'exposition particuliers [4].

Il est important de souligner que le couplage entre le champ électromagnétique et le corps biologique varie considérablement avec la fréquence.

3 PROPRIÉTÉS DES TISSUS EN CHAMPS CONSTANTS

3.1 Aperçu

Les tissus biologiques dans un champ électrique constant sont polarisés dans une certaine mesure - les particules chargées se déplacent le long des lignes de force et les molécules dipolaires sont orientées dans la même direction. Si une tension constante est appliquée directement sur le tissu, un courant électrique y sera produit, en raison de la conduction ionique.

Chaque cellule est entourée d'une paroi d'une capacité de surface de 0,1 à 3 $\mu\text{F}/\text{cm}$ et d'une résistance de surface de 25 à 10000 Ω/cm^2 . Les milieux intercellulaires et intracellulaires ont une résistance de l'ordre de 100-300 Ω/cm^2 et une constante diélectrique d'environ 80. Il est à noter que lors de l'application d'une tension constante, la paroi cellulaire agira comme un isolant et le courant ne circulera que dans le milieu extracellulaire. Une tension constante peut également donner lieu au phénomène d'électrophorèse - la migration de particules chargées électriquement (cellules, macromolécules) [5].

3.2 Les champs électriques statiques

Les champs électriques statiques ne pénètrent pas dans le corps humain en raison de sa conductivité élevée. Le champ électrique peut induire une charge électrique à la surface du corps qui peut parfois être perçue via son interaction avec les poils du corps et aussi sous forme de décharges d'étincelles. Cependant, hormis de cette stimulation sensorielle et superficielle des poils et de la peau comme base de la perception du champ, le nombre limité d'études de laboratoire chez l'animal et l'homme, qui ont examiné les effets de l'exposition aux champs électriques statiques, n'a pas fourni de preuves d'effets nocifs sur la santé.

3.3 Les champs magnétiques statiques

Les gens ne sont généralement pas affectés par les champs magnétiques statiques, à moins qu'ils ne se déplacent autour de ces champs. Le champ magnétique exercera ainsi une force physique sur les particules chargées électriquement se déplaçant dans le champ. Par conséquent, le mouvement par rapport au champ magnétique peut induire des champs électriques dans les tissus et ceux-ci peuvent affecter les tissus nerveux. La

magnitude des champs électriques induits dépendra de la variation totale du champ magnétique.

Il existe trois mécanismes physiques établis par lesquels les champs magnétiques statiques peuvent influencer les systèmes biologiques : l'induction magnétique, l'interaction magnéto-mécanique et les interactions de spin des électrons [6].

L'induction magnétique se produit à travers les types d'interaction suivants : des interactions électrodynamiques avec des électrolytes en mouvement où le champ statique exerçant une force de Lorentz sur des porteurs de charge ionique en mouvement et les cellules dans le sang entraînera des champs et des courants électriques induits ; des champs et des courants électriques induits peuvent également être induits par un mouvement dans un champ magnétique statique où le mouvement le long d'un gradient de champ ou d'un mouvement de rotation, soit dans un champ uniforme, soit dans un gradient de champ, entraînera la modification du flux magnétique, induisant ainsi un courant électrique.

Les interactions magnéto-mécaniques entre le champ magnétique statique et les corps biologiques sont réalisées par magnéto-orientation ou magnéto-traduction, où la première est relative à des molécules paramagnétiques subissant un couple dans un champ statique les orientant de manière à minimiser leur énergie libre dans le champ, tandis que la seconde est due à une force de translation nette sur les matériaux diamagnétiques et paramagnétiques en présence de gradients de champ.

Le dernier mécanisme s'effectue par le biais des interactions électroniques complexes qui peuvent affecter la vitesse de réactions chimiques spécifiques. Ces interactions de spin d'électrons sont liées à certaines réactions métaboliques impliquant un état transitionnel qui comprend une paire de radicaux où un champ magnétique appliqué affecte la vitesse et la mesure auxquelles la paire de radicaux se convertit à un état dans lequel la recombinaison n'est plus possible.

3.4 Les champs variables de temps

Il existe trois mécanismes de couplage de base établis par lesquels les champs électromagnétiques à variations temporelles interagissent avec le corps biologique [7] :

- Le couplage aux champs électriques à basse fréquence ;
- Le couplage aux champs magnétiques à basse fréquence ;
- L'absorption d'énergie provenant du rayonnement électromagnétique.

Ces mécanismes de couplage dépendent des caractéristiques du champ telles que la fréquence, l'uniformité spatiale, la direction de propagation et de polarisation, etc., mais aussi des caractéristiques du corps humain telles que la taille, la morphologie et la posture.

La figure 10 illustre le mécanisme de couplage du corps humain exposé à un champ électrique et magnétique de basse fréquence, respectivement.

3.5 Les champs à basse fréquence

Les champs à basse fréquence ont une grande longueur d'onde, de sorte que ces champs fonctionnent comme s'ils étaient composés de composants de champs électriques et magnétiques indépendants et quasi-statiques.

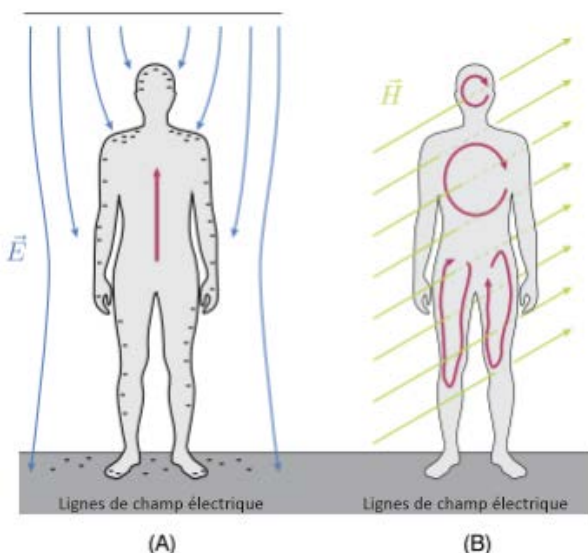


Figure 11 : Couplage du corps humain avec : (A) un champ E à basse fréquence et (B) un champ H à basse fréquence

Par conséquent, les propriétés rayonnantes des champs à basse fréquence peuvent être négligées dans leurs interactions avec les tissus bio-

logiques. Il est également important de noter que les champs à basse fréquence ont des énergies extrêmement faibles et sont donc incapables de perturber les liaisons chimiques. De plus, les champs à basse fréquence appliqués aux tissus biologiques par le biais d'air sont dus à la nature non thermique de leur interaction. Les champs les plus élevés dans les tissus, qui peuvent être induits par une fréquence extrêmement basse appliquée par le biais d'air, est de 1 V/m, ce qui conduit à un taux d'absorption d'énergie spécifique de 10^{-4} W/kg. Ce taux de disposition de l'énergie est de quatre ordres de magnitude inférieure au taux métabolique de base du corps et produit un taux négligeable d'augmentation de la température [6].

Il a été expliqué précédemment que les caractéristiques des champs électromagnétiques et leurs interactions avec les objets varient considérablement en fonction du rapport entre la longueur d'onde des champs électromagnétiques et la taille de l'objet. Pour les objets de la taille d'une personne, la longueur d'onde sera grande par rapport à la taille de l'objet aux fréquences inférieures à 1 MHz. De nombreux effets électriques et magnétiques naturels sont observés dans cette gamme de basses fréquences. La foudre et d'autres décharges statiques sont des exemples de décharges capacitives qui peuvent générer de très grandes quantités de courant sur une très petite zone et pendant une très courte période, ce qui peut causer des dommages importants ou infliger des douleurs dans cette petite zone. Ce même effet peut être utilisé à une échelle réduite et de manière plus contrôlée en électrophysiologie qui utilise des champs pulsés pour guérir les os ou les tissus mous, stimule les nerfs ou les muscles endommagés et réduit la douleur. Le système nerveux est constitué d'un réseau massif de neurotransmetteurs et de récepteurs.

En interagissant avec ce système électrique naturel à l'aide d'électrodes, on peut recevoir des signaux neuronaux à des fins d'analyse ou stimuler les nerfs pour qu'ils produisent une fonction biomécanique. L'électromyographie, les électrocardiogrammes, la défibrillation ou la stimulation cardiaque et la stimulation directe des nerfs sont quelques-unes des applications couramment observées dans cette bande de fréquences.

La plupart des applications dans la bande des basses fréquences sont destinées à la stimula-

tion ou à la réception de nerfs et de tissus, plutôt qu'à l'imagerie. En effet, les champs à basse fréquence ne peuvent pas être facilement focalisés pour fournir de bonnes images. L'imagerie d'impédance est une exception à cette règle. Les tissus à faible et à forte teneur en eau du corps ont des propriétés électriques très différentes (c'est-à-dire des isolants par opposition aux conducteurs) et ceci est utilisé pour fournir des images à proximité du corps. Certains appareils commerciaux simples, tels que les balances électriques mesurant le poids et estimant l'indice de masse corporelle, utilisent ce concept. Enfin, comme le réseau électrique repose sur des champs de basse fréquence (50 ou 60 Hz), de nombreuses recherches sont menées pour déterminer si ces champs, désormais répandus dans notre environnement, sont sûrs ou dangereux à petites doses.

3.5.1 Les champs à basse fréquence – les champs électriques

Le corps humain perturbe de manière significative la distribution spatiale d'un champ électrique de basse fréquence [8]. De plus, le champ électrique induit dans le corps sera considérablement plus petit par rapport au champ électrique externe. Comme le corps humain est un bon conducteur à basse fréquence, les lignes de champ électrique externes au corps seront presque perpendiculaires à la surface du corps, comme indiqué dans la figure 10A. L'interaction des champs électriques de basse fréquence avec l'être humain se traduit par un courant électrique, la formation de dipôles électriques et la réorientation des dipôles électriques déjà présentés dans les tissus [7]. L'intensité de ces effets dépend du tissu et de la fréquence du champ appliqué. Les champs électriques externes induisent un déplacement des charges de surface sur le corps, ce qui entraîne dans le corps des courants induits dont la distribution varie en fonction de la taille et de la forme du corps.

3.5.2 Les champs à basse fréquence – les champs magnétiques

Contrairement au champ électrique, le corps humain ne perturbe pas de manière significative la distribution spatiale d'un champ magnétique de basse fréquence. Comme la perméabilité des tissus corporels est similaire à celle de l'air, le champ interne est similaire au champ externe [6].

L'interaction du champ magnétique à basse fréquence avec le corps humain se traduit par des champs électriques induits et des courants circulant en boucles circulaires dans le corps [7], comme indiqué dans la figure 10B. Les amplitudes du champ induit et la densité de courant sont proportionnelles au rayon de la boucle, à la conductivité tissulaire ainsi qu'au taux de changement et à l'amplitude de la densité de flux magnétique. Pour une amplitude et une fréquence spécifiée du champ magnétique, le champ électrique le plus fort est induit là où se forme le boucle de champ magnétique ayant la plus grande dimension. Le trajet et l'amplitude du courant induit dans n'importe quelle partie du corps dépendent de la conductivité tissulaire.

3.6 L'absorption d'énergie par rayonnement électromagnétique

Comparativement à l'exposition aux champs électriques et magnétiques à basse fréquence entraînant une absorption d'énergie négligeable et, donc, aucune augmentation mesurable de la température dans le corps humain, l'exposition à des rayonnements électromagnétiques à haute fréquence au-dessus d'environ 100 kHz peut entraîner une absorption d'énergie importante. L'énergie absorbée provoque suffisamment les particules polarisées dans le tissu pour les transformer en énergie thermique, ce qui entraîne une augmentation de température conséquente. L'énergie électromagnétique absorbée par le corps humain est exprimée en termes de débit d'absorption spécifique (DAS).

En règle générale, l'exposition à un champ électromagnétique à ondes planes peut entraîner un dépôt et une distribution très non uniformes de l'énergie dans le corps, qui doit être évaluées par des procédures de calcul et de mesure dosimétriques. L'absorption d'énergie par le corps humain peut être approximativement divisée en quatre gammes de fréquences [7] :

1. 100 kHz à 20 MHz, auquel l'absorption dans le tronc diminue rapidement avec une fréquence décroissante et une absorption importante peut se produire dans le cou et les jambes ;
2. 20 MHz à 300 MHz, auquel une absorption relativement élevée peut se produire dans

tout le corps et à des valeurs encore plus élevées, si l'on tient compte des résonances partielles du corps (par exemple, de la tête) ;

3. 300 MHz à plusieurs gigahertz, auxquels se produit une importante absorption locale et non uniforme ;
4. >10 GHz, à laquelle l'absorption d'énergie se produit principalement à la surface du corps.

La quantité d'énergie absorbée dépendra de nombreux facteurs, notamment les dimensions, la morphologie et la posture du corps exposé. Si le corps humain n'est pas raccordé à la terre, sa fréquence d'absorption en résonance sera proche de 70 MHz. Chez les individus de plus grande taille, la fréquence de résonance est un peu plus basse, tandis que pour les adultes de petite taille, les enfants, les bébés et les personnes assises, elle est d'environ 100 MHz. Pour les personnes raccordées à la terre, les fréquences de résonance sont deux fois moins élevées. Les expositions en champ proche peuvent entraîner un DAS local élevé au niveau de la tête, des poignets et des chevilles. Le DAS local et le DAS pour le corps entier dépendent fortement de la distance de séparation entre la source de rayonnement et le corps.

À des fréquences supérieures à proche de 10 GHz, la profondeur de pénétration du champ dans les tissus est faible et le DAS ne représente pas une bonne mesure pour déterminer l'énergie absorbée dans le corps, par conséquent, la densité de puissance incidente du champ constitue une quantité dosimétrique plus appropriée.

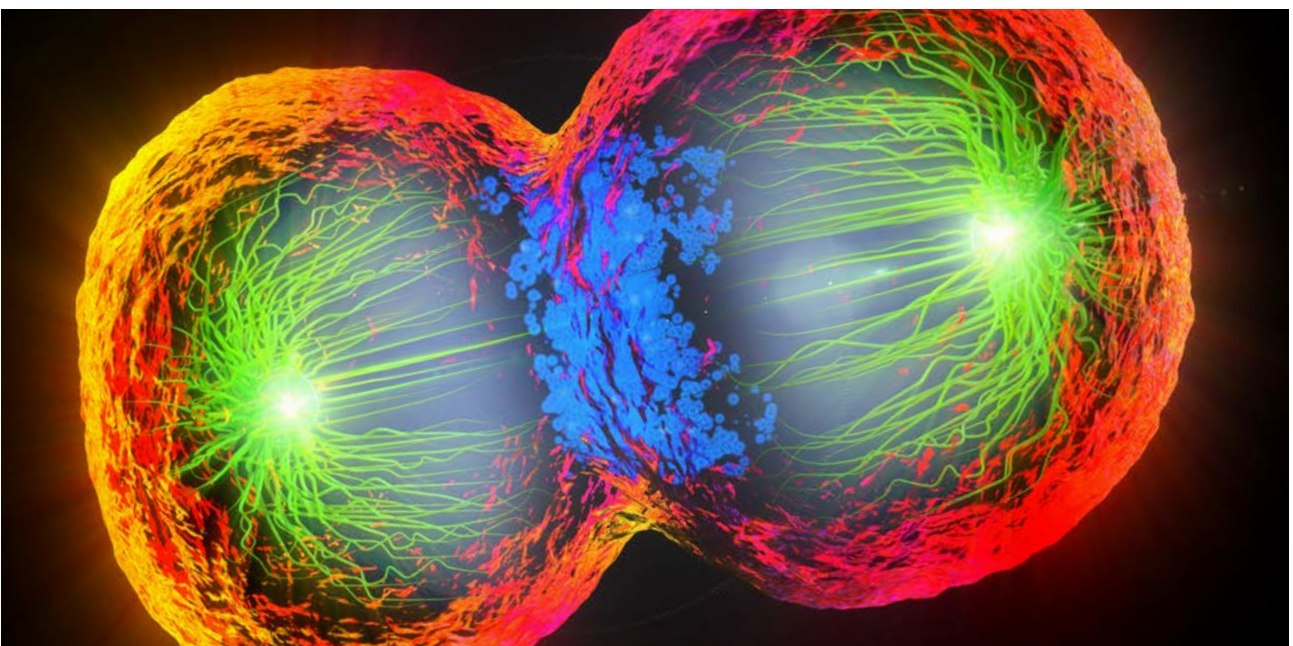
3.7 Le couplage indirect

Il existe deux mécanismes de couplage indirect [7]. Le premier est le courant de contact résultant du contact du corps humain avec un objet à un potentiel électrique différent. L'amplitude et la distribution spatiale des courants de contact dépendent de la fréquence, de la dimension de l'objet, de la taille de la personne, de la surface de contact et des conditions de raccordement à la terre (c'est-à-dire lorsque le corps ou l'objet est chargé par un CEM). Au moment où un contact est établi entre une personne et un objet conducteur ou même dans le cas où un individu et un objet conducteur exposés à un champ intense se rapprochent l'un de l'autre, des décharges transitoires – étincelle - se produit, également connue sous le nom de microchoc. L'autre mécanisme est relatif au couplage de champs électromagnétiques aux dispositifs médicaux portés par un individu ou implantés sur une personne, comme illustré dans le guide de l'AFSEC : CEM dans les dispositifs médicaux développé par le TC 77 de l'AFSEC [50].

4 LES EFFETS BIOLOGIQUES

4.1 Aperçu des effets biologiques

La réponse biologique du corps due à l'exposition aux champs électromagnétiques (CEM) dépend principalement de la fréquence du champ appliqué.



Tous les effets biologiques pertinents signalés, causés par l'exposition aux CEM, peuvent être classifiés comme non thermiques ou thermiques. Les champs de basse fréquence jusqu'à 5-10 MHz induisent des effets non thermiques tels que la stimulation des muscles, des nerfs et des organes sensoriels, tandis que les champs de haute fréquence dans la gamme de 100 kHz à 300 GHz entraînent des effets thermiques. Dans la région de transition entre 100 kHz et 5-10 MHz, des effets non thermiques et thermiques peuvent être produits.

L'interaction des champs électromagnétiques avec les systèmes vivants peut être approximativement divisée en quatre gammes de fréquences, comme illustré dans la figure 12, les champs statiques pour les fréquences inférieures à 1 Hz, les champs de basse fréquence pour les fréquences comprises entre 1 Hz et 100 kHz, les champs de fréquences intermédiaires pour les fréquences comprises entre 100 kHz et 10 MHz et les champs de haute fréquence pour les fréquences supérieures à 10 MHz (référence à ajouter).

Même si le même effet biologique sera induit au-dessus de quelques GHz, par rapport à des fréquences plus basses, l'échauffement sera limité à la surface du corps.

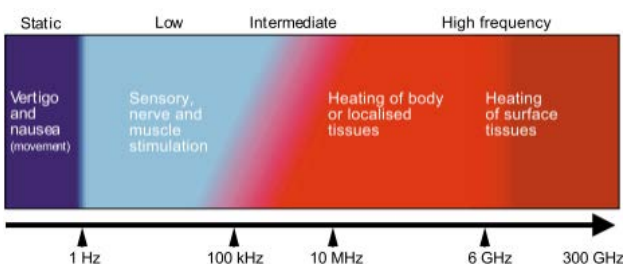


Figure 12 : Effets biologiques du statique à 300 GHz

La réponse biologique à une fréquence donnée dépend de l'intensité du champ où un faible niveau d'exposition entraînera principalement des effets perceptifs ou sensoriels, tandis qu'un niveau élevé d'exposition aux champs produira des effets sur la santé, considérés comme plus graves. Le tableau (1) présente un résumé des effets sensoriels et sur la santé.

Tableau 1 : Effets sensoriels et sur la santé par gamme de fréquence

Fréquence	Effet sensorial	Effets sur la santé
Champs magnétiques statiques	Vertiges, nausées, goût métallique	Altération du flux sanguin dans les extrémités, altération de la fonction cérébrale; fonction cardiaque altérée
1 Hz-10 MHz	Phosphènes (perçus comme des éclairs lumineux); Modification mineure de la fonction cérébrale (1-400 Hz)	Sensation de fourmillement, de douleur (stimulation nerveuse), contractions musculaires, rythme cardiaque perturbé
100 kHz-6 GHz	Effet auditif micro-ondes (200 MHz - 6,5 GHz)	Échauffement ou brûlures excessifs sur tout le corps ou localisés
6-300 GHz		Domages thermiques localisés aux yeux et à la peau
Note:	Les effets à des champs de fréquence intermédiaire (100 KHz - 10 MHz) sont une combinaison de l'effet des champs à basse fréquence et à haute fréquence.	

4.2 Les effets biologiques des champs magnétiques statiques

Les personnes au repos ne sont généralement pas affectées par les champs magnétiques statiques, sauf à des intensités très élevées où des effets sur les fonctions cardiaques ou cérébrales peuvent se produire. Cependant, le mouvement autour d'un champ magnétique statique peut provoquer des effets biologiques dus au champ électrique induit affectant les tissus nerveux. Certaines études récentes suggèrent que ces effets peuvent également se produire en mode stationnaire. L'amplitude des champs électriques induits dépend principalement des gradients temporels et spatiaux.

Les organes d'équilibre situés dans l'oreille sont particulièrement sensibles, car marcher à l'intérieur du champ magnétique statique ou même bouger rapidement la tête dans le champ magnétique statique peut entraîner des sensations d'étourdissement ou de vertige. Les symptômes de nausées et d'autres effets, tels que des sensations gustatives, ont également été signalés à proximité d'appareils d'IRM en fonctionnement. Cependant, tous ces effets sont temporaires et s'arrêtent lorsque le mouvement autour d'un champ magnétique statique fort s'arrête ou même ralentit. Il n'y a aucune preuve d'une déficience permanente ou d'un effet indésirable grave causé par l'exposition. Limiter la densité de flux magnétique externe à 2 Tesla ou se déplacer lentement à l'intérieur d'un champ statique fort peut généralement empêcher ces effets de se produire.

4.3 Les effets biologiques des champs de basse fréquence

Le champ magnétique à basse fréquence induit un champ électrique dans le corps humain, ce qui entraîne alors une stimulation des organes sensoriels à des valeurs de champ plus faibles ou une stimulation des nerfs et des muscles (en particulier dans les extrémités) dans des champs plus forts. Les effets sur les organes sensoriels ne sont pas nocifs mais peuvent être gênants ou distrayants, tandis que les effets dans des champs plus forts peuvent être désagréables ou même douloureux. Différents tissus présentent une sensibilité maximale à différentes fréquences, comme indiqué dans le tableau 2.

Tableau 2 : Sites d'interaction et sensibilités maximales pour différents effets

Effet	Site d'interaction	Sensibilité maximale
Goût métallique	Récepteurs dans la langue	< 1 Hz
Vertiges, nausées	Oreille interne (système vestibulaire)	< 0,1-2 Hz
Stimulation nerveuse et musculaire	Flux sanguin – champs électriques induits dans les tissus	
Phosphènes	Cellules rétinienne dans l'œil	~ 20 Hz
Sensation tactile et douloureuse	Nerfs périphériques	~ 50 Hz
Contraction musculaire induite	Nerfs et muscles périphériques	
Effets sur le cœur	Cœur	

Les yeux sont plutôt sensibles aux effets des champs électriques induits et l'effet d'exposition le plus fortement établi est l'induction de phosphènes magnétiques dans la rétine et la perception d'une faible lumière vacillante à la périphérie du champ visuel. La rétine fait partie du système nerveux central (SNC) et est considérée comme un modèle approprié pour les effets induits du champ électrique sur les circuits neuronaux du SNC en général [8].

L'exposition à des champs électriques de basse fréquence provoque des réponses biologiques bien définies, allant de la perception à la nuisance, en passant par les effets de charge électrique de surface. Les champs électriques de basse fréquence peuvent induire des champs électriques dans les tissus corporels, qui peuvent en principe produire des effets similaires aux champs induits par l'exposition aux champs magnétiques de basse fréquence. Cependant, en raison de l'effet de blindage du corps dû à sa conductivité élevée, le champ électrique induit est généralement d'une amplitude trop faible pour provoquer des effets indésirables en matière du champ électrique externe typique existant dans l'environnement.

De plus, les champs électriques à basse fréquence produisent un autre effet que les champs magnétiques. Un individu peut ressentir une sensation de picotement ou de fourmillement sur la peau lorsqu'il se trouve à l'intérieur d'un champ électrique de très haute intensité, par exemple sous une ligne électrique à haute tension. Cela se produit lorsque le champ électrique à basse fréquence provoque l'accumulation de charges à la surface du corps et cette charge électrique fait bouger et vibrer les poils de la peau.

4.4 Les effets biologiques du rayonnement à haute fréquence

L'exposition de l'être humain aux champs électromagnétiques de fréquences supérieures à 100 KHz entraîne un échauffement du corps par absorption d'énergie. Selon le scénario d'exposition, cela peut entraîner soit un échauffement de l'ensemble du corps, soit un échauffement localisé d'une partie du corps, comme les extrémités ou la tête. Les individus en bonne santé généralement régulent la température globale de leur corps de manière très efficace, grâce à la capacité de thermorégulation du corps humain. Ce mécanisme de protection est responsable de maintenir une température dans la plage normale. Cependant, si l'énergie totale absorbée par le corps est suffisamment importante pour provoquer la rupture de ce mécanisme de protection contre le contrôle de la chaleur, une augmentation incontrôlée de la température corporelle (hyperthermie) se produit, entraînant des effets thermiquement nocifs. Les effets les plus nocifs sur la santé, dus à l'exposition aux hautes fréquences entre 1 MHz et 10 GHz, sont associés aux réponses à l'échauffement induit qui se traduit par une élévation de température dans les tissus au-dessus de 1°C. L'augmentation prolongée de la température pour quelques degrés ou plus peut être très dangereuse.

Le corps humain génère de la chaleur à partir du métabolisme. Le taux métabolique de base (BMR) est défini comme la production de chaleur d'un être humain dans un environnement thermo-neutre au repos mental et physique pour plus de 12 heures après le dernier repas. Le taux métabolique de base standard pour un homme de 70 kg est d'environ 1,2 W/kg, mais il peut être modifié par des changements dans la masse corporelle active, les régimes alimentaires et les niveaux endocriniens.

Lorsque les humains sont exposés à la chaleur d'une source thermique externe à un taux beaucoup plus élevé, des dommages thermiques peuvent se produire. Cependant, des niveaux d'exposition comparables au BMR peuvent produire des effets thermiques dus à l'induction de la thermorégulation. Les effets thermiques imposés au corps par un taux d'absorption spécifique donné sont fortement influencés par la température ambiante, l'humidité relative et le flux d'air. Le corps humain régule l'augmentation de la température due à l'effet thermique par la transpiration et l'échange de chaleur via la circulation sanguine.

Certaines zones dont la capacité de circulation sanguine est limitée, comme le cristallin de l'œil et les testicules, présentent un risque particulièrement élevé d'être endommagées. Le fœtus en développement est également connu pour être particulièrement sensible aux effets de l'hyperthermie chez la mère. D'autres effets thermiques peuvent survenir autour d'objets conducteurs d'électricité, qu'ils soient implantés (clous, vis, articulations artificielles de la hanche, etc.) ou externes (montres, branches de lunettes, etc.).

Pour que des effets néfastes sur la santé, tels que les cataractes et les brûlures cutanées, se produisent à la suite d'une exposition aux champs à haute fréquence, des densités d'énergie supérieures à 1000 W/m², existant à proximité d'émetteurs puissants tels que des radars, sont nécessaires. De plus, lors de certaines expositions, une distribution non uniforme de la puissance radiofréquence (RF) absorbée est possible, ce qui entraîne un échauffement non uniforme. Les points du corps absorbant cette puissance sont généralement appelés des points chauds. Des températures localisées supérieures à 41,6 °C peuvent provoquer une dénaturation et une coagulation des protéines, une augmentation de la perméabilité des membranes cellulaires ou une libération de toxines à proximité immédiate de points chauds.

À 6 GHz et plus, les champs électromagnétiques ne pénètrent pas de manière significative dans le corps et l'échauffement, qui en résulte, est en grande partie confiné aux tissus superficiels et à la peau.

Les champs de radiofréquences pulsés peuvent donner lieu à une perception sensorielle sous la forme d'une audition micro-onde. Les personnes ayant une audition normale peuvent percevoir des champs modulés par impulsions à des fréquences

comprises entre 200 MHz et 6,5 GHz. Habituellement, cet effet est décrit comme un bourdonnement, un craquement ou un bruit sec, selon les caractéristiques de modulation du champ. Les durées typiques d'impulsion entraînant ces effets sont de l'ordre de quelques dizaines de microsecondes.

En résumé, les effets biologiques des champs de haute fréquence ne sont dangereux que si l'intensité du rayonnement est plutôt élevée. Dans le cas de la plupart des expositions environnementales aux hautes fréquences, en particulier les antennes des stations de base radio et les téléphones cellulaires, l'intensité ne dépasse généralement pas les limites d'exposition adoptées.

4.5 Les champs électromagnétiques et le cancer

Un nombre considérable de rapports épidémiologiques, réalisés notamment au cours des années 1980 et 1990, indiquaient qu'une exposition à long terme à des champs magnétiques de 50/60 Hz pourrait être associée au risque de cancer [8]. En général, les associations initialement observées entre les champs magnétiques 50/60 Hz et divers types de cancer n'ont pas été confirmées. Cependant, il existe des preuves d'une relation entre les champs d'extrêmement basses fréquences (ELF) et la leucémie infantile [19 - 23]. De plus, le manque de preuves cohérentes dans les études expérimentales affaiblit la conviction selon laquelle cette association est due aux champs ELF. Compte tenu des preuves épidémiologiques disponibles concernant l'exposition aux ELF, la conclusion est qu'il n'existe aucune preuve solide associant l'exposition aux champs électriques et magnétiques au cancer.

L'évaluation des champs ELF du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) de l'Organisation mondiale de la santé [9], publiée en juin 2002, a classé les champs magnétiques à fréquence industrielle comme potentiellement cancérigènes pour l'homme (groupe 2B). Selon la même monographie [9], les champs électriques et magnétiques statiques et les champs électriques d'extrêmement basses fréquences ne sont pas classifiables quant à leur cancérigénicité chez l'homme (groupe 3). Selon la monographie du CIRC publiée en mai 2011 [10], les champs de radiofréquences sont classés comme potentiellement cancérigènes pour l'homme (groupe 2B). La catégorie 2B est uti-

lisée pour les agents pour lesquels il existe peu de preuves de cancérigénicité chez l'homme et des preuves moins que suffisantes de cancérigénicité chez les animaux de laboratoire.

Malgré de nombreuses études [28 - 35], les preuves d'un quelconque effet restent très controversées. Cependant, si les champs électromagnétiques ont un effet sur le cancer, toute augmentation du risque sera extrêmement faible. Les résultats obtenus à ce jour contiennent de nombreuses incohérences, mais aucune augmentation importante du risque de cancer n'a été constatée chez les enfants ou les adultes.

4.6 La stimulation de champs électromagnétiques et de nerfs

Selon la publication de « La base neurobiologique pour les guides sur les fréquences extrêmement basses, 2007 » [12] et la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) 2010 concernant les lignes directrices sur les basses fréquences [13], l'exposition aux CEM peut induire des champs électriques dans le corps permettant, pour des fréquences allant jusqu'à 10 MHz, de stimuler les nerfs. L'effet de cette stimulation varie en fonction de la fréquence. À mesure que la fréquence augmente, les effets d'échauffement prédominent et la probabilité de stimulation nerveuse diminue.

4.7 Les CEM et les modifications de la perméabilité des membranes cellulaires

Les CEM pulsés intenses et brefs peuvent rendre les membranes cellulaires perméables, ce qui peut à son tour entraîner d'autres changements cellulaires. Selon la publication de 2015 sur la perméabilité des coques à Gram positif par les CEM [15], il a été démontré que des changements de perméabilité membranaire se produisent avec une exposition aux ondes continues à 18 GHz. Des niveaux d'exposition significativement plus élevés, que ceux requis pour provoquer des dommages induits thermiquement ou une stimulation nerveuse, sont nécessaires pour que cet effet se produise. Par conséquent, il est prévu que les restrictions sur les stimulations nerveuses et l'augmentation de la température soient suffisantes pour garantir que les changements de perméabilité ne se produisent pas.

4.8 Les CEM et l'augmentation de la température

À des fréquences plus élevées, par exemple les radiofréquences, les CEM peuvent générer de la chaleur dans le corps. Pour des niveaux d'exposition très faibles comparables aux restrictions de base fournies dans l'ICNIRP 2010 [7], il existe de nombreuses preuves que la quantité de chaleur générée n'est pas suffisante pour causer des dommages, mais des conclusions limitées de recherche sont disponibles pour les niveaux d'exposition supérieurs aux niveaux de restriction de base de l'ICNIRP 2010.

Il convient de noter que les guides de l'ICNIRP 2020, comme d'autres guides sur les CEM, restreint l'exposition aux CEM de radiofréquence pour limiter l'augmentation de température plutôt que de limiter la température absolue. La température absolue est la raison principale de l'effet sur la santé ; cependant, cela ne dépend pas uniquement de l'exposition aux CEM, car d'autres facteurs tels que les conditions météorologiques, les vêtements et le rythme de travail y contribuent également. Pour cette raison, l'objectif des guides est de limiter l'augmentation significative de la température. Lorsque d'autres sources de chaleur sont présentes, par exemple l'environnement de travail, il est recommandé que les travailleurs disposent d'un moyen approprié pour vérifier leur température corporelle [17].

Lorsque la fréquence des CEM augmente, l'exposition du corps et l'échauffement qui en résulte deviennent plus superficiels. Selon les travaux de Sasaki et autres [16], à des fréquences supérieures à 6 GHz, cet échauffement se produit principalement à l'intérieur de la peau en raison de l'effet de la profondeur de pénétration cutanée à des fréquences plus élevées. Les travaux ont montré que 86% de l'énergie à 6 et 300 GHz est respectivement absorbée à moins de 0,2 mm de la surface. Il existe évidemment d'autres effets possibles sur la santé, qui dépendront de l'étendue et de l'intensité de l'exposition aux CEM. Au fil des années, des limites définies ont été empiriquement établies pour empêcher les principaux effets connus sur la santé ci-dessus de se produire. Ces limites sont spécifiques à la fréquence des champs électromagnétiques, car différents risques surviennent à différentes fréquences. Il est également prévu que le respect de ces limites prévienne aussi d'autres effets néfastes sur la santé. Aucun effet nocif sur la santé n'a été identifié pour une exposition inférieure aux limites spécifiées.

4.9 Les CEM et la fertilité, la reproduction ainsi que le développement de fœtus

Les études de Lindbohm et autres [24] ont montré le lien qui existe entre les champs magnétiques d'extrêmement basses fréquences des unités d'affichage vidéo et les fausses couches. Cependant, les études de Schnorr et autres [25] n'ont pas trouvé une telle relation. Il n'existe pas de données probantes cohérentes sur les problèmes de santé reproductive indésirable chez les femmes travaillant avec des unités d'affichage vidéo. Une étude prospective, incluant un grand nombre de cas et présentant des taux de participation élevés et une évaluation détaillée de l'exposition (Bracken et autres [26]), a révélé que ni le poids à la naissance ni le taux de croissance intra-utérin n'étaient associés à une exposition aux champs de fréquences extrêmement basses. Les effets indésirables n'étaient pas associés à des niveaux d'exposition plus élevés.

Une conclusion similaire peut être tirée pour l'exposition à des fréquences plus élevées, car les études ne présentent aucune preuve cohérente. Alors que certaines des études [37] – [38] suggèrent un risque accru de fausse couche et de malformations congénitales pour les soudeuses de plastique et les physiothérapeutes travaillant avec des appareils de diathermie à ondes courtes, d'autres publications telles que Källén. B. et autres [39], n'ont montré aucun effet statistiquement significatif sur le taux d'avortement ou de malformation fœtale.

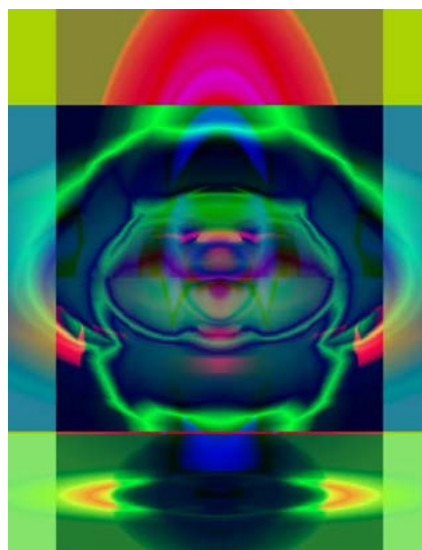


Figure 13 : Développement du fœtus dans un environnement de CEM



Figure 14 : Consignes de sécurité et limites d'exposition

L'approche adoptée dans ces guides pour le contrôle des CEM est conforme à la méthode employée dans les publications de l'ICNIRP.

5 LA PROTECTION

5.1 Aperçu de la protection contre l'exposition aux champs électromagnétiques

La protection des personnes exposées aux champs électromagnétiques (CEM) est l'objectif ultime des normes CEM basées sur la santé. Les guides de sécurité pour l'exposition aux champs électromagnétiques s'appuient sur des effets bien établis basés sur les données expérimentales de systèmes biologiques, sur des études épidémiologiques et humaines ainsi que sur la compréhension des différents mécanismes d'interaction.

Les étapes générales de l'élaboration des normes d'exposition comprennent l'évaluation d'un grand nombre d'ouvrages scientifiques, suivie par la détermination des niveaux seuils, la sélection des facteurs de sécurité appropriés pour les différentes catégories de populations à risque et, enfin, l'établissement des limites d'exposition. La sécurité ou la limite d'exposition est considérée comme le seuil en dessous duquel l'exposition peut être considérée comme sûre selon les connaissances scientifiques disponibles.

Néanmoins, la limite de sécurité ne représente pas une frontière exacte entre la sécurité et le danger, puisque le risque possible pour la santé humaine augmente avec l'augmentation des niveaux d'exposition. Pour une protection efficace contre les effets nocifs de l'exposition, les organismes de réglementation doivent intégrer une marge de sécurité pour tenir compte de l'incertitude, en plus d'établir des limites de sécurité.

5.2 Basic Restriction

Il s'agit de restrictions sur l'exposition aux CEM qui sont directement basées sur des effets établis sur la santé. Dans la gamme de 1 Hz à 100 KHz, la quantité physique utilisée pour spécifier les restrictions de base en matière de l'exposition aux CEM est l'intensité du champ électrique interne E_i , car c'est le champ électrique qui affecte les cellules nerveuses et d'autres cellules sensibles à l'électricité. La gamme de 100 kHz à 10 MHz est considérée comme une gamme intermédiaire. Pour la gamme de 100 kHz à 300 GHz, les restrictions de base portent sur le débit d'absorption spécifique (DAS) moyen du corps.

Notez que pour les restrictions de base décrites ci-dessous, une femme enceinte est considérée

comme un membre du grand public. En effet, des modélisations récentes indiquent que, pour les scénarios d'exposition locale et du corps entier, l'exposition de la mère aux restrictions professionnelles de base peut conduire à des expositions fœtales supérieures aux restrictions générales de base. Les guides prennent en compte un DAS moyen pour l'ensemble de tout le corps de 4W/kg.

L'ensemble des restrictions de base (de l'ICNIRP 2010 et de l'ICNIRP 2020) est présenté dans les tableaux de 3 à 6.

Tableau 3 : Restrictions de base pour l'exposition humaine aux champs électriques et magnétiques à variations temporelles (ICNRP 2010)

Caractéristiques d'exposition	Gamme de fréquences	Champ électrique interne ($V m^{-1}$)
Exposition professionnelle		
Tissu du SNC de la tête	1 Hz–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 de la tête et du corps	1 Hz–3 kHz	0,8
	3 kHz–10 MHz	$2,7 \times 10^{-4}f$
Exposition au grand public		
Tissu du SNC de la tête	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 de la tête et du corps	1 Hz–3 kHz	0,4
	3 kHz–10 MHz	$1,35 \times 10^{-4}f$

Remarques :

- f est la fréquence en Hz.
- Toutes les valeurs sont des valeurs efficaces.
- Dans la gamme de fréquences au-dessus de 100 kHz, des restrictions de base spécifiques aux radio-fréquence doivent également être prises en compte.

Tableau 4 : Restrictions de base pour l'exposition aux champs électromagnétiques de 100 kHz à 10 MHz, pour les valeurs spatiales de crête

Scénario d'exposition	Gamme de fréquence	Champ électrique induit ; E_{ind} ($V m^{-1}$)
Professionnel	100 kHz to 10 MHz	$2,70 \times 10^{-4}f$
Grand public	100 kHz to 10 MHz	$1,35 \times 10^{-4}f$

Remarques : f est la fréquence en Hz.

Tableau 5 : Restrictions de base pour l'exposition aux champs électromagnétiques de 100 kHz à 300 GHz, pour des intervalles moyens de ≥ 6 min (ICNIRP 2020)

Scénario d'exposition	Gamme de fréquences	DAS moyen pour le corps entier (W kg ⁻¹)	DAS local pour la tête / le torse (W kg ⁻¹)	DAS local des extrémités (W kg ⁻¹)	S _{ab} locale (W m ⁻²)
Professionnel	100 kHz to 6 GHz	0,4	10	20	NA
	>6 to 300 GHz	0,4	NA	NA	100
Grand public	100 kHz to 6 GHz	0,08	2	4	NA
	>6 to 300 GHz	0,08	NA	NA	20

Remarques :

1. « NA » signifie « non applicable » et n'a pas besoin d'être pris en compte pour déterminer la conformité.
2. Le DAS moyen du corps entier doit être calculé en moyenne sur une période de 30 min.
3. La moyenne des expositions locales au DAS et au S_{ab} doit être calculée sur une période de 6 minutes.
4. La moyenne du DAS local doit être calculée sur une masse cubique de 10 g.
5. La moyenne de S_{ab} local doit être calculée sur une surface de 4 cm² du corps. Au-dessus de 30 GHz, une contrainte supplémentaire est imposée, de sorte que l'exposition moyenne sur une surface de 1 cm² du corps est limitée à deux fois que celle de la restriction de 4 cm².

Tableau 6 : Restrictions de base pour l'exposition aux champs électromagnétiques de 100 kHz à 300 GHz, pour l'intégration des intervalles de >0 à <6 min. (ICNIRP 2020)

Scénario d'exposition	Gamme de fréquences	AS locale pour la tête / le torse (kJ kg ⁻¹)	AS locale des extrémités (kJ kg ⁻¹)	U _{ab} (kJ m ⁻²) locale
Professionnel	100 kHz to 400 MHz	NA	NA	NA
	>400 MHz to 6 GHz	3,6[0,05+0,95(t/360) ^{0,5}]	7,2[0,025+0,975(t/360) ^{0,5}]	NA
	>6 to 300 GHz	NA	NA	36[0,05+0,95(t/360) ^{0,5}]
Grand public	100 kHz to 400 MHz	NA	NA	NA
	>400 MHz to 6 GHz	0,72[0,05+0,95(t/360) ^{0,5}]	1,44[0,025+0,975(t/360) ^{0,5}]	NA
	>6 to 300 GHz	NA	NA	7,2[0,05+0,95(t/360) ^{0,5}]

Notes:

1. « NA » signifie « non applicable » et n'a pas besoin d'être pris en compte pour déterminer la conformité.
2. *t* est le temps en secondes et les restrictions doivent être respectées pour toutes les valeurs de temps (*t*) comprises entre 0 et 360 sec., quelles que soient les caractéristiques temporelles de l'exposition elle-même.
3. La moyenne de l'AS locale doit être calculée sur une masse cubique de 10 g.
4. La moyenne de l'U_{ab} locale doit être calculée sur une surface de 4 cm² du corps. Au-dessus de 30 GHz, une contrainte supplémentaire est imposée, de sorte que l'exposition moyenne sur une surface de 1 cm² du corps est limitée à 7,2[0,025+0,975(t/360)^{0,5}] pour l'exposition professionnelle et à 14,4[0,025+0,975(t/360)^{0,5}] pour l'exposition du grand public.
5. L'exposition résultant de toute impulsion, de groupe d'impulsions ou de sous-groupe d'impulsions dans un train, ainsi que la somme des expositions (y compris les CEM non pulsés), offerte en un intervalle de temps en secondes, ne doit pas dépasser ces niveaux.

5.3 Le niveau de référence

L'intensité du champ électrique interne est difficile à évaluer. Par conséquent, les niveaux de référence d'exposition sont fournis, à des fins pratiques d'évaluation de l'exposition. La plupart des niveaux de référence sont dérivés de restrictions de base correspondantes à l'aide de techniques de mesure et/ou de calcul, mais certains abordent la perception (champ électrique) et les effets indirects négatifs de l'exposition aux CEM. Les grandeurs dérivées sont l'intensité du champ électrique (E), l'intensité du champ magnétique (H), la densité de flux magnétique (B) et les courants induit dans les extrémités (I_L).

Les grandeurs, qui concernent la perception et d'autres effets indirects, sont les courants de contact et, pour les champs pulsés, l'absorption spécifique (AS). Dans une situation d'exposition particulière, des valeurs mesurées ou calculées de ces grandeurs peuvent être comparées avec le niveau de référence approprié. Le respect du niveau de référence garantira le respect de la restriction de base correspondante. Si la valeur mesurée est supérieure au niveau de référence, il n'en découle pas nécessairement un dépassement de la restriction de base. Toutefois, chaque fois qu'un niveau de référence est dépassé, il est nécessaire de vérifier le respect de la restriction de base pertinente et de déterminer si des mesures de protection supplémentaires sont nécessaires. Ceux-ci sont présentés dans les tableaux 7 à 14.

Tableau 7 : Niveaux de référence pour l'exposition professionnelle à des champs électriques et magnétiques à variations temporelles (valeurs efficaces non perturbées) (ICNIRP 2010)

Gamme de fréquence	Intensité du champ électrique E (kV m ⁻¹)	Intensité du champ magnétique H (A m ⁻¹)	Densité de flux magnétique B (T)
1 Hz–8 Hz	20	$1,63 \times 10^5/f^2$	$0,2/f^2$
8 Hz–25 Hz	20	$2 \times 10^4/f$	$2,5 \times 10^{-2}/f$
25 Hz–300 Hz	$5 \times 10^2/f$	8×10^2	1×10^{-3}
300 Hz–3 kHz	$5 \times 10^2/f$	$2,4 \times 10^5/f$	$0,3/f$
3 kHz–10 MHz	$1,7 \times 10^{-1}$	80	1×10^{-4}

Remarques : f est la fréquence en Hz.

Tableau 8 : Niveaux de référence pour l'exposition du grand public aux champs électriques et magnétiques à variations temporelles (valeurs efficaces non perturbées). (ICNIRP, 2010)

Gamme de fréquences	Intensité du champ électrique E (kV m ⁻¹)	Intensité du champ magnétique H (A m ⁻¹)	Densité de flux magnétique B (T)
1 Hz–8 Hz	5	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
8 Hz–25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$4 \times 10^{-3}/f$
25 Hz–50 Hz	5	$1,6 \times 10^2$	2×10^{-4}
50 Hz–400 kHz	$2,5 \times 10^2/f$	$1,6 \times 10^2$	2×10^{-4}
400 Hz–3 kHz	$2,5 \times 10^2/f$	$6,4 \times 10^4/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
3 kHz–10 MHz	$8,3 \times 10^{-2}$	21	$2,7 \times 10^{-5}$

Remarques : f en Hz.

Tableau 9 : Niveaux de référence pour l'exposition locale aux champs électromagnétiques de 100 kHz à 10 MHz (valeurs efficaces non perturbées), pour les valeurs de crête (ICNIRP 2010)

Scénario d'exposition	Gamme de fréquences	Intensité du champ électrique incident E _{inc} (V m ⁻¹)	Intensité du champ magnétique incident H _{inc} (A m ⁻¹)
Professionnel	100 kHz–10 MHz	170	80
Grand public	100 kHz–10 MHz	83	21

Tableau 10 : Niveaux de référence pour les courants de contact variables dans le temps provenant d'objets conducteurs

Caractéristiques d'exposition	Gamme de fréquences	Courant de contact maximum (mA)
Exposition professionnelle	Up to 2,5 kHz	1,0
	2,5–100 kHz	$0,4f$
	100 kHz–10 MHz	40
Exposition générale	Up to 2,5 kHz	0,5
	2,5–100 kHz	$0,2f$
	100 kHz–10 MHz	20

Remarques : f est la fréquence en kHz.

Tableau 11 : Niveaux de référence d'exposition, moyennés sur 30 min. et sur le corps entier, aux champs électromagnétiques de 100 kHz à 300 GHz (valeurs efficaces non perturbées) (ICNIRP 2020)

Scénario d'exposition	Gamme de fréquences	Intensité du champ électrique induit E_{inc} (V m ⁻¹)	Intensité du champ magnétique induit H_{inc} (A m ⁻¹)	Densité de puissance incidente S_{inc} (W m ⁻²)
Professionnel	0,1–30 MHz	$660/f_M^{0,7}$	$4,9/f_M$	NA
	>30–400 MHz	61	0,16	10
	>400–2000 MHz	$3/f_M^{0,5}$	$0,008/f_M^{0,5}$	$f_M/40$
	>2–300 GHz	NA	NA	50
Grand public	0,1–30 MHz	$300/f_M^{0,7}$	$2,2/f_M$	NA
	>30–400 MHz	27,7	0,073	2
	>400–2000 MHz	$1,375/f_M^{0,5}$	$0,0037/f_M^{0,5}$	$f_M/200$
	>2–300 GHz	NA	NA	10

Remarques :

- « NA » signifie « non applicable » et n'a pas besoin d'être pris en compte pour déterminer la conformité.
- f_M est la fréquence en MHz.
- La moyenne de S_{inc} , E_{inc} ou H_{inc} doit être calculée sur une période de 30 min., sur l'espace du corps entier. La moyenne temporelle et spatiale de E_{inc} et H_{inc} doit être effectuée en faisant la moyenne des valeurs carrées correspondantes.
- Pour les fréquences de 100 kHz à 30 MHz, quelles que soient les distinctions entre les zones de champ lointain et de champ proche, la conformité est démontrée si ni E_{inc} ni H_{inc} ne dépassent pas les valeurs de niveau de référence ci-dessus.
- Pour les fréquences de >30 MHz à 2 GHz : a) à l'intérieur de la zone de champ lointain : la conformité est démontrée si l'un des S_{inc} , E_{inc} ou H_{inc} ne dépasse pas les valeurs de niveau de référence ci-dessus (une seule est requise).
- Pour les fréquences comprises entre >2 GHz et 300 GHz : a) à l'intérieur de la zone de champ lointain : la conformité est démontrée si S_{inc} ne dépasse pas les valeurs de niveau de référence ci-dessus.

Tableau 12 : Niveaux de référence d'exposition locale, moyennée sur 6 min., aux champs électromagnétiques de 100 kHz à 300 GHz (valeurs efficaces non perturbées) (ICNIRP 2020)

Scénario d'exposition	Gamme de fréquences	Intensité du champ électrique induit E_{inc} (V m ⁻¹)	Intensité du champ magnétique induit H_{inc} (A m ⁻¹)	Densité de puissance incidente S_{inc} (W m ⁻²)
Professionnel	0,1–30 MHz	$1504/f_M^{0,7}$	$10,8/f_M$	NA
	>30–400 MHz	139	0,36	50
	>400–2000 MHz	$10,58/f_M^{0,43}$	$0,0274/f_M^{0,43}$	$0,29/f_M^{0,86}$
	>2–6 GHz	NA	NA	200
	>6–<300 GHz	NA	NA	$275/f_G^{0,177}$
	300 GHz	NA	NA	100
Grand public	0,1–30 MHz	$671/f_M^{0,7}$	$4,9/f_M$	NA
	>30–400 MHz	62	0,163	50
	>400–2000 MHz	$4,72/f_M^{0,43}$	$0,0123/f_M^{0,43}$	$0,058/f_M^{0,86}$
	>2–6 GHz	NA	NA	40
	>6–<300 GHz	NA	NA	$55/f_G^{0,177}$
	300 GHz	NA	NA	20

Remarques :

- « NA » signifie « non applicable » et n'a pas besoin d'être pris en compte pour déterminer la conformité.
- f_M est la fréquence en MHz; f_G est la fréquence en GHz.
- La moyenne de S_{inc} , E_{inc} et H_{inc} doit être calculée sur une période de 6 min. et lorsque la moyenne spatiale est spécifiée dans les remarques 6 et 7, sur l'espace corporel projeté correspondant. La moyenne temporelle et spatiale de chacun des valeurs E_{inc} et H_{inc} doit être effectuée en faisant la moyenne sur les valeurs carrées correspondantes.
- Pour les fréquences comprises entre 100 kHz et 30 MHz, quelles que soient les distinctions entre les zones de champ lointain et de champ proche, la conformité est démontrée si ni l' E_{inc} spatial de crête ni l' H_{inc} spatial de crête, au-dessus de l'espace projeté du corps entier, ne dépassent pas les valeurs de niveau de référence ci-dessus.
- Pour les fréquences comprises entre >30 MHz et 6 GHz : a) à l'intérieur de la zone de champ lointain, la conformité est démontrée si l'un des S_{inc} , E_{inc} et H_{inc} spatiaux de crête, au-dessus de l'espace projeté du corps entier, ne dépasse pas les valeurs de niveau de référence ci-dessus (une seule est requise).
- Pour les fréquences de >6 GHz à 300 GHz : a) à l'intérieur de la zone de champ lointain, la conformité est démontrée si S_{inc} , moyenné sur une surface corporelle projetée de 4 cm², ne dépasse pas les valeurs de niveau de référence ci-dessus.
- Pour les fréquences de >30 GHz à 300 GHz, l'exposition moyenne sur une surface corporelle projetée de 1 cm² ne doit pas dépasser le double de celle des restrictions de 4 cm².

Tableau 13 : Niveaux de référence d'exposition locale, intégrés sur des intervalles compris entre >0 et <6 minutes, aux champs électromagnétiques de 100 kHz à 300 GHz (valeurs efficaces non perturbées) (ICNIRP 2020)

Exposure scenario	Frequency range	Incident energy density; U_{inc} (kJm ⁻²)
Occupational	100 kHz–400 MHz	NA
	>400 MHz–2000 MHz	$0,29/f_M^{0,86} \times 0,36 [0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	>2–6 GHz	$200 \times 0,36 [0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	>6–<300 GHz	$275/f_G^{0,177} \times 0,36 [0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	300 GHz	$100 \times 0,36 [0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
General public	100 kHz–400 MHz	NA
	>400 MHz–2000 MHz	$0,058/f_M^{0,86} \times 0,36 [0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	>2–6 GHz	$40 \times 0,36 [0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	>6–<300 GHz	$55/f_G^{0,177} \times 0,36 [0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	300 GHz	$20 \times 0,36 [0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$

Remarques :

- « NA » signifie « non applicable » et n'a pas besoin d'être pris en compte pour déterminer la conformité.
- f_M est la fréquence en MHz ; f_G est la fréquence en GHz ; t est un intervalle de temps en secondes, de sorte que l'exposition à toute impulsion, de groupe d'impulsions ou de sous-groupe d'impulsions dans un train, ainsi que la somme des expositions (y compris les CEM non pulsés), effectuée en intervalle de temps en secondes, ne doit pas dépasser ces valeurs de niveau de référence.
- L' U_{inc} doit être calculé sur une période de temps (t) sur l'espace corporel projeté correspondant, lorsqu'une moyenne spatiale est spécifiée.
- Pour les fréquences de 100 kHz à 400 MHz, il n'est pas nécessaire d'imposer les restrictions de >0 à <6 min et les niveaux de référence n'ont donc pas été définis.
- Pour les fréquences de >400 MHz à 6 GHz : a) à l'intérieur de la zone de champ lointain : la conformité est démontrée si l' U_{inc} spatial de crête, sur l'espace projeté du corps entier, ne dépasse pas les valeurs de niveau de référence ci-dessus ; U_{eq} peut être substitué à U_{inc} ; b) à l'intérieur de la zone de champ proche radiatif, la conformité est démontrée si l' U_{inc} spatial de crête, au-dessus de l'espace projeté du corps entier, ne dépasse pas les valeurs de niveau de référence ci-dessus ; et, c) à l'intérieur de la zone de champ proche réactif, les niveaux de référence ne peuvent pas être utilisés pour déterminer la conformité et les restrictions de base doivent donc être évaluées.
- Pour les fréquences de >6 GHz à 300 GHz : a) à l'intérieur de la zone de champ lointain ou de champ proche radiatif, la conformité est démontrée si l' U_{inc} moyenné sur une surface corporelle projetée de 4 cm², ne dépasse pas les valeurs de niveau de référence ci-dessus ; b) à l'intérieur de la zone de champ proche réactif, les niveaux de référence ne peuvent pas être utilisés pour déterminer la conformité et les restrictions de base doivent donc être évaluées.
- Pour les fréquences comprises entre >30 GHz et 300 GHz : l'exposition moyenne sur une surface corporelle projetée de 1 cm² ne doit pas dépasser $275/f_G^{0,177} \times 0,72 [0,025+0,975(t/360)^{0,5}]$ kJ/m² pour l'exposition professionnelle et $55/f_G^{0,177} \times 0,72 [0,025+0,975(t/360)^{0,5}]$ kJ/m² pour l'exposition du grand public.

Les courants de contact de seuils, qui provoquent des réponses biologiques chez les enfants et les femmes adultes, sont respectivement d'environ la moitié et des deux tiers de ceux des hommes adultes. Pour la gamme de fréquences de 100 kHz à 110 MHz, des niveaux de référence sont fournis pour les courants induits dans les extrémités, qui sont inférieurs aux restrictions de base sur le DAS localisé.

Tableau 14 : Niveaux de référence pour le courant induit dans n'importe quel extrémité, moyenné sur une période de 6 minutes, à des fréquences comprises entre 100 kHz et 110 MHz (ICNIRP 2020)

Scénario d'exposition	Gamme de fréquences	Courant électrique I (mA)
Professionnel	100 kHz–110 MHz	100
Grand public	100 kHz–110 MHz	45

Remarques :

- Les valeurs d'intensité de courant doivent être déterminées en faisant la moyenne sur les valeurs carrées correspondantes.
- L'intensité des courants induits dans les extrémités doit être évaluée séparément pour chaque extrémité.
- Les niveaux de référence des courants induits dans les extrémités ne sont pas fournis pour toute autre gamme de fréquences.
- Les niveaux de référence des courants induits dans les extrémités ne sont requis que dans les cas où le corps humain n'est pas isolé électriquement d'un plan de masse.

6 LES SCÉNARIOS RÉELS

La croissance de la consommation en énergie électrique et en nouvelles technologies de télécommunications et des TIC a entraîné une augmentation de l'exposition aux champs électromagnétiques. Par exemple, les lignes de transmission de l'énergie électrique jadis dans les zones éloignées se retrouvent aujourd'hui dans les zones urbanisées et très développées. De même pour assurer la couverture réseaux des systèmes de communication, des antennes sont installées dans des zones urbanisées et très développées et le plus souvent sur les toits des immeubles d'habitations.

Les champs électromagnétiques générés par ces différents systèmes peuvent constituer un véri-

table danger pour les personnes vivant à proximité. De plus, en hautes fréquences, ces appareils fonctionnent à des fréquences variables, souvent en GHz, des mesures de sécurité sont nécessaires afin de s'assurer que l'exposition à des niveaux nocifs de CEM est évitée. Une mesure de sécurité courante consiste à déterminer une distance de protection par rapport à la source de CEM au-delà de laquelle le niveau de CEM a été estimé ou considéré comme sûr.

Dans cette section, les résultats d'études existantes ainsi que l'évaluation de l'émission électromagnétique de ces sources typiques de CEM sont présentés.



6.1 Le premier cas : les appareils électromagnétiques

Les appareils électriques et électroniques (équipements non radio) peuvent produire différents niveaux de champs électriques et magnétiques. Ce sont des émetteurs non intentionnels mais capables de générer des CEM en raison du fonctionnement des composants du circuit actif et de l'alimentation électrique.

Comme décrit précédemment dans ce document, l'amplitude de ces champs est plus élevée

aux endroits plus proches de l'appareil. Pour ces appareils, les champs magnétiques prédominants sont des champs à fréquence d'alimentation (50Hz). Le niveau d'émissions des différents appareils ne dépend pas de la taille ou de la complexité. Les fabricants et les concepteurs intègrent souvent diverses méthodes de câblage électromagnétique afin de minimiser ces émissions. Un vieil appareil générera probablement des émissions plus élevées.

Ces dernières années, les autorités nationales de différents pays ont effectué de nombreuses

mesures pour évaluer les niveaux de champ électromagnétique dans l'environnement quotidien. Aucune de ces enquêtes n'a conclu que les niveaux de champs pourraient avoir des effets néfastes sur la santé. Selon l'OMS [51], la publication de 1999 de l'Office fédéral de radioprotection en Allemagne a fourni des valeurs (comme indiqué dans les tableaux 15 et 16) pour les champs électriques et magnétiques produits par des appareils typiques.

Tableau 15 : Les intensités de champ électrique typiques (à 50 Hz) mesurées à proximité d'appareils électroménagers (à une distance de 30 cm)

Appareil électrique	Intensité du champ électrique Vm^{-1}
Récepteur stéréo	180
Fer	120
Réfrigérateur	120
Mixeur	100
Grille-pain	80
Séchoir à cheveux	80
TV couleur	80
Machine à café	60
Aspirateur	50
Four électrique	8
Lampe	5

La limite d'exposition aux CEM à fréquence d'alimentation de 50Hz pour le champ électrique est de $5000 Vm^{-1}$. Par conséquent, la limite d'exposition aux champs électriques - à 30 cm de ces appareils - ne doit pas être dépassée.

Tableau 16 : Les intensités de champ magnétique typiques (à 50 Hz) des appareils électroménagers à différentes distances

Appareil électrique	Distance de 3 cm (μT)	Distance de 30 cm (μT)	Distance de 1 m (μT)
Séchoir à cheveux	6-2000	0,01-7	0,01-0,03
Rasoir électrique	15-1500	0,08-9	0,01-0,03
Aspirateur	200-800	2-20	0,13-2
Lumière fluorescente	40-400	0,5-2	0,02-0,25
Four à micro-ondes	73-200	4-8	0,25-0,6
Radio portable	16-56	1	<0,01
Four électrique	1-50	0,15-0,5	0,01-0,04
Machine à laver	0,8-50	0,15-3	0,01-0,15
Fer	8-30	0,12-0,3	0,01-0,03
Lave-vaisselle	3,5-20	0,6-3	0,07-0,3
Ordinateur	0,5-30	<0,01	-
Réfrigérateur	0,5-1,7	0,01-0,25	<0,01
TV couleur	2,5-50	0,04-2	0,01-0,15

La limite d'exposition aux CEM à fréquence d'alimentation de 50 Hz pour le champ magnétique est de $200 \mu T$ pour le public. Cela montre que la limite de 30 cm ne doit pas être dépassée et que les champs aussi diminuent rapidement avec la distance.



6.2 Le deuxième cas : les lignes électriques à haute tension (HT)

Les lignes électriques à haute tension (HT) aériennes et souterraines sont souvent utilisées pour le transport et la distribution de l'énergie électrique depuis les centres de production jusqu'aux consommateurs. Ces lignes produisent des champs électriques et magnétiques, avec des champs relativement élevés.

L'exemple présenté dans cette évaluation est un système triphasé, tel qu'indiqué dans la figure 16. Le tableau 17 indique les paramètres de la ligne à haute tension 1 (LHT1) et de la ligne à haute tension 2 (LHT2).

Tableau 17 : Paramètres de la ligne à haute tension

	Tension (kV)	Courant (A)	Affaissement (m)	Portée (m)
HVL1	161	485	9.6	400
HVL2	400	2000	9.6	400



Figure 16 : Ligne de transmission à haute tension L220 de la Communauté électrique du Bénin (CEB)

Les figures suivantes montrent les résultats de mesure des champs électriques et magnétiques obtenus sous les lignes aériennes de transmission à une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol. Les figures 17 et 19 montrent respectivement le profil latéral du champ électrique et du champ magnétique en fonction des distances. Les figures 18, 20, 21 et 22 montrent la distribution des champs électriques et magnétiques dans le plan des lignes aériennes de transmission [53] [54].

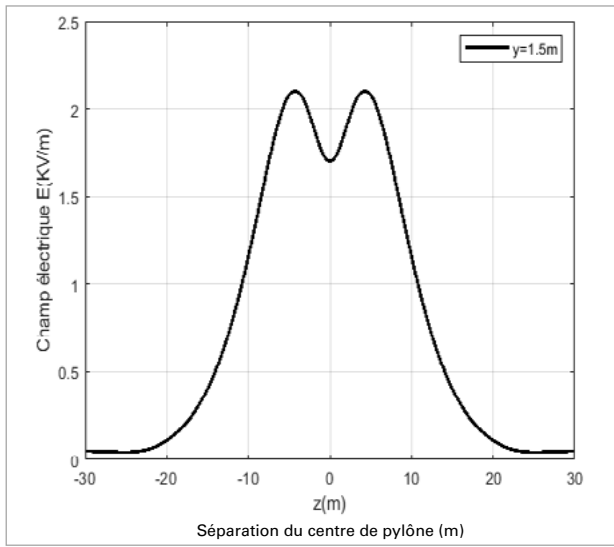


Figure 17 : Profil du champ électrique sous une ligne de 161 kV, 50 Hz, à une hauteur de 1,5 m du sol, Affaissement = 9,68 m (De : Romaric Adegbola, 2022)

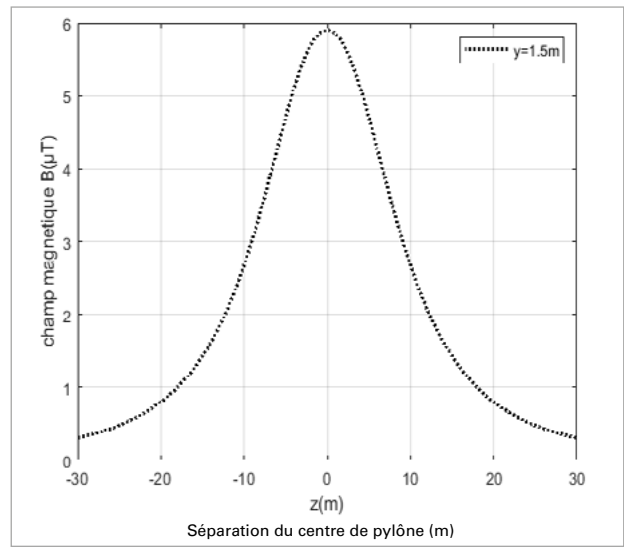


Figure 19 : Profil de distribution des champs magnétiques sous une ligne de 485 A, 50 Hz, à une hauteur de 1,5 m du sol, Affaissement = 9,68 m (De : Romaric Adegbola, 2022)

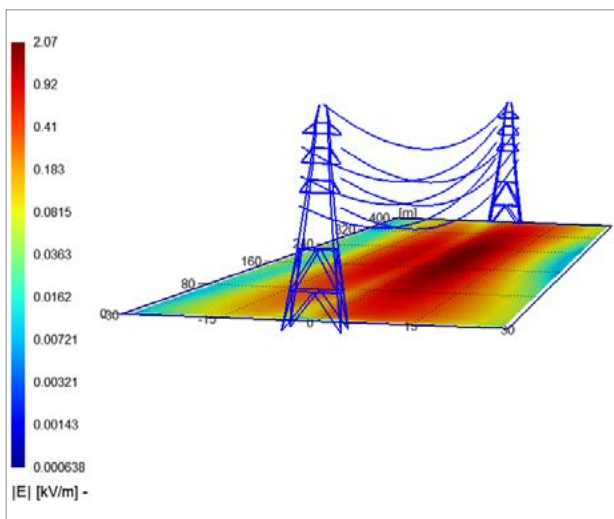


Figure 18 : Profil de distribution du champ électrique sous une ligne de 161 kV, 50 Hz, à une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol, affaissement = 9,68 m (De : Romaric Adegbola, 2022)

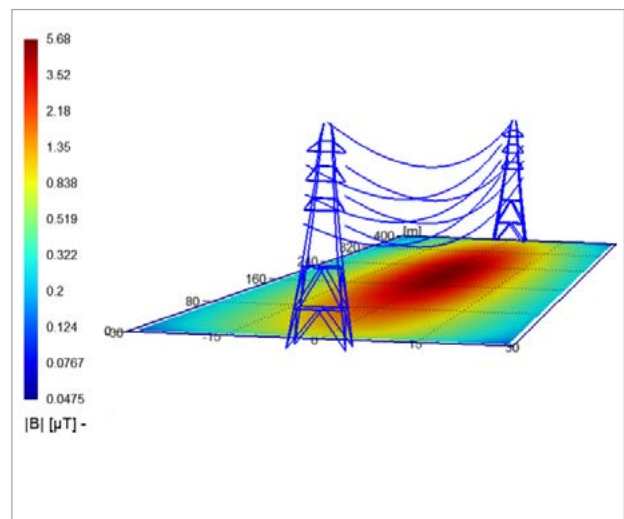


Figure 20 : Profil de distribution des champs magnétiques sous une ligne de 485 A, 50 Hz, à une hauteur de 1,5 m du sol, Affaissement = 9,68 m (De : Romaric Adegbola, 2022)

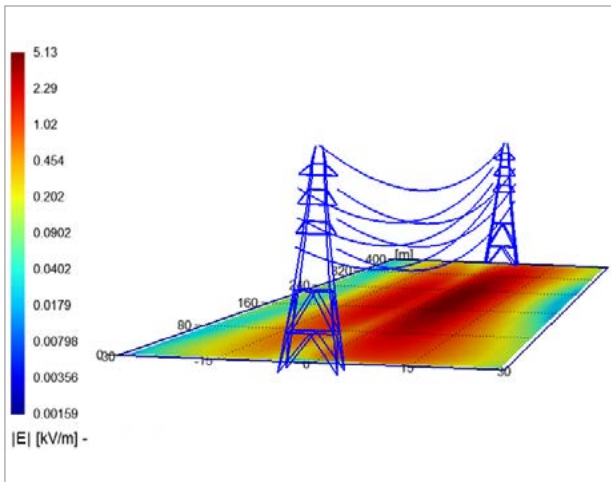


Figure 21 : Profil de distribution des champs électriques sous une ligne de 400 kV, 50-Hz, à une hauteur de 1.5m du sol, Affaissement = 9,68 m (De : Romaric Adegbola, 2022)

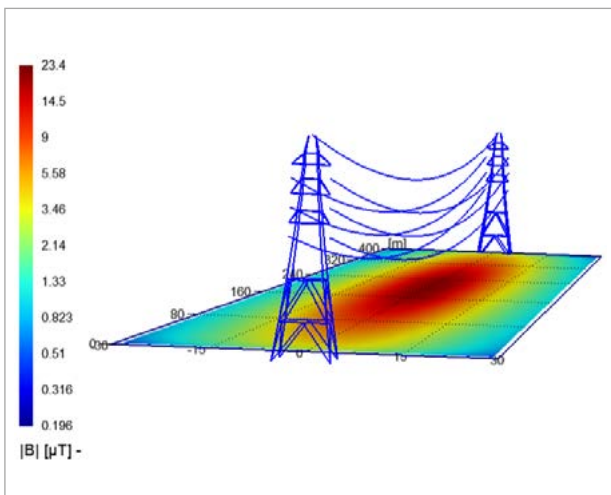


Figure 22 : Profil de distribution des champs magnétiques sous une ligne de 2000 A, 50Hz, à une hauteur de 1.5m du sol, Affaissement = 9,68 m (De : Romaric Adegbola, 2022)

La mesure des champs électriques et magnétiques a révélé qu'il y avait certaines zones à proximité des lignes aériennes de transmission à haute tension où l'intensité des champs électriques et magnétiques a dépassé les maximum valeurs d'exposition autorisées pour le grand public ou pour les travailleurs. Cependant, les champs électriques et magnétiques diminuent en fonction de la distance entre la source et le point de mesure du champ. En outre, le champ électrique produit est fonction de la tension appliquée sur le conducteur de phase et le champ magnétique produit est fonction du courant circulant dans le conducteur de phase. De plus, les demandes de charge influencent les valeurs du champ magnétique.

Contrairement à un champ électrique, un champ magnétique est plus pénétrant et très difficile à s'en protéger. Il pénètre facilement dans le corps humain et, dans le cas d'un champ alternatif ou rotatif, il induit des courants circulants ou de Foucault qui ne sont pas conduits à la terre.

En principe, ces champs magnétiques peuvent induire des courants électriques dans le corps et pourraient induire des effets via les mêmes mécanismes que les courants produits par les champs électriques.

De plus, les résultats montrent comment le champ diminue à mesure qu'on s'éloigne du pylône.

Tableau 18 : Les distances de protection pour les lignes électriques.

Limites du champ magnétique	Lignes de contour, dBμ (A/m)	Distance de protection
100μT (pour le grand public défini dans l'ICNIRP 1998, recommandation du Conseil 1999/519/CE)	158,02	3m from the nearest phase conductor (about 23m from the centre of the pylon)
1000μT (pour les travailleurs définis dans la directive 2013/35/UE)	178,02	Non dépassé

Tableau 19 : Les limites d'exposition aux champs électriques et magnétiques à basse fréquence (50 Hz) ICNIRP (2010)

	Limites d'exposition résidentielles	Lieu de travail/ industrie Les limites d'exposition
Champ électrique	5kV/m	10kV/m
Champ magnétique	200μT	1000μT



6.3 Le troisième cas : les systèmes radio

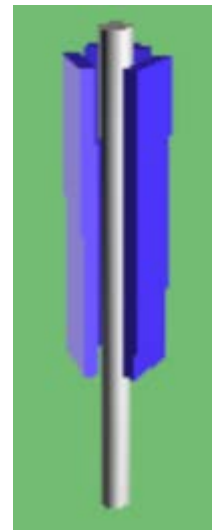
Il s'agit principalement d'émetteurs hautes fréquences et comprennent des équipements radio fixes et mobiles. À leurs fréquences de fonctionnement, les deux champs sont couplés. Ainsi, pour cette évaluation, l'un ou l'autre des champs peut être utilisé pour caractériser l'exposition électromagnétique.

Les fournisseurs d'équipements radio sont tenus de répondre à certains critères de sécurité, ce qui est crucial en particulier pour les équipements radio mobiles, car la proximité et la durée d'utilisation par la plupart des utilisateurs finaux peuvent augmenter le risque. Par exemple, la directive européenne 2014/53/UE sur les équipements radio exige la protection des utilisateurs finaux contre les problèmes de santé, avec l'obligation imposée aux importateurs. Pour le cas présenté dans cette étude, les paramètres de l'émetteur sont les suivants, 40 W de puissance, 17 (dBi) de gain, des fréquences de 900-1800-2200-2600 MHz, 0,5m de longueur et 27m d'hauteur du pylône.

Photo de l'antenne sectorielle



Modèle simulé d'antenne sectorielle



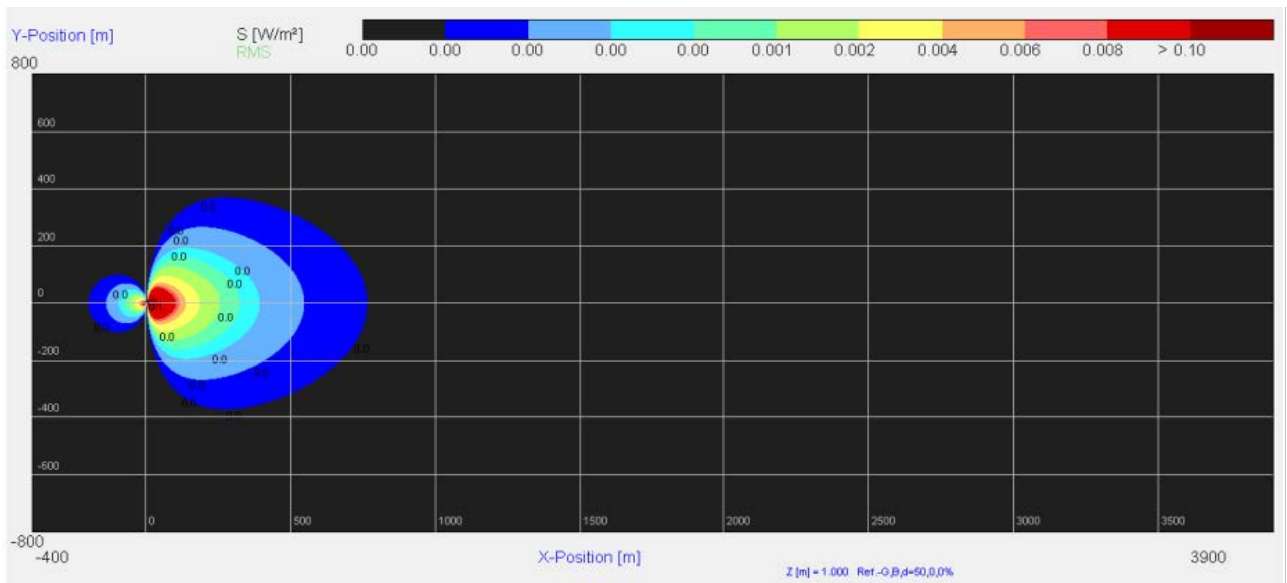


Figure 23 : Le diagramme de densité de puissance rayonnée d'une antenne mono-sectorielle dans le plan XY

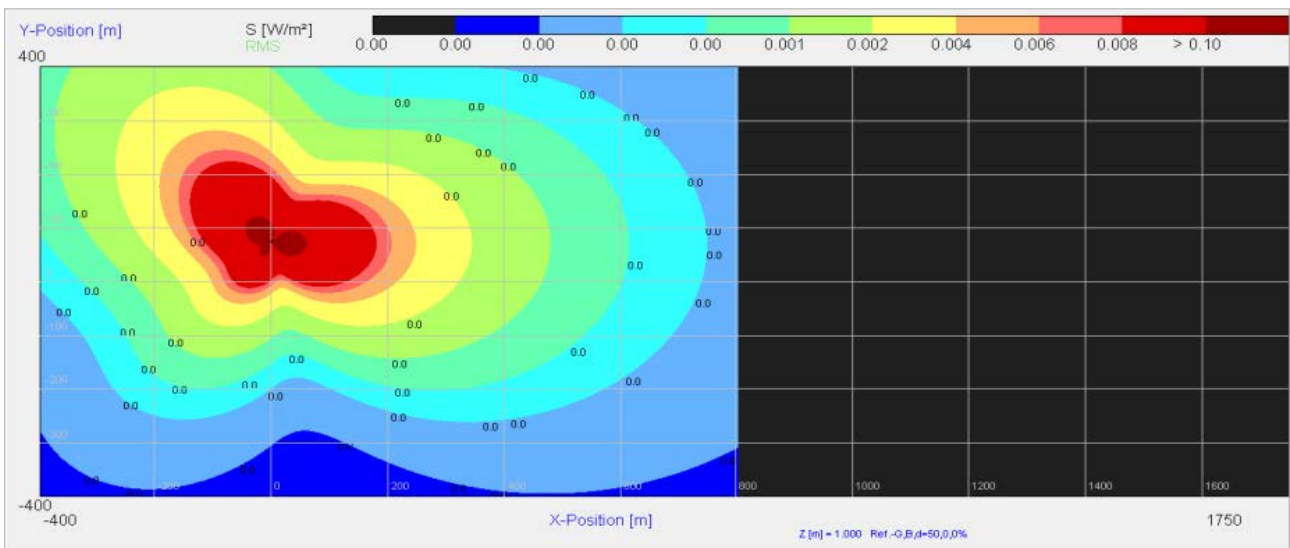


Figure 24 : Profil du champ électromagnétique pour une antenne à ondes radio, longueur = 0,5m, hauteur du pylône = 27m, fréquences = 900-1800-2200-2600 MHz, puissance = 40W, gain (dBi) = 17. (De : Romaric Adegbola, 2018)

Tableau 20 : La limitation électromagnétique de l'exposition aux hautes fréquences ICNIRP (2020)

Gammes de fréquences	Champ électrique	Champ magnétique	Densité de puissance
0,1-30 MHz	$671 / f_M^{0,7}$	$4,49 / f_M$	-
30-400MHz	62	0,163	10
400-2000MHz	$4,72 / f_M^{0,43}$	$0,123 / f_M^{0,43}$	$0,058 / f_M^{0,86}$

Dans les hautes fréquences, la distance de protection autour de l'antenne dépend des paramètres de l'antenne. Le tableau indique la distance de protection en fonction des paramètres de l'émetteur.

Les résultats de cette étude d'exposition aux champs électromagnétiques, les résumés dans le tableau 21, sont tirés de l'étude d'impact environnemental du ministère du numérique de la République du Bénin dans le cadre du projet d'installations des émetteurs radio TNT (étude réalisée par Romaric Adegbola et Amevi Acakpovi en 2017).

Les résultats pour les champs électromagnétiques générés par les antennes montrent que les émetteurs radio tel que les émetteurs TNT, Radiodiffusion, Télévision et les téléphones mobiles, constituent une menace pour les personnes exposées directement aux faisceaux des champs électromagnétiques. Il est recommandé de limiter la durée d'utilisation du téléphone mobile. Sur la base de l'examen des travaux existants et de l'évaluation réalisée par l'AFSEC, on résume ce qui suit :

- Les appareils électriques diffèrent considérablement de l'intensité des champs qu'ils génèrent. Les niveaux de champ électrique et magnétique diminuent rapidement avec la distance par rapport aux appareils. De toute manière, les champs entourant les appareils électroménagers sont généralement bien en deçà des limites recommandées.
- Aux postes de travail, les champs électriques et magnétiques des téléviseurs et des écrans d'ordinateur sont des centaines de milliers de fois inférieurs aux niveaux recommandés.
- Les fours à micro-ondes répondant aux spécifications standard ne présentent aucun risque sur la santé.
- Tant que l'accès du public aux installations radar, aux antennes de radiodiffusion et aux stations de base de téléphonie mobile sera limité, les limites d'exposition recommandées pour les champs de radiofréquences ne seront pas dépassées.
- L'utilisateur d'un téléphone portable rencontre des niveaux de champ qui sont beaucoup plus élevés que n'importe quel niveau dans l'environnement quotidien. Cependant, même ces niveaux accrus ne semblent pas générer d'effets nocifs.
- De nombreuses enquêtes ont démontré que l'exposition aux niveaux de champs électromagnétiques est extrêmement faible dans l'environnement quotidien.

Tableau 21 : La distance de protection en fonction des paramètres de l'antenne

	Énergie (w)	Gain (dBi)	Fréquence (MHz)	Champ électrique (à ne pas dépasser)	Protection distance (m)	Electric field (measured) V/m (at 10m from antenna)
Antenne 1	3000	15,75	570	33	48	27,3
Antenne 2	3000	17,55	570	33	58	33,6
Antenne 3	1000	13,95	570	33	22	12,8
Antenne 4	1000	13,95	570	33	22	12,8
Antenne 5	3000	15,75	498	31	56	27,3
Antenne 6	1000	10,15	538	32	16	8,3

7 LES MESURES DE PROTECTION SUPPLÉMENTAIRES

L'ATC 77 note que les industries provoquant une exposition aux champs électriques et magnétiques sont responsables de garantir le respect de tous les aspects des guides. Les mesures de protection des travailleurs comprennent des contrôles techniques et administratifs, des programmes de protection individuelle et une surveillance médicale. Des mesures de protection appropriées doivent être mises en œuvre lorsque l'exposition sur le lieu de travail entraîne un dépassement des restrictions de base. Tout d'abord, des contrôles techniques devraient être entrepris dans la mesure du possible afin de réduire les émissions de champs par les appareils à des niveaux acceptables. Ces contrôles comprennent une bonne conception de la sécurité et, si nécessaire, l'utilisation de verrouillage ou de mécanismes similaires de protection de la santé.

Les contrôles administratifs, tels que les restrictions d'accès et l'utilisation d'avertissements sonores et visuels, devraient être utilisés conjointement avec les contrôles techniques. Les mesures de protection individuelle, telles que les vêtements de protection, doivent être considérées comme un dernier recours pour assurer la sécurité du travailleur, bien que ceux sont utiles dans certaines circonstances ; la priorité devrait être accordée aux contrôles techniques et administratifs autant que possible. En outre, lorsque des articles tels que les gants isolants sont utilisés pour protéger les personnes contre les chocs à haute fréquence et les brûlures, les restrictions de base ne doivent pas être dépassées, car l'isolation ne protège que contre les effets indirects des champs.

À l'exception des vêtements de protection et autres outils de protection individuelle, les mêmes mesures peuvent être appliquées au grand public chaque fois qu'il existe un risque de dépassement des seuils de référence pour le grand public. Il est également essentiel d'établir et de mettre en œuvre des règles qui empêcheront :

- L'interférence avec les équipements et les appareils électroniques médicaux (y compris les stimulateurs cardiaques) ;

- La détonation des dispositifs électro-explosifs (détonateurs) ; et
- Les incendies et les explosions résultant de l'inflammation de matériaux inflammables par des étincelles provoquées par des champs induits, des courants de contact ou des décharges d'étincelles.

8 CONCLUSION

En résumé, ce guide sur l'exposition aux CEM résume de nombreux faits sur l'exposition aux CEM, leurs conséquences pour l'homme, les mesures de protection disponibles et, surtout, les limites d'exposition telles que documentées dans les normes pertinentes. En commençant par les informations générales sur l'exposition aux CEM, le guide a couvert les risques possibles pour les tissus et les organes exposés aux CEM, et les effets biologiques de l'exposition aux CEM. Le guide fournit également un résumé des mesures de protection appropriées pour les zones domestiques et industrielles et mettent également l'accent sur les limites d'exposition indiquées dans les publications de l'ICNIRP et du Comité international sur la sécurité électromagnétique (CIEM). De plus, trois études de cas ont été présentées à la fin pour illustrer des scénarios réels où les expositions aux CEM ont été testées et comparées à des limites d'exposition acceptables. Ce guide représente un résumé des informations extrêmement vitales et importantes relatives à l'exposition aux CEM, compte tenu de leur expansion et de leurs effets nocifs possibles sur les tissus et les organes biologiques, dans un contexte où le numérique est en constante expansion.

REFERENCES

- [1] Habash, R. W. (2018). *Electromagnetic fields and radiation : human bioeffects and safety*. CRC Press.
- [2] IEEE International Committee on Electromagnetic Safety (SCC39). (2005). IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. Std C95.1-2005, 1–238. IEEE.
- [3] IEEE Standards Coordinating Committee 28. (2002). IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0–3 kHz. Std C95.6-2002, 1–50. IEEE.
- [4] Poljak, D. (2011). Electromagnetic fields: environmental exposure. In *Encyclopedia of Environmental Health*. 259–268. Elsevier.
- [5] Presman, A. (2013). *Electromagnetic fields and life*. Springer.
- [6] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2009). Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Physics*, 96(4), 504-514.
- [7] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, 74(4), 494–522.
- [8] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). (2010). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics*, 99(6), 818–836.
- [9] International Agency for Research on Cancer, et al. (2002). Non-ionizing radiation, part 1: static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 80, 1–395.
- [10] International Agency for Research on Cancer, et al. (2013). Non-ionizing radiation, part 2: radiofrequency electromagnetic fields. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 102, 1–425.
- [11] World Health Organization. (1948). Constitution of the World Health Organization [online]. Available at https://www.who.int/governance/eb/who_constitution_en.pdf. Accessed 1 April 2019.
- [12] Saunders, R. D., & Jefferys, J. G. (2007). A neurobiological basis for ELF guidelines. *Health Physics*, 92(6), 596-603.
- [14] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2009). ICNIRP Statement on the » Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) « *Health physics*, 97, 257–58.
- [15] Nguyen, T. H. P., Shamis, Y., Croft, R. J., Wood, A., McIntosh, R. L., Crawford, R. J., & Ivanova, E. P. (2015). 18 GHz electromagnetic field induces permeability of Gram-positive cocci. *Scientific Reports*, 5(1), 10980.
- [16] Sasaki, K., Mizuno, M., Wake, K., & Watanabe, S. (2017). Monte Carlo simulations of skin exposure to electromagnetic field from 10 GHz to 1 THz. *Physics in Medicine & Biology*, 62(17), 6993.
- [17] Castleman, B. I., & Ziem, G. E. (2017). American Conference of Governmental Industrial Hygienists. TLVs and BEIs: Based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH: ACGIH. 26(1), 133-143.
- [18] Durney, C. H., Massoudi, H., & Iskander, M. F. (1985). *Radiofrequency radiation dosimetry handbook*. Brooks Air Force Base, TX: U.S. Air Force School of Aerospace, Medical Division; Reg. No. SAM-TR-85-73.
- [19] Wertheimer, N., & Leeper, E. D. (1979). Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American journal of epidemiology*, 109(3), 273-284.
- [20] Myers, A., Cartwright, R. A., Bonnell, J. A., Male, J. C., & Cartwright, S. C. (1985, December). Overhead power lines and childhood cancer. In *International Conference of Electric and Magnetic Fields in Medicine and Biology*, London, December (pp. 4-5).
- [21] Tomenius, L. (1986). 50-Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm County. *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 7(2), 191-207.
- [22] Verkasalo, P. K., Pukkala, E., Hongisto, M. Y., Valjus, J. E., Järvinen, P. J., Heikkilä, K. V., & Koskenvuo, M. (1993). Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. *British medical journal*, 307(6909), 895-899.
- [23] Feychting, M., Kaune, W. T., Savitz, D. A., & Ahlbom, A. (1996). Estimating exposure in studies of residential magnetic fields and cancer: importance of short-term variability, time interval between diagnosis and measurement, and distance to power line. *Epidemiology*, 220-224.
- [24] Lindbohm, M. L., Hietanen, M., Kyronen, P., Sallmen, M., Nandelstadh, A. V., Taslomem, H., ... & Hemminiki, K. (1992). Magnetic Fields of Video Display Terminals and Spontaneous Abortion. *American Journal of Epidemiology*, 136(9), 1041-1051.
- [25] Schnorr, T. M., Grajewski, B. A., Hornung, R. W., Thun, M. J., Egeland, G. M., Murray, W. E., ... & Halperin, W. E. (1991). Video display terminals and the risk of spontaneous abortion. *New England Journal of Medicine*, 324(11), 727-733.
- [26] MB, B. (1995). Exposure to electromagnetic fields during pregnancy with emphasis on electrically heated beds: association with birthweight and intrauterine growth retardation. *Epidemiology*, 6, 263-270.
- [27] Milham Jr, S. (1982). Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. *New England Journal of Medicine*, 307(4).
- [28] Savitz, D. A., & Ahlbom, A. (1994). Epidemiologic evidence on cancer in relation to residential and occupational exposures. *Biologic effects of electric and magnetic fields*, 2, 233-262.
- [29] Demers, P. A., Thomas, D. B., Rosenblatt, K. A., Jimenez, L. M., McTiernan, A., Stalsberg, H., ... & West, D. W. (1991). Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men. *American Journal of Epidemiology*, 134(4), 340-347.
- [30] Matanoski, G., Breyse, P., & Elliott, E. (1991). Electromagnetic field exposure and male breast cancer. *The Lancet*, 337(8743), 737.
- [31] Tynes, T., Andersen, A., & Langmark, F. (1992). Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *American Journal of Epidemiology*, 136(1), 81-88.

- [32] Loomis, D. P., Savitz, D. A., & Ananth, C. V. (1994). Breast cancer mortality among female electrical workers in the United States. *Journal of the National Cancer Institute*, 86(12), 921-925. <https://doi: 10.1093/jnci/86.12.921>.
- [33] Floderus, B., Persson, T., Stenlund, C., Wennberg, A., Öst, Å., & Knave, B. (1993). Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukemia and brain tumors: a case-control study in Sweden. *Cancer Causes & Control*, 4, 465-476.
- [34] Theriault, G., Goldberg, M., Miller, A. B., Armstrong, B., Guenel, P., Deadman, J., ... & Wall, C. (1994). Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France: 1970-1989. *American journal of epidemiology*, 139(6), 550-572.
- [35] Savitz, D. A., & Loomis, D. P. (1995). Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. *American Journal of Epidemiology*, 141(2), 123-134.
- [36] Tenforde, T. S., & Kaune, W. T. (1987). Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans. *Health physics*, 53(6), 585-606.
- [37] Larsen, A. I., Olsen, J., & Svane, O. (1991). Gender-specific reproductive outcome and exposure to high-frequency electromagnetic radiation among physiotherapists. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 324-329.
- [38] Ouellet-Hellstrom, R., & Stewart, W. F. (1993). Miscarriages among female physical therapists who report using radio-and microwave-frequency electromagnetic radiation. *American Journal of Epidemiology*, 138(10), 775-786.
- [39] Källén, B., Malmquist, G., & Moritz, U. (1982). Delivery outcome among physiotherapists in Sweden: is non-ionizing radiation a fetal hazard?. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 37(2), 81-85.
- [40] Loughran, S. P., McKenzie, R. J., Jackson, M. L., Howard, M. E., & Croft, R. J. (2012). Individual differences in the effects of mobile phone exposure on human sleep: rethinking the problem. *Bioelectromagnetics*, 33(1), 86-93.
- [41] Eltiti, S., Wallace, D., Russo, R., & Fox, E. (2018). Symptom presentation in idiopathic environmental intolerance with attribution to electromagnetic fields: evidence for a nocebo effect based on data re-analyzed from two previous provocation studies. *Frontiers in Psychology*, 9, 1563.
- [42] Verrender, A., Loughran, S. P., Dalecki, A., Freudenstein, F., & Croft, R. J. (2018). Can explicit suggestions about the harmfulness of EMF exposure exacerbate a nocebo response in healthy controls?. *Environmental research*, 166, 409-417.
- [43] Nittby, H., Brun, A., Eberhardt, J., Malmgren, L., Persson, B. R., & Salford, L. G. (2009). Increased blood-brain barrier permeability in mammalian brain 7 days after exposure to the radiation from a GSM-900 mobile phone. *Pathophysiology*, 16(2-3), 103-112.
- [44] Joshi, R. P., & Schoenbach, K. H. (2010). Bioelectric effects of intense ultrashort pulses. *Critical Reviews™ in Biomedical Engineering*, 38(3).
- [45] Kojima, M., Suzuki, Y., Sasaki, K., Taki, M., Wake, K., Watanabe, S., ... & Sasaki, H. (2018). Ocular effects of exposure to 40, 75, and 95 GHz millimeter waves. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 39, 912-925.
- [46] Schüz, J., Waldemar, G., Olsen, J. H., & Johansen, C. (2009). Risks for central nervous system diseases among mobile phone subscribers: a Danish retrospective cohort study. *PLoS One*, 4(2), e4389.
- [47] Adair, E. R., Mylacraine, K. S., & Cobb, B. L. (2001). Human exposure to 2450 MHz CW energy at levels outside the IEEE C95. 1 standard does not increase core temperature. *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 22(6), 429-439.
- [48] Taberski, K., Klose, M., Grote, K., El Ouardi, A., Streckert, J., Hansen, V. W., & Lerchl, A. (2014). Noninvasive assessment of metabolic effects of exposure to 900 MHz electromagnetic fields on Djungarian Hamsters (*Phodopus sungorus*). *Radiation Research*, 181(6), 617-622.
- [49] Bailey, W. H., Bodemann, R., Bushberg, J., Chou, C. K., Cleveland, R., Faraone, A., ... & Zollman, P. M. (2019). Synopsis of IEEE Std C95. 1™-2019 » IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz«. *IEEE Access*, 7, 171346-171356.
- [50] AFSEC. (n.d.). <https://afsec-africa.org/>
- [51] World Health Organization. (n.d.). <https://www.who.int/peh-emf/about/WhatIsEMF/en/index3.html/>
- [52] ITEH Standards. (n.d.). iTeh Standards. [https://standards.iteh.ai/ EN 50500. \(2008\). Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure.](https://standards.iteh.ai/ EN 50500. (2008). Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure.)
- [53] R. Adegbola, F.X. Fifatin, R. Agbokpanzo, & A. Acakpovi, « Modelling and Simulation of Magnetic Fields in the Vicinity of High Voltage Transmission Line », presented the 26th November 2021 in the 8th IEEE International Conference on Adaptive Science and Technology (ICAST), Accra Ghana, published in IEEE, DOI: 10.1109/ICAST.52759.2021.9682078.
- [54] R. Adegbola, F.X. Fifatin, R. Agbokpanzo, A. Acakpovi, & M. Azagnandji, « Modelling and Simulation of Electric Fields in the Vicinity of High Voltage Transmission Line », published in: *European Journal of Applied Sciences*, vol. 10, no 3, p. 729-743, 2022, DOI: 10.14738/aivp.103.12

