

→ Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) (1,2)

(1) Secrétariat de l'ICNIRP, c/o Dipl.-Ing. Rüdiger Matthes, Bundesamt für Strahlenschutz, Institut für Strahlenhygiene, Ingostraße 1, D-85764 Oberschleissheim, Allemagne.

GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO ELECTRIC, MAGNETIC AND ELECTRO-MAGNETIC FIELDS

TIME-VARYING FIELDS
(UP TO 300 GHz)

The main objective of this publication is to establish guidelines for limiting ELF exposure that will provide protection against known adverse health effects. An adverse health effect causes detectable impairment of the health of the exposed individual or of his or her offspring; a biological effect, on the other hand, may or may not be an adverse health effect.

Studies on both direct and indirect effects of EMF are described; direct effects result from direct interaction of fields with the body, indirect effects involve interactions with an object at a different electric potential from the body. Results of laboratory and epidemiological studies, basic exposure criteria, and reference levels for practical hazard assessment are discussed, and the guidelines presented apply to occupational and public exposure.

● electromagnetic field ● time-varying field ● exposure limit ● guide

Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques

Champs alternatifs (de fréquence variable dans le temps, jusqu'à 300 GHz) (*)

Cette publication a pour principal objectif l'établissement d'un guide destiné à limiter l'exposition aux champs électromagnétiques à des niveaux assurant la protection des personnes contre les effets nocifs connus de ces champs. Un effet nocif est une altération décelable de la santé des personnes exposées ou de leur descendance ; un effet biologique peut être, ou ne pas être, nocif.

Ce document présente des études sur les effets directs et indirects des champs électromagnétiques ; les effets directs résultent d'une interaction directe entre les champs et l'organisme humain, les effets indirects font intervenir des interactions avec un objet se trouvant à un potentiel électrique différent de celui du corps humain. Les auteurs discutent les résultats des études épidémiologiques et de laboratoire, les principaux critères d'exposition et les niveaux de référence pour l'évaluation pratique du risque. Le guide présenté ici s'applique à l'exposition des travailleurs et du public.

● champ magnétique ● champ électrique ● fréquence variable ● limite d'exposition ● guide

En 1974, l'IRPA (Association internationale de radioprotection) a constitué un groupe de travail sur les rayonnements non ionisants (RNI). Ce groupe, chargé de l'étude des problèmes de protection contre les RNI, est devenu l'INIRC (Comité international des rayonnements non ionisants) au congrès de l'IRPA tenu à Paris en 1977.

En collaboration avec la Division d'hygiène de l'environnement de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'IRPA/INIRC a entrepris d'élaborer des documents sur les critères d'hygiène relatifs aux rayonnements non ionisants. Ces travaux entrent dans le cadre du Programme « critères d'hygiène de l'environnement » de l'OMS, financé par le

[*] Ce document est la traduction d'un article paru dans la revue *Health Physics*, 1998, 74, 4, pp. 494-522 et reproduit ici avec l'aimable autorisation de la *Health Physics Society* ; il a été relu, pour la traduction française, par Mme Herrault et MM. Hée (INRS), Louit (ministère du Travail) et Méreau (INRS).

[?] Pendant la préparation de ce guide, la composition de la Commission était la suivante : A. Ahlbom (Suède) ; U. Bergqvist (Suède) ; J. H. Bernhardt, Président depuis mai 1996 (Allemagne) ; J. P. Césari (France) ; L.A. Court jusqu'en mai 1996 (France) ; M. Grandolfo, Vice-président jusqu'en avril 1996 (Italie) ; M. Hietanen, depuis mai 1996 (Finlande) ; A. F. McKinlay, Vice-président depuis mai 1996 (Royaume-Uni) ; M. H. Repacholi, Président jusqu'en avril 1996, Président d'honneur depuis mai 1996 (Australie) ; D. H. Sliney (Etats-Unis) ; J. A. J. Stolwijk (Etats-Unis) ; M. L. Swicord, jusqu'en mai 1996 (Etats-Unis) ; L. D. Szabo (Hongrie) ; M. Taki (Japon) ; T. S. Tenforde (Etats-Unis) ; H. P. Jammot (membre honoraire, décédé) (France) ; R. Matthes, Secrétaire scientifique (Allemagne). Les experts extérieurs dont les noms suivent ont apporté leur concours à l'ICNIRP au cours de la préparation de ce document : S. Allen (Royaume-Uni) ; J. Brix (Allemagne) ; S. Eggert (Allemagne) ; H. Garn (Autriche) ; K. Jokela (Finlande) ; H. Korniewicz (Pologne) ; G.F. Mariutti (Italie) ; R. Saunders (Royaume-Uni) ; S. Tofani (Italie) ; P. Vecchia (Italie) ; E. Vogel (Allemagne). Nous remercions vivement de nombreux autres experts internationaux pour leurs précieux commentaires.

Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Les documents élaborés donnent un aperçu général des caractéristiques physiques des RNI, des techniques et instruments de mesure, des sources et des applications de ces rayonnements, ainsi qu'une analyse détaillée de la littérature scientifique sur les effets biologiques de ces rayonnements et une évaluation des risques pour la santé liés à l'exposition aux RNI. Ils constituent ainsi une base de données scientifiques pour l'établissement de limites d'exposition et de codes de bonne pratique relatifs aux RNI.

Au 8^e Congrès international de l'IRPA (Montréal, 18-22 mai 1992), un nouvel organisme scientifique indépendant a succédé à l'IRPA/INIRC : il s'agit de l'ICNIRP, Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants. Cette commission est chargée d'étudier les risques potentiels liés aux différents types de RNI, d'élaborer des guides internationaux pour l'établissement de limites d'exposition et de traiter de tous les aspects de la protection contre ces rayonnements.

Les effets biologiques signalés à la suite d'expositions à des champs électriques et magnétiques statiques et extrêmement basses fréquences (ELF) ont fait l'objet d'études bibliographiques des PNUE/OMS/IRPA [UNEP/WHO/IRPA, 1984 ; id., 1987]. Ces publications, ainsi que plusieurs autres [UNEP/WHO/IRPA, 1993, et Allen et coll., 1991, notamment] ont fourni la base scientifique du présent guide.

Un glossaire est donné en *annexe*.

Objet et domaine d'application

Cette publication a pour principal objectif l'établissement d'un guide destiné à limiter l'exposition aux champs électromagnétiques à des niveaux assurant la protection des personnes contre les effets nocifs connus de ces champs. Un effet nocif est une altération décelable de la santé des personnes exposées ou de leur descendance ; un effet biologique peut être, ou ne pas être, nocif.

Des études sur les effets directs et indirects des champs électromagnétiques sont présentées ; les effets directs résultent d'une interaction directe entre les champs

et l'organisme humain, les effets indirects font intervenir des interactions avec un objet se trouvant à un potentiel électrique différent de celui du corps humain. Les auteurs discutent les résultats des études épidémiologiques et de laboratoire, les principaux critères d'exposition et les niveaux de référence pour l'évaluation pratique du risque. Le guide présenté ici s'applique à l'exposition des travailleurs et du public.

L'IRPA/INIRC avait publié, en 1988 et 1990, des guides relatifs à l'exposition aux champs électromagnétiques hautes fréquences et de fréquence 50/60 Hz. Ces guides sont remplacés par la présente publication, qui couvre toute la gamme de fréquences des champs électromagnétiques de fréquence variable dans le temps (jusqu'à 300 GHz). Les champs magnétiques statiques sont traités dans le guide ICNIRP publié en 1994 [ICNIRP, 1994].

La Commission reconnaît que l'établissement de valeurs limites d'exposition impose de concilier de nombreux avis différents. Il faut apprécier la validité des rapports scientifiques et extrapoler à l'homme les résultats obtenus sur l'animal. Les valeurs limites citées dans ce guide ont été établies exclusivement à partir de données scientifiques. Toutefois, l'état actuel des connaissances indique qu'elles garantissent un niveau de protection adéquat contre l'exposition aux champs électromagnétiques de fréquence variable dans le temps. Deux catégories de valeurs limites sont présentées :

■ ■ **Restrictions de base** : Les valeurs limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques ou électromagnétiques de fréquence variable, qui sont établies directement à partir d'effets sur la santé avérés, sont appelées *restrictions de base*. Selon la fréquence du champ, les grandeurs physiques utilisées pour spécifier ces valeurs limites sont :

- la densité de courant (J),
- le débit d'absorption spécifique (DAS),
- et la densité de puissance (S). Seule la densité de puissance dans l'air, à l'extérieur du corps, peut être facilement mesurée chez les personnes exposées.

■ ■ **Niveaux de référence** : Ces niveaux sont indiqués à des fins d'évaluation pratique de l'exposition, afin de déterminer s'il est vraisemblable que les restrictions de base soient dépassées. Certains *niveaux de référence* sont dérivés des restrictions de base correspondantes au moyen de techniques de mesure et/ou de

calcul, et d'autres sont liés à la perception et aux effets nocifs indirects de l'exposition aux champs électromagnétiques. Les grandeurs dérivées sont :

- l'intensité de champ électrique (E),
- l'intensité de champ magnétique (H),
- la densité de flux magnétique (B),
- la densité de puissance (S),
- et les courants passant dans les membres (I_L).

Les grandeurs liées à la perception et à d'autres effets indirects sont :

- le courant de contact (I_C),
- et, pour les champs pulsés, l'absorption spécifique (AS).

Quelles que soient les conditions d'exposition, les valeurs mesurées ou calculées de l'une quelconque de ces grandeurs physiques peuvent être comparées aux niveaux de référence correspondants. Le respect du niveau de référence garantit le respect de la restriction de base. Si la valeur mesurée ou calculée dépasse le niveau de référence, il ne s'ensuit pas nécessairement que la restriction de base soit dépassée. Toutefois, tout dépassement du niveau de référence impose de vérifier le respect de la restriction de base correspondante et de déterminer si des mesures de protection complémentaires sont nécessaires.

Le présent guide n'est pas lié directement aux normes de performance de produits, qui sont destinées à limiter les émissions de champ électromagnétique en conditions d'essai spécifiées, et il ne traite pas des techniques de mesure des grandeurs physiques caractérisant les champs électriques, magnétiques ou électromagnétiques. L'instrumentation et les techniques de mesurage de ces grandeurs physiques sont décrites de façon détaillée dans différents documents [NCRP, 1981 ; IEEE, 1992 ; NCRP, 1993 ; DIN VDE, 1995].

Le respect du présent guide ne permet pas ipso facto d'éviter toute perturbation des dispositifs médicaux tels que prothèses métalliques, stimulateurs ou défibrillateurs cardiaques, implants cochléaires. Les stimulateurs cardiaques peuvent être perturbés par des champs n'atteignant pas les niveaux de référence. La prévention de ces problèmes n'entre pas dans le domaine d'application du présent guide mais est traitée dans d'autres documents [UNEP/WHO/IRPA, 1993].

Le présent guide sera révisé et mis à jour périodiquement, au fur et à mesure de l'identification des effets nocifs des champs électriques, magnétiques ou électromagnétiques de fréquence variable dans le temps.

Grandeurs physiques et unités

Alors que les champs électriques ne sont associés qu'à la présence d'une charge électrique, les champs magnétiques sont créés par le mouvement physique d'une charge électrique (courant électrique). Un champ électrique E exerce des forces sur les charges électriques et s'exprime en volts par mètre ($V.m^{-1}$). De façon analogue, les champs magnétiques peuvent exercer des forces physiques sur les charges électriques, mais seulement lorsque ces charges sont en mouvement. Les champs électriques et magnétiques ont une intensité et une direction (ce sont donc des vecteurs). Un champ magnétique peut être spécifié de deux façons, soit par la densité de flux magnétique B , exprimée en teslas (T), soit par l'intensité de champ magnétique H , exprimée en ampères par mètre ($A.m^{-1}$). Ces deux grandeurs sont liées par la formule :

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

avec μ : constante de proportionnalité (qui exprime la perméabilité magnétique) ; dans le vide et dans l'air, comme dans les matériaux non magnétiques (y compris les matériaux biologiques) :

$$\mu = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1} \text{ (henrys par mètre)}$$

Il suffit donc, pour décrire un champ magnétique à des fins de prévention, de spécifier l'une des grandeurs B ou H .

En champ lointain, le modèle d'onde plane constitue une bonne approximation de la propagation du champ électromagnétique. Les caractéristiques d'une onde plane sont les suivantes :

- les fronts d'onde ont une géométrie plane ;
- les vecteurs E et H sont perpendiculaires à la direction de propagation ;
- les champs E et H sont en phase, et le quotient des amplitudes E/H est constant dans tout l'espace. En champ libre : $E/H = 377 \text{ ohms } (\Omega)$, ce qui est l'impédance caractéristique du champ libre ;
- la densité de puissance S , c'est-à-dire la puissance par unité de surface normale à la direction de propagation, est liée aux champs électrique et magnétique par la formule :

$$S = E \cdot H = E^2 / 377 = 377 \cdot H^2 \quad (2)$$

En champ proche, la situation est plus complexe, car les maxima et minima des champs électrique E et magnétique H ne se situent pas aux mêmes points, dans la

direction de propagation, qu'en champ lointain. En champ proche, la structure du champ électromagnétique peut être fortement inhomogène, et l'on peut s'écarter notablement de l'impédance d'onde plane de 377 ohms ; cela signifie que l'on peut avoir des champs presque « exclusivement E » dans certaines zones et des champs presque « exclusivement H » dans d'autres. Les expositions en champ proche sont plus difficiles à déterminer : en effet, il faut mesurer à la fois les champs E et les champs H , et la géométrie des champs est plus complexe ; cette situation ne permet plus d'utiliser la densité de puissance comme critère pour l'expression de limites d'exposition (contrairement à ce qui se passe en champ lointain).

L'exposition à des champs électromagnétiques de fréquence variable dans le temps génère des courants à l'intérieur du corps, ainsi qu'une absorption d'énergie dans les tissus ; l'intensité de ces phénomènes varie selon les mécanismes de couplage et la fréquence en cause. Le champ électrique interne et la densité de courant sont liés par la loi d'Ohm :

$$J = \sigma \cdot E \quad (3)$$

avec σ : conductivité électrique du milieu. Les grandeurs dosimétriques utilisées dans ce guide, compte tenu des différentes gammes de fréquences et des différentes formes d'onde, sont les suivantes :

- densité de courant J , dans la gamme de fréquences allant jusqu'à 10 MHz ;
- courant I , dans la gamme de fréquences allant jusqu'à 110 MHz ;

TABLEAU I

CHAMPS ÉLECTRIQUES, MAGNÉTIQUES ET ÉLECTROMAGNÉTIQUES : GRANDEURS DOSIMÉTRIQUES ET UNITÉS SI CORRESPONDANTES - ELECTRIC, MAGNETIC, ELECTROMAGNETIC, AND DOSIMETRIC QUANTITIES AND CORRESPONDING SI UNITS

GRANDEUR	SYMBOLE	UNITÉ
Conductivité	s	siemens par mètre (S.m ⁻¹)
Courant	I	ampère (A)
Densité de courant	J	ampère par mètre carré (A.m ⁻²)
Fréquence	f	hertz (Hz)
Intensité de champ électrique	E	volt par mètre (V.m ⁻¹)
Intensité de champ magnétique	H	ampère par mètre (A.m ⁻¹)
Densité de flux magnétique	B	tesla (T)
Perméabilité magnétique	m	henry par mètre (H.m ⁻¹)
Permittivité	e	farad par mètre (F.m ⁻¹)
Densité de puissance	S	watt par mètre carré (W.m ⁻²)
Absorption spécifique	AS	joule par kilogramme (J.kg ⁻¹)
Débit d'absorption spécifique	DAS	watt par kilogramme (W.kg ⁻¹)

- débit d'absorption spécifique DAS, dans la gamme de fréquences comprise entre 100 kHz et 10 GHz ;
- absorption spécifique AS, pour les champs pulsés dans la gamme de fréquences comprise entre 300 MHz et 10 GHz ;
- densité de puissance S , dans la gamme de fréquences comprise entre 10 et 300 GHz.

Le *tableau I* donne un résumé général des grandeurs et unités utilisées dans le guide pour caractériser les champs électromagnétiques.

Fondements de la limitation de l'exposition

Le présent guide pour la limitation de l'exposition a été élaboré à la suite d'une revue exhaustive de la littérature scientifique publiée. Cette revue a été conduite en appliquant des critères d'évaluation de la crédibilité des différentes observations rapportées [Repacholi et Stolwijk, 1991 ; Repacholi et Cardis, 1997] ; seuls les effets avérés ont été retenus comme fondements pour les valeurs limites d'exposition proposées. Les effets cancérigènes à long terme n'ont pas été considérés comme avérés ; ce guide n'est fondé que sur des effets immédiats sur la santé, tels que la stimulation des muscles ou des nerfs périphériques, les chocs et brûlures provoqués par le contact avec des objets

conducteurs, ou encore l'élévation de température des tissus sous l'effet de l'absorption d'énergie liée à l'exposition aux champs électromagnétiques. En ce qui concerne d'éventuels effets à long terme, tels qu'une élévation du risque de cancer, l'ICNIRP a conclu que les données disponibles étaient insuffisantes pour servir de base à l'établissement de valeurs limites d'exposition ; des recherches épidémiologiques ont cependant apporté des éléments en faveur d'une association entre exposition (à des densités de flux magnétique très inférieures aux valeurs recommandées dans le présent guide, pour les champs de 50/60 Hz) et effets cancérigènes potentiels.

Les effets *in vitro* d'une exposition à court terme aux champs électriques ou aux champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences modulées en amplitude sont présentés de façon résumée. Des réactions cellulaires et tissulaires transitoires ont été observées en cas d'exposition aux champs électromagnétiques, mais sans relation exposition-réponse nette. Ces études n'ont qu'une valeur limitée pour l'évaluation des effets sur la santé, car nombre d'observations faites *in vitro* n'ont pas pu être mises en évidence *in vivo*. Les résultats d'études menées exclusivement *in vitro* n'ont donc pas été considérés comme une base suffisante pour l'évaluation des effets éventuels des champs électromagnétiques sur la santé.

Mécanismes de couplage entre les champs et le corps humain

Il existe trois mécanismes fondamentaux de couplage, par lesquels les champs électriques ou magnétiques de fréquence variable dans le temps interagissent avec la matière vivante [UNEP/WHO/IRPA, 1993] :

- couplage avec les champs électriques basses fréquences ;
- couplage avec les champs magnétiques basses fréquences ;
- absorption d'énergie provenant des champs électromagnétiques.

Couplage avec les champs électriques basses fréquences

L'interaction champs électriques de fréquence variable - corps humain provoque :

- un *écoulement de charges électriques* (courant électrique),
- la *polarisation des charges liées* (formation de dipôles électriques),
- et la *réorientation des dipôles électriques* déjà présents dans les tissus.

L'importance relative de ces différents effets dépend des propriétés électriques du corps, c'est-à-dire de sa conductivité électrique (qui détermine l'écoulement du courant électrique) et de sa permittivité (qui détermine l'ampleur des phénomènes de polarisation). La conductivité et la permittivité varient selon le type de tissu biologique et dépendent également de la fréquence du champ. Les champs électriques externes induisent, à la surface du corps exposé, une charge superficielle qui provoque, à l'intérieur du corps, l'apparition de courants dont la distribution dépend des conditions d'exposition, de la taille et de la forme du corps, ainsi que de la position du corps dans le champ.

Couplage avec les champs magnétiques basses fréquences

L'interaction physique champs magnétiques de fréquence variable - corps humain crée des *champs électriques induits* et provoque la circulation de courants électriques. L'intensité du champ induit et la densité de courant sont proportionnelles :

- au rayon d'une boucle de courant dans le corps humain,
- à la conductivité électrique du tissu, ainsi qu'à la densité de flux magnétique,
- et à la vitesse de variation de cette grandeur. Pour un champ magnétique d'intensité et de fréquence données, les champs électriques les plus intenses sont induits lorsque les dimensions de la boucle sont maximales.

Le trajet exact et l'intensité du courant induit dans une partie du corps donnée dépendent de la conductivité électrique du tissu considéré.

Le corps humain n'est pas homogène électriquement ; on peut cependant calculer les densités de courant induit en utilisant des modèles anatomiquement et électriquement réalistes associés à des méthodes de calcul qui ont un haut degré de résolution anatomique.

Absorption de l'énergie des champs électromagnétiques

L'exposition du corps humain aux champs électriques ou magnétiques basses fréquences n'entraîne généralement qu'une absorption d'énergie négligeable et aucune élévation de température mesurable. L'exposition à des champs électromagnétiques de fréquence supérieure à 100 kHz peut toutefois entraîner une absorption d'énergie et une élévation de température significatives. De façon générale, l'exposition à un champ électromagnétique uniforme (onde plane) entraîne un dépôt et une distribution d'énergie fortement inhomogènes à l'intérieur du corps ; ce dépôt et cette distribution doivent être évalués par dosimétrie et par calcul.

En ce qui concerne l'absorption d'énergie par le corps humain, les champs électromagnétiques peuvent être classés en quatre gammes de fréquences [Durney et coll., 1985] :

- fréquences comprises entre 100 kHz environ et moins de 20 MHz, auxquelles l'absorption dans le tronc décroît rapidement avec la fréquence, tandis qu'une absorption significative peut se produire au niveau du cou et des jambes ;
- fréquences comprises entre 20 MHz environ et 300 MHz, auxquelles une absorption relativement importante peut se produire dans l'ensemble du corps ; cette absorption peut même être plus forte si l'on prend en compte les résonances dans certaines parties du corps (tête, par exemple) ;
- fréquences comprises entre 300 MHz et plusieurs GHz, auxquelles se produit une absorption locale inhomogène importante ;
- fréquences supérieures à 10 GHz environ, auxquelles l'absorption d'énergie se produit principalement à la surface du corps.

Dans les tissus biologiques, le débit d'absorption spécifique est proportionnel au carré de l'intensité du champ électrique interne. Le DAS moyen et la distribution du DAS peuvent être calculés ou estimés à partir de mesures faites en laboratoire. La valeur du DAS dépend des facteurs suivants :

- paramètres du champ incident, à savoir fréquence, intensité, polarisation, configuration source-objet (champ proche ou lointain) ;
- caractéristiques du corps exposé, à savoir taille, géométrie interne et externe, propriétés diélectriques des différents tissus ;

- effets du sol et des autres objets réfléchissants dans le champ proche du corps exposé.

Lorsque l'axe longitudinal du corps est parallèle au vecteur champ électrique, et en conditions d'exposition à des ondes planes (c'est-à-dire en champ lointain), le DAS pour le corps entier est maximal. La quantité d'énergie absorbée dépend de nombreux facteurs, y compris la taille du corps exposé. L'homme de référence standard (« Standard Reference Man ») [ICRP, 1994] n'est pas raccordé à la terre et a une fréquence d'absorption en résonance proche de 70 MHz. Chez les individus de plus grande taille, cette fréquence est un peu plus basse, tandis que chez les adultes moins grands, les enfants, les bébés et les personnes se tenant assises, elle peut dépasser 100 MHz. Les valeurs des niveaux de référence pour les champs électriques sont fondées sur la relation entre fréquence et absorption d'énergie dans le corps humain. Chez des sujets raccordés à la terre, les fréquences en résonance sont environ deux fois moins élevées [UNEP/WHO/IRPA, 1993].

Pour certains appareils fonctionnant à des fréquences supérieures à 10 MHz (par exemple, appareils de chauffage diélectrique, téléphones mobiles), l'exposition du corps humain peut avoir lieu en conditions de champ proche. Dans ces conditions, la relation entre l'absorption d'énergie et la fréquence diffère grandement de celle que l'on observe en conditions de champ lointain. Avec certains appareils, les téléphones mobiles, par exemple, il peut y avoir prédominance des champs magnétiques dans certaines conditions d'exposition.

Pour l'évaluation de l'exposition en champ proche, on a démontré l'utilité des calculs de modélisation numérique, ainsi que celle du mesurage des courants induits dans le corps et de l'intensité de champ dans les tissus biologiques, dans le cas des téléphones mobiles, des talkies-walkies, des tours de radiodiffusion, des émetteurs-récepteurs à bord des navires et des appareils de chauffage diélectriques [Kuster et Balzano, 1992 ; Dimbylow et Mann, 1994 ; Jokela et coll., 1994 ; Gandhi, 1995 ; Tofani et coll., 1995]. L'importance de ces études tient au fait qu'elles ont montré que l'exposition en champ proche peut entraîner un DAS local élevé (par exemple, au niveau de la tête, des poignets et des chevilles) et que le DAS pour le corps entier et le DAS local dépendent fortement de la distance séparant la sour-

ce hautes fréquences du corps. Enfin, les valeurs du DAS obtenues par mesurage sont cohérentes avec celles obtenues par calcul de modélisation numérique. Le DAS moyen pour le corps entier et le DAS local sont des quantités commodes pour la comparaison des effets observés dans différentes conditions d'exposition. On trouve dans la littérature une discussion détaillée des DAS [UNEP/WHO/IRPA, 1993].

Aux fréquences supérieures à 10 GHz environ, la profondeur de pénétration du champ dans les tissus est faible, et le DAS ne représente pas une bonne mesure pour l'évaluation de l'énergie absorbée ; la densité de puissance incidente du champ ($W.m^{-2}$) constitue une grandeur dosimétrique plus appropriée.

Mécanismes de couplage indirect

Il existe deux mécanismes de couplage indirect :

- les courants de contact résultant du contact du corps humain avec un objet se trouvant à un potentiel électrique différent (c'est-à-dire lorsque soit le corps soit l'objet est chargé électriquement par un champ électromagnétique) ;
- le couplage de champs électromagnétiques à des appareillages médicaux portés par, ou implantés sur, une personne (ce cas n'est pas envisagé dans le présent guide).

Lorsqu'un champ électromagnétique charge électriquement un objet conducteur, cela provoque le passage de courants électriques à travers le corps de la personne en contact avec cet objet [Tenforde et Kaune, 1987 ; UNEP/WHO/IRPA, 1993]. L'amplitude et la distribution spatiale de ces courants dépendent de la fréquence, de la dimension de l'objet considéré, de la taille de la personne et de la surface de contact ; des décharges transitoires - étincelles - peuvent se produire lorsqu'une personne et un objet conducteur exposé à un champ intense se rapprochent l'un de l'autre.

Fondements biologiques de la limitation de l'exposition (jusqu'à 100 kHz)

Les données qui suivent permettent un aperçu général de la littérature scientifique consacrée aux effets biologiques et aux effets sur la santé des champs électriques et magnétiques de fréquence inférieure ou égale à 100 kHz, l'induction de courants dans les tissus constituant le principal mécanisme d'interaction. Pour les fréquences comprises entre 0 et 1 Hz, les fondements biologiques des restrictions de base et des niveaux de référence sont ceux fournis par l'ICNIRP [1994]. Des études plus détaillées sont disponibles par ailleurs [NRPB, 1991, 1993 ; UNEP/WHO/IRPA, 1993 ; Blank, 1995 ; NAS, 1996 ; Polk et Postow, 1996 ; Ueno, 1996].

Effets directs des champs électriques et magnétiques

Etudes épidémiologiques

Il existe de nombreuses revues bibliographiques des études épidémiologiques portant sur les risques de cancer liés à l'exposition à des champs à la fréquence du réseau [NRPB, 1992, 1993, 1994b ; ORAU, 1992 ; Savitz, 1993 ; Heath, 1996 ; Stevens et Davis, 1996 ; Tenforde, 1996 ; NAS, 1996]. Des analyses similaires ont été consacrées aux risques d'effets défavorables sur la fonction de reproduction associés à l'exposition aux champs électromagnétiques [Chernoff et coll., 1992 ; Brent et coll., 1993 ; Shaw et Croen, 1993 ; NA, 1996 ; Tenforde, 1996].

Effets sur la fonction de reproduction

Les études épidémiologiques relatives à l'issue des grossesses n'ont pas fourni d'éléments cohérents permettant de prouver l'existence d'effets défavorables sur la fonction de reproduction chez des femmes travaillant sur écran de visualisation [Bergvist, 1993 ; Shaw et Croen, 1993 ; NRPB, 1994a ; Tenforde, 1996]. Ainsi, la méta-analyse n'a révélé aucun excès de risque d'avortement spontané ou de malformation foetale dans des études combinées comparant des femmes travaillant sur écran et d'autres n'en utilisant pas [Shaw et Croen, 1993]. Deux autres études traitaient

spécialement de la mesure précise des champs électriques et magnétiques émis par ces écrans ; l'une de ces études a signalé la possibilité d'une association entre les champs magnétiques ELF et les fausses couches [Lindbohm et coll., 1992], tandis que l'autre n'a pas trouvé d'association de ce genre [Schnorr et coll., 1991]. Une étude prospective portant sur un grand nombre de cas, avec de forts taux de participation et une évaluation détaillée de l'exposition [Bracken et coll., 1995] a conclu à l'absence de relation entre le poids de naissance ou la vitesse de croissance intra-utérine et une quelconque exposition à un champ ELF. Les résultats défavorables n'étaient pas associés à de plus hauts niveaux d'exposition. L'exposition était évaluée à partir du courant délivré par les lignes électriques en dehors des habitations, du mesurage de l'exposition individuelle pendant 7 jours, du mesurage pendant 24 heures dans les habitations, et de l'utilisation (signalée par les habitants eux-mêmes) de couvertures chauffantes, de matelas à eau chauffants et d'écrans de visualisation. Le plus souvent, les informations disponibles ne viennent pas soutenir la thèse d'une association entre l'exposition professionnelle aux rayonnements émis par les écrans de visualisation et des effets nocifs sur la fonction de reproduction [NRPB, 1994a ; Tenforde, 1996].

Études sur les risques de cancer dans les zones d'habitation

L'hypothèse d'un lien entre l'exposition aux champs magnétiques ELF et une augmentation du risque de cancer est fortement controversée. Un certain nombre de rapports sur ce thème ont été publiés depuis que Wertheimer et Leeper [1979] ont signalé une association entre la mortalité par cancer chez l'enfant et la proximité du domicile par rapport aux lignes de distribution d'électricité, avec ce que les chercheurs ont classé *configuration à haute intensité*. L'hypothèse de base qui se dégageait de l'étude d'origine était que l'apport de sources externes, telles que les lignes électriques aux champs magnétiques de 50/60 Hz rencontrés dans les zones d'habitation, pourrait être lié à une augmentation du risque de cancer chez l'enfant.

A ce jour, treize études ont été consacrées aux relations entre le cancer chez l'enfant et l'exposition aux champs magnétiques à la fréquence du réseau en environnement domestique qui sont produits par les lignes électriques avoisin-

nantes. Ces études ont estimé l'exposition aux champs magnétiques à partir de mesurages à court terme ou sur la base de la distance entre le domicile et la ligne électrique et, dans la plupart des cas, de la configuration de la ligne ; certaines études ont également pris en compte la charge de la ligne. Les données relatives à la leucémie sont les plus cohérentes. Sur ces 13 études [Wertheimer et Leeper, 1979 ; Fulton et coll., 1980 ; Myers et coll., 1985 ; Tomenius, 1986 ; Savitz et coll., 1988 ; Coleman et coll., 1989 ; London et coll., 1991 ; Feychting et Ahlbom, 1993 ; Olsen et coll., 1993 ; Verkasalo et coll., 1993 ; Michaelis et coll., 1997 ; Linet et coll., 1997 ; Tynes et Haldorsen, 1997], huit donnent des estimations de risque relatif comprises entre 1,5 et 3,0.

Le mesurage direct des champs magnétiques, comme les estimations basées sur les lignes électriques avoisinantes, représentent des mesures grossières, approximatives, d'une exposition intervenue à un moment quelconque avant le diagnostic des cas de leucémie, sans que l'on puisse clairement déterminer laquelle des deux méthodes fournit l'estimation la plus valable. Bien que les résultats semblent indiquer que les champs magnétiques pourraient effectivement jouer un rôle dans l'association au risque de leucémie, une incertitude demeure du fait du faible nombre de cas et du fait de la corrélation entre champ magnétique et proximité de lignes électriques [Feychting et coll., 1996].

On connaît mal l'étiologie de la plupart des types de cancer chez l'enfant, mais on a tenté à différentes reprises de contrôler les facteurs de confusion potentiels, tels que le statut socio-économique et la pollution de l'air par les gaz d'échappement des véhicules automobiles, sans grand effet sur les résultats. Les études consacrées aux liens entre l'utilisation d'appareils électrodomestiques (couvertures chauffantes, notamment) et les cancers ou d'autres problèmes de santé n'ont en général donné que des résultats négatifs [Preston-Martin et coll., 1988 ; Verreault et coll., 1990 ; Vena et coll., 1991, 1994 ; Li et coll., 1995]. Seules deux études cas-témoins ont évalué l'utilisation d'appareils domestiques en relation avec le risque de leucémie chez l'enfant. L'une de ces études, menée à Denver [Savitz et coll., 1990], suggérait l'existence d'un lien avec l'utilisation de couvertures chauffantes pendant la grossesse ; l'autre étude, réalisée à Los Angeles [London et coll., 1991], trouvait une association entre leucémie et enfants utilisant des sèche-cheveux et regardant la télévision en noir et blanc.

Le fait que les résultats obtenus pour les leucémies, sur la base de la proximité du domicile par rapport aux lignes électriques, soient relativement homogènes, a conduit le US National Academy of Sciences (NAS) Committee à conclure que les enfants vivant à proximité de lignes électriques semblent être soumis à un risque accru de leucémie [NAS, 1996]. En raison du faible nombre de sujets, les intervalles de confiance dans les différentes études sont larges ; néanmoins, dans l'ensemble, les résultats sont cohérents, avec un risque relatif groupé de 1,5 [NAS, 1996]. Au contraire, le mesurage du champ magnétique à court terme dans certaines de ces études n'a pas fourni de preuve d'une association entre l'exposition à des champs de 50/60 Hz et le risque de leucémie ou de toute autre forme de cancer chez l'enfant. Le NAS Committee n'était pas convaincu que cette élévation du risque puisse s'expliquer par l'exposition aux champs magnétiques, étant donné l'absence d'association apparente lorsque l'exposition était estimée sur la base des valeurs relevées à l'aide de mesureurs de champ dans les habitations des sujets atteints de leucémie et des témoins. L'hypothèse a été émise que ce phénomène pourrait s'expliquer par une confusion résultant d'un facteur encore indéterminé de risque de leucémie chez l'enfant, associé à la proximité des habitations par rapport aux lignes électriques ; toutefois, aucun facteur de confusion vraisemblable n'a été avancé.

Les résultats d'une étude entreprise en Norvège [Tynes et Haldorsen, 1997] ont été rapportés, alors que l'étude bibliographique du NAS Committee était achevée. L'étude norvégienne portait sur 500 cas de cancers de tout type chez l'enfant. L'exposition individuelle de chaque sujet a été estimée par calcul du niveau du champ magnétique produit au domicile de chaque enfant par les lignes électriques avoisinantes, avec moyennage sur une année entière. Aucune association n'a été notée entre risque de leucémie et champs magnétiques pour le domicile occupé au moment du diagnostic. La distance par rapport à la ligne électrique, l'exposition au cours de la première année de vie de l'enfant, l'exposition de la mère à l'époque de la conception et une exposition supérieure au niveau d'exposition médian du groupe témoin n'ont pas permis de relever d'association avec la leucémie, le cancer du cerveau ou le lymphome. Toutefois, le nombre des cas exposés était faible.

Une autre étude, menée en Allemagne, a également fait l'objet d'un rapport [Michaelis et coll., 1997] après l'achèvement de l'étude bibliographique de la NAS. Il s'agit d'une étude cas-témoins sur la leucémie chez l'enfant, portant sur 129 cas et 328 témoins. L'évaluation de l'exposition comportait le mesurage du champ magnétique sur 24 heures dans la chambre de l'enfant, au domicile où l'enfant avait passé le plus de temps avant l'établissement du diagnostic. Un risque relatif plus élevé, de 3,2, a été observé pour des valeurs supérieures à 0,2 μ T.

Aux Etats-Unis, une grande étude cas-témoins (638 cas, 620 témoins), visant à vérifier si la leucémie aiguë lymphoblastique chez l'enfant est ou non associée à l'exposition à des champs magnétiques de 60 Hz, a été publiée par Linet et coll. [1997]. L'exposition aux champs magnétiques a été déterminée par des mesurages dans la chambre de l'enfant, pondérés sur 24 heures, et par des mesurages de 30 secondes dans différentes autres pièces. Les mesurages étaient faits dans l'habitation où l'enfant avait vécu 70 % des cinq années précédant l'année d'établissement du diagnostic, et pendant les périodes correspondantes pour les témoins. Les codes de câblage des conducteurs électriques ont été évalués par paire cas-témoin de résidence stable (ni le cas ni le témoin n'avait changé de domicile au cours des années précédant le diagnostic). Cette évaluation a pu être faite pour 416 paires cas-témoin. Rien n'indiquait une association entre catégorie de code d'identification des conducteurs électriques et leucémie. Pour ce qui est du mesurage des champs magnétiques, les résultats sont plus surprenants. Avec un point seuil à 0,2 μ T, les analyses non appariées et appariées ont donné des risques relatifs de 1,2 et 1,5 respectivement. Avec un point seuil à 0,3 μ T, l'estimation du risque relatif non apparié donne 1,7, sur la base de 45 cas exposés. Ainsi, les résultats de mesurage semblent indiquer l'existence d'une association positive entre champs magnétiques et risque de leucémie. Cette étude représente une contribution majeure de par sa taille, le nombre de sujets inclus dans les catégories à forte exposition, le moment des mesurages par rapport à la date de survenue de la leucémie (en règle générale, moins de 24 mois après le diagnostic), les autres mesures utilisées pour l'obtention des données relatives à l'exposition, et la qualité de l'analyse qui prend en considération de multiples facteurs de confusion potentiels. Parmi les faiblesses potentielles de cette étude, il faut évoquer

en particulier la procédure de sélection des témoins, les taux de participation et les méthodes utilisées pour l'analyse statistique des données. Les instruments utilisés pour le mesurage ne prenaient en compte ni les champs transitoires, ni les harmoniques d'ordre supérieur. L'ampleur de cette étude est telle que ses résultats, combinés à ceux d'autres études, affaibliraient de façon significative (sans nécessairement les invalider cependant) l'association potentielle précédemment observée avec les résultats obtenus sur la base des codes d'identification des conducteurs électriques.

On s'est également intéressé de près, ces dernières années, à la question de l'association entre l'exposition aux champs magnétiques et le cancer du cerveau chez l'enfant, qui vient, pour la fréquence, au second rang des cancers observés dans cette classe d'âge. Trois études récentes, achevées postérieurement à l'analyse du NAS Committee, n'ont pas permis d'étayer la thèse d'une association entre cancer du cerveau et exposition des enfants aux champs magnétiques, que ces derniers proviennent des lignes électriques ou des couvertures chauffantes et qu'ils aient été estimés par calcul ou à partir des codes d'identification des conducteurs électriques [Guénel et coll., 1996 ; Preston-Martin et coll., 1996a, 1996b ; Tynes et Haldorsen, 1997].

Il n'existe que peu de données sur le cancer chez l'adulte et l'exposition aux champs magnétiques dans les zones d'habitation [NAS, 1996]. Les rares études publiées à ce jour [Wertheimer et Leeper, 1979 ; McDowall, 1985 ; Seversen et coll. 1988 ; Coleman et coll., 1989 ; Schreiber et coll., 1993 ; Feychting et Ahlbom, 1994 ; Li et coll. 1996 ; Verkasalo, 1996] ont toutes pâti à divers degrés du faible nombre de cas exposés, si bien qu'il est impossible d'en tirer des conclusions valables.

L'ICNIRP estime que les résultats de la recherche épidémiologique sur l'exposition aux champs électromagnétiques et le cancer, et en particulier la leucémie de l'enfant, ne sont pas assez assurés, en l'absence du soutien de la recherche expérimentale, pour servir de base scientifique à l'établissement de guides pour la limitation de l'exposition. Cette estimation est en accord avec des analyses récentes sur le sujet [NRPB, 1992, 1994b ; NAS, 1996 ; CRP, 1997].

Etudes en milieu professionnel

Un grand nombre d'études épidémiologiques ont été réalisées en vue d'évaluer les liens éventuels entre l'exposition aux champs ELF et le risque de cancer chez les personnes travaillant dans le secteur de l'électricité. La première étude de ce genre [Milham, 1982] mettait à profit une base de données constituée de certificats de décès indiquant l'activité professionnelle et comportant des informations sur la mortalité par cancer. Milham, utilisant une méthode grossière d'évaluation de l'exposition, classait ces activités en fonction de l'exposition présumée aux champs magnétiques, et avait trouvé un risque accru de leucémie parmi les travailleurs de l'électricité. Des études ultérieures [Savitz et Ahlbom, 1994] ont utilisé des bases de données similaires ; les types de cancers pour lesquels on notait des taux augmentés variaient d'une étude à l'autre, notamment lorsque des sous-types de cancer étaient définis. Des risques accrus ont été rapportés pour différents types de leucémie et de tumeurs des tissus nerveux, ainsi que, dans quelques rares cas, pour le cancer du sein chez l'homme et chez la femme [Demers et coll., 1991 ; Matanoski et coll., 1991 ; Tynes et coll., 1992 ; Loomis et coll., 1994]. Ces études ont non seulement donné des résultats un peu incohérents, mais elles ont encore subi les conséquences d'une évaluation très grossière de l'exposition et de l'incapacité à contrôler les facteurs de confusion, tels que l'exposition au benzène sur le lieu de travail.

Trois études récentes se sont efforcées de surmonter certaines des insuffisances des travaux antérieurs, en mesurant l'exposition aux champs ELF sur le lieu de travail et en prenant en compte l'ancienneté dans l'emploi [Floderus et coll., 1993 ; Thériault et coll., 1994 ; Savitz et Loomis, 1995]. Un risque augmenté de cancer a été observé parmi les personnes exposées, mais le type de cancer pour lequel cela se vérifiait variait d'une étude à l'autre. Floderus et coll. [1993] trouvaient une association significative avec la leucémie ; Thériault [1994] notait également une association, mais faible et non significative ; aucun lien n'était observé par Savitz et Loomis [1995]. Le manque de cohérence était encore plus grand pour les sous-types de leucémie ; toutefois, l'analyse ne couvrait qu'un petit nombre de cas. Pour les tumeurs des tissus nerveux, Floderus et coll. [1993] trouvaient un excès de glioblastome (astrocytome III-IV), tandis que Thériault et coll. [1994] et Savitz et Loomis [1995] trouvaient seulement des éléments

semblant indiquer une augmentation des cas de gliome (astrocytome I-II). S'il existe véritablement un lien entre exposition professionnelle aux champs magnétiques et cancer, on serait en droit d'attendre plus de cohérence et des associations plus fortes de ces études récentes fondées sur des données d'exposition plus élaborées.

Les chercheurs ont aussi étudié la possibilité d'un lien entre champs électriques ELF et cancer. Les trois entreprises d'électricité qui participaient à l'étude de Thériault et coll. [1994] sur les champs magnétiques ont aussi analysé les données relatives aux champs électriques. L'étude notait que, dans l'une de ces entreprises, les travailleurs souffrant de leucémie étaient davantage susceptibles d'avoir été exposés aux champs électriques que les travailleurs du groupe témoin. En outre, l'association était plus forte dans le groupe qui était exposé à la fois à des champs électriques et magnétiques de forte intensité [Miller et coll., 1996]. Dans la deuxième entreprise, les chercheurs n'ont fait état d'aucune association entre exposition cumulée accrue aux champs électriques sur le lieu de travail et leucémie, mais certaines des analyses indiquaient une association avec le cancer du cerveau [Guénel et coll., 1996]. Une association avec le cancer du côlon a également été rapportée, alors que, dans d'autres études portant sur de grandes populations de travailleurs de l'électricité, ce type de cancer n'a pas été observé. Dans la troisième entreprise, aucune association n'a été observée entre champs électriques intenses et cancer du cerveau ou leucémie, mais cette étude plus restreinte était moins susceptible de permettre la détection d'éventuelles altérations mineures [Baris et coll., 1996].

Sobel et Davanipour [1996] ont évoqué la possibilité d'une association entre maladie d'Alzheimer et exposition professionnelle aux champs magnétiques. Toutefois, cet effet n'a pas été confirmé.

Études en laboratoire

Les paragraphes qui suivent présentent une évaluation résumée et critique des études en laboratoire consacrées aux effets biologiques des champs électriques et magnétiques de fréquences inférieures à 100 kHz. Les résultats des études sur des volontaires exposés en conditions contrôlées et des études en laboratoire portant sur des systèmes cellulaires, tissulaires et animaux sont discutés séparément.

Études sur des volontaires

L'exposition à un champ électrique de fréquence variable dans le temps peut amener les sujets exposés à percevoir le champ du fait de la vibration des poils provoquée par la charge électrique alternative induite à la surface du corps. Plusieurs études ont montré que la plupart des gens sont capables de percevoir des champs électriques de 50/60 Hz d'intensité supérieure à 20 kV.m⁻¹ et que seule, une infime minorité peut percevoir des champs d'intensité inférieure à 5 kV.m⁻¹ [UNEP/WHO/IRPA, 1984 ; Tenforde, 1991].

Des volontaires exposés à des champs électriques et magnétiques combinés de 60 Hz (9 kV.m⁻¹, 20 µT) ont présenté de légères modifications de la fonction cardiaque [Cook et coll., 1992 ; Graham et coll., 1994]. Au repos, le rythme cardiaque était légèrement mais significativement réduit (de 3 à 5 battements par minute) pendant ou immédiatement après l'exposition. Cette réaction n'était pas observée lors de l'exposition à des champs plus forts (12 kV.m⁻¹, 30 µT) ou plus faibles (6 kV.m⁻¹, 10 µT) et elle était diminuée si le niveau de vigilance du sujet était suffisant. Aucun des sujets participant à ces études n'était en mesure de détecter la présence de champs et il n'y a pas eu d'autres résultats cohérents sur toute une batterie de tests sensoriels et perceptifs.

Aucun effet physiologique ou psychologique défavorable n'a été observé dans les études de laboratoire portant sur des sujets exposés à des champs de 50 Hz de densité de flux magnétique comprise entre 2 et 5 mT [Sander et coll., 1982 ; Ruppe et coll., 1995]. Dans les études de Sander et coll. [1982] et de Graham et coll. [1994], aucun changement n'a été observé au niveau de la chimie du sang, de la numération sanguine, des gaz du sang, des taux de lactate, de l'électrocardiogramme, de l'électroencéphalogramme, de la température cutanée ou des taux d'hormones circulantes. De même, aucune étude récente sur des volontaires n'a établi un effet quelconque de l'exposition à des champs magnétiques de 60 Hz sur les taux nocturnes de mélatonine dans le sang [Graham et coll., 1996, 1997 ; Selmaoui et coll., 1996].

Des champs magnétiques ELF suffisamment intenses peuvent provoquer directement une stimulation des nerfs périphériques et des tissus musculaires, et de courtes impulsions de champ magnétique ont été utilisées à des fins cliniques pour

la stimulation de nerfs des membres, afin de vérifier l'intégrité des voies nerveuses. La stimulation des nerfs périphériques et des muscles a également été rapportée chez des volontaires exposés à des champs magnétiques de gradient 1 kHz dans des systèmes d'imagerie par résonance magnétique (IRM). Les densités liminaires de flux magnétique étaient de plusieurs milliteslas, et les densités correspondantes de courant induit dans les tissus périphériques étaient de l'ordre de 1 A.m⁻², dans le cas de champs pulsés produits par des changements rapides de gradient. Les champs magnétiques de fréquence variable dans le temps qui induisent dans les tissus des densités de courant supérieures à 1 A.m⁻² provoquent une stimulation nerveuse et peuvent entraîner des effets biologiques irréversibles, tels que la fibrillation cardiaque [Tenforde et Kaune, 1987 ; Reilly, 1989]. Dans une étude comportant des électromyogrammes du bras chez l'homme [Polson et coll., 1982], il a été observé qu'il fallait un champ pulsé de valeur dB/dt supérieure à 10⁴ T.s⁻¹ pour stimuler le tronc nerveux médian. On a également constaté que la durée du stimulus magnétique représentait un paramètre important dans la stimulation des tissus excitables.

On peut trouver des seuils inférieurs à 100 mA.m⁻² dans les études sur volontaires portant sur les fonctions visuelles et mentales. On a signalé des changements dans le temps de réponse aux tests de raisonnement complexe chez des volontaires soumis à des courants électriques faibles à la fréquence du réseau traversant des électrodes fixées sur la tête et les épaules ; on a estimé que les densités de courant correspondantes se situaient entre 10 et 40 mA.m⁻² [Stollery, 1986, 1987]. Enfin, de nombreuses études ont signalé que les volontaires éprouvaient de légères sensations visuelles de papillotement (magnétosphènes) lors de l'exposition à des champs magnétiques ELF supérieurs à 3-5 mT [Silny, 1986]. Ces effets visuels peuvent aussi être induits par l'application directe à la tête de courants électriques faibles. A 20 Hz, on a estimé que des densités de courant d'environ 10 mA.m⁻² au niveau de la rétine constituaient un seuil pour l'induction de phosphènes ; cette valeur est supérieure aux densités habituelles des courants endogènes dans les tissus excitables par l'électricité. Des seuils plus élevés ont été notés pour des fréquences soit inférieures, soit supérieures [Lövsund et coll., 1980 ; Tenforde, 1990].

Des études réalisées à 50 Hz sur les potentiels évoqués visuels indiquent des seuils d'effet pour des densités de flux de 60 mT [Silny, 1986].

Dans le même sens, aucun effet sur les potentiels évoqués visuels n'a été obtenu par Sander et coll. [1982] avec un champ de 50 Hz, 5 mT, ni par Graham et coll. [1994] avec une combinaison de champs électriques et magnétiques de 60 Hz ne dépassant pas 12 kV.m⁻¹ et 30 µT, respectivement.

Etudes cytologiques et sur l'animal

Si un grand nombre d'études ont été consacrées à la détection des effets biologiques des champs électriques et magnétiques ELF, il y a eu fort peu d'études systématiques visant à définir les caractéristiques liminaires de champ pour l'apparition de perturbations significatives des fonctions biologiques. C'est un fait bien établi qu'un courant électrique induit peut provoquer la stimulation directe des tissus nerveux et musculaires lorsque la densité de courant induit dépasse certaines valeurs seuils [UNEP/WHO/IRPA, 1987 ; Bernhardt, 1992 ; Tenforde, 1996]. Des densités de courant qui ne provoquent aucune stimulation des tissus excitables peuvent néanmoins perturber l'activité électrique normale et influencer sur l'excitabilité neuronale. On sait que l'activité du système nerveux central est sensible aux champs électriques endogènes produits par l'action des cellules nerveuses adjacentes, à des niveaux inférieurs à ceux qui sont nécessaires à la stimulation directe.

A en croire un grand nombre d'auteurs, la transduction de signaux électriques faibles du domaine des ELF entraînerait des interactions avec la membrane cellulaire, d'où des réponses biochimiques du cytoplasme qui, à leur tour, impliqueraient des modifications des états fonctionnels et prolifératifs cellulaires. A partir de modèles simples du comportement de cellules isolées dans des champs faibles, on a calculé qu'un signal électrique dans un champ extracellulaire devait être supérieur à une valeur de l'ordre de 10-100 mV.m⁻¹ (ce qui correspond à une densité de courant induit de l'ordre de 2 à 20 mA.m⁻²) pour dépasser le niveau de bruit endogène physique et biologique dans les membranes cellulaires [Astumian et coll., 1995]. Les données existantes semblent également indiquer que plusieurs caractéristiques structurelles et fonctionnelles des membranes peuvent se trouver modifiées en réponse à des champs ELF induits d'intensité égale ou inférieure à 100 mV.m⁻¹

[Sienkiewicz et coll., 1991 ; Tenforde, 1993]. On a signalé des altérations neuroendocriniennes (suppression de la synthèse nocturne de la mélatonine, par exemple) en réponse à des champs électriques induits d'intensité égale ou inférieure à 10 mV.m⁻¹, ce qui correspond à des densités de courant induit égales ou inférieures à 2 mA.m⁻² environ [Tenforde, 1991 ; 1996]. Rien ne permet d'établir clairement que ces effets soient nocifs.

On a montré que les champs et courants électriques induits de niveaux dépassant ceux des signaux bioélectriques endogènes dans les tissus entraînaient un certain nombre d'effets physiologiques de gravité croissante au fur et à mesure de l'augmentation de la densité de courant induit [Bernhardt, 1979 ; Tenforde, 1996]. Dans le domaine de densité de courant compris entre 10 et 100 mA.m⁻², des effets sur les tissus et des modifications des fonctions cognitives cérébrales ont été signalés [NRPB, 1992 ; NAS, 1996]. Lorsque la densité du courant induit dépasse 100, voire plusieurs centaines de mA.m⁻² à des fréquences comprises entre 10 Hz et 1 kHz environ, il y a dépassement des seuils de stimulation neuronale et neuromusculaire. Les densités liminaires de courant augmentent progressivement aux fréquences inférieures à quelques hertz et supérieures à 1 kHz. Enfin, à des densités de courant extrêmement élevées, supérieures à 1 A.m⁻², des effets graves et potentiellement létaux peuvent apparaître (extrasystoles, fibrillation ventriculaire, tétanie, insuffisance respiratoire). La gravité et la probabilité d'irréversibilité des effets sur les tissus s'amplifient en cas d'exposition chronique à des densités de courant induit qui dépassent un niveau de 10 - 100 mA.m⁻². Il semble donc judicieux de limiter l'exposition de l'homme à des champs qui n'induisent pas de densités de courant supérieures à 10 mA.m⁻² au niveau de la tête, du cou et du tronc à des fréquences allant de quelques Hz à 1 kHz.

On a émis l'hypothèse que l'action des forces et des couples oscillatoires magnéto-mécaniques, sur des particules de magnétite biogène dans le tissu cérébral, pourrait expliquer le mécanisme de transduction des signaux à partir de champs magnétiques ELF. Kirschvink et coll. [1992b] ont proposé un modèle dans lequel les forces magnétiques ELF agissant sur les particules de magnétite sont rendues visibles, alors qu'elles produisent l'ouverture ou la fermeture de canaux ioniques sensibles à la pression dans les membranes. Cependant, l'une des difficul-

tés de ce modèle tient au faible nombre des particules de magnétite par rapport au nombre des cellules du tissu cérébral. Ainsi, chez l'homme, le tissu cérébral contiendrait quelques millions de particules de magnétite par gramme, réparties en 105 grappes discrètes de 5 à 10 particules chacune [Kirschvink et coll., 1992a]. Le nombre des cellules du tissu cérébral dépasse donc le nombre des particules de magnétite d'un facteur 100 environ, et il est difficile d'envisager comment les interactions magnéto-mécaniques oscillatoires d'un champ ELF avec les cristaux de magnétite pourraient influencer, dans le cerveau, sur un nombre significatif de canaux ioniques sensibles à la pression. De nouvelles études sont manifestement nécessaires, pour faire la lumière sur le rôle biologique de la magnétite et les mécanismes éventuels grâce auxquels ce minéral pourrait jouer un rôle dans la transduction des signaux magnétiques ELF.

Dans l'évaluation des effets des champs électromagnétiques, l'un des grands problèmes est de savoir s'il est ou non possible que ces champs aient des effets tératogènes et des effets sur le développement du produit de conception. D'après les données scientifiques publiées, il est peu probable que les champs magnétiques basses fréquences aient des effets défavorables sur le développement embryonnaire et postnatal des mammifères [Chernoff et coll., 1992 ; Brent et coll., 1993 ; Tenforde, 1996]. En outre, les éléments disponibles indiquent qu'il est peu probable que l'exposition à des champs électriques ou magnétiques de fréquence inférieure à 100 kHz puisse entraîner des mutations somatiques ou des effets génétiques [Cridland, 1993 ; Sienkiewicz et coll., 1993].

Il existe dans la littérature scientifique un grand nombre de rapports sur les effets in vitro des champs ELF sur les propriétés de la membrane cellulaire (transfert ionique et interaction de mitogènes avec les récepteurs de surface de la cellule) et sur les modifications des fonctions cellulaires et des propriétés liées à la croissance (par exemple augmentation de la prolifération, altérations du métabolisme, de l'expression des gènes, de la biosynthèse des protéines et des activités enzymatiques) [Cridland, 1993 ; Sienkiewicz et coll. 1993 ; Tenforde, 1991, 1992, 1993, 1996]. On s'est beaucoup intéressé aux effets des champs basses fréquences sur le passage de l'ion calcium (Ca⁺⁺) à travers la membrane cellulaire et sur la concentration intracellulaire de cet ion [Walleczek et

Liburdy, 1990 ; Liburdy, 1992 ; Walleczek, 1992], sur les modes de synthèse de l'ARN messenger et des protéines [Goodman et coll., 1983 ; Goodman et Henderson, 1988 ; 1991 ; Greene et coll., 1991 ; Phillips et coll., 1992] et sur l'activité d'enzymes, telle l'ornithine-décarboxylase (ODC), qui sont liées à la prolifération cellulaire et à la promotion tumorale [Byus et coll., 1987 ; 1988 ; Litovitz et coll., 1991 ; 1993]. Néanmoins, avant de pouvoir utiliser ces observations pour la définition de limites d'exposition, il est indispensable d'établir à la fois leur reproductibilité et leur pertinence par rapport au cancer ou à d'autres effets nocifs. Ce point est mis en évidence par les difficultés rencontrées lorsqu'on veut reproduire certaines des observations clés relatives aux effets des champs sur l'expression des gènes et la synthèse des protéines [Lacy-Hulbert et coll., 1995 ; Saffer et Thurston, 1995]. Les auteurs de ces études de répétition ont identifié un certain nombre de faiblesses dans les études antérieures, et en particulier une mauvaise régulation de la température, l'absence de témoins internes adéquats, ainsi que le recours à des techniques à faible résolution pour l'analyse de la transcription de l'ARNm (messenger). L'augmentation transitoire de l'activité de l'ODC signalée en cas d'exposition à un champ est faible et n'est pas associée à une synthèse de novo de l'enzyme (contrairement aux promoteurs tumoraux chimiques comme les esters de phorbol) [Byus et coll., 1988]. Les études sur l'ODC ont été effectuées principalement avec des préparations cellulaires ; d'autres études sont nécessaires pour établir s'il y a ou non des effets sur l'ODC in vivo, bien qu'une étude indique que ces effets auraient été observés lors d'un test de promotion de tumeur de la glande mammaire chez le rat [Mevisen et coll., 1995].

Il n'existe pas de preuve de modification structurale de l'ADN et de la chromatine par les champs ELF, et l'on ne s'attend pas à des effets mutagènes ou oncogènes. Les résultats d'études en laboratoire visant à détecter les lésions de l'ADN, les altérations chromosomiques, les mutations et l'augmentation de la fréquence des transformations en réponse à l'exposition aux champs ELF [NRPB, 1992 ; Murphy et coll., 1993 ; McCann et coll., 1993 ; Tenforde, 1996] vont dans le même sens. L'absence d'effets sur la structure des chromosomes semble indiquer que les champs ELF, à supposer qu'ils influent sur le processus de cancérogenèse, agissent plus probablement comme promoteurs que comme initiateurs, en favorisant la

prolifération de cellules génétiquement modifiées, plutôt qu'en provoquant la lésion initiale de l'ADN ou de la chromatine. Par leurs effets épigénétiques (altérations des voies de communication cellulaire ou de l'expression des gènes), ces champs pourraient influencer sur le développement tumoral. Aussi certaines études récentes se sont-elles concentrées sur la détection des effets éventuels des champs ELF sur les phases de promotion et de progression du développement tumoral, après initiation par un cancérigène chimique.

Des études sur la croissance de cellules tumorales in vitro et sur le développement de tumeurs transplantées chez des rongeurs n'ont pas fourni d'éléments suffisamment probants en faveur d'effets cancérogènes de l'exposition aux champs ELF [Tenforde, 1996]. Plusieurs études portant plus directement sur le cancer chez l'homme ont donné lieu à des essais in vivo sur l'effet de promotion tumorale des champs magnétiques ELF au niveau de la peau, du foie, du cerveau et de la glande mammaire chez les rongeurs. Trois études portant sur la promotion des tumeurs cutanées [McLean et coll., 1991 ; Rannug et coll., 1993a, 1994] n'ont pas permis d'observer d'effet de l'exposition, tant continue qu'intermittente, à des champs magnétiques aux fréquences du réseau sur la promotion de tumeurs chimiquement induites. Avec un champ de 60 Hz et 2 mT, on a observé un effet de co-promotion avec un ester de phorbol sur le développement d'une tumeur cutanée chez la souris aux stades initiaux de l'expérimentation ; mais ce résultat avait cessé d'être statistiquement significatif lorsque l'étude s'est achevée, à la 23^e semaine [Stuchly et coll., 1992]. Des études antérieures réalisées par les mêmes chercheurs avaient montré que l'exposition à un champ à 60 Hz, 2 mT, n'avait pas d'effet promoteur sur la croissance de cellules cutanées initiées par le DMBA (diméthylbenzanthracène) [McLean et coll., 1991].

Des expériences sur le développement de foyers de cellules hépatiques transformées, avec initiation par un cancérigène chimique et promotion par un ester de phorbol, chez des rats partiellement hépatectomisés, n'ont révélé aucun effet de promotion ou de co-promotion en cas d'exposition à des champs de 50 Hz et de densité de flux comprise entre 0,5 et 50 μ T [Rannug et coll., 1993b ; 1993c].

Des études sur le développement de cancers de la glande mammaire chez des

rongeurs traités par initiateur chimique donnent à penser que l'exposition à des champs magnétiques à la fréquence du réseau et de densité de flux comprise entre 0,01 et 30 mT entraîne un effet de promotion du cancer [Beniashvili et coll., 1991 ; Löscher et coll., 1993 ; Mevisen et coll., 1993, 1995 ; Baum et coll., 1995 ; Löscher et Mevisen, 1995]. On a émis l'hypothèse que l'augmentation observée de l'incidence de ces tumeurs chez les rats exposés à des champs magnétiques pourrait être liée à une suppression de la mélatonine épiphysaire consécutive à l'action de ces champs, avec augmentation résultante des taux d'hormones stéroïdiennes et du risque de cancer mammaire [Stevens, 1987 ; Stevens et coll., 1992]. Toutefois, il faut que des études de répétition soient réalisées indépendamment par différents laboratoires, avant qu'il soit possible de dégager des conclusions quant à l'effet promoteur des champs magnétiques ELF sur les tumeurs de la glande mammaire. Il convient également de noter que des études récentes n'ont pas apporté la preuve d'un effet significatif de l'exposition aux champs magnétiques ELF sur les taux de mélatonine chez l'homme [Graham et coll., 1996, 1997 ; Selmaoui et coll., 1996].

Effets indirects des champs électriques et magnétiques

Les effets indirects des champs magnétiques peuvent résulter d'un contact physique (par exemple, toucher ou frottement) entre une personne et un objet, par exemple une structure métallique placée dans le champ, qui se trouvent à un potentiel électrique différent. Ce contact provoque l'écoulement de la charge électrique (courant de contact) qui a pu s'accumuler dans l'objet ou sur le corps de la personne. Dans le domaine de fréquences allant jusqu'à 100 kHz environ, l'écoulement du courant électrique d'un objet placé dans le champ vers le corps d'une personne peut entraîner une stimulation des muscles et/ou des nerfs périphériques. Lorsque l'intensité du courant augmente, cela peut se traduire par une perception tactile, une douleur et/ou des brûlures consécutives au choc électrique, l'incapacité de lâcher l'objet, des difficultés respiratoires et, pour des courants très forts, une fibrillation ventriculaire [Tenforde et Kaune, 1987]. Les seuils d'effet sont fonction de la fréquence, le seuil inférieur se situant à des fréquences situées entre 10 et 100 Hz. Les seuils de réponse nerveuse périphérique restent

bas pour des fréquences allant jusqu'à plusieurs kHz. Des mesures de prévention d'ordre technique et/ou administratif, voire le port de vêtements de protection, permettent d'éviter ces problèmes.

Des décharges d'étincelles peuvent se produire lorsqu'une personne se place tout près d'un objet se trouvant à un potentiel électrique différent, sans toutefois le toucher [Tenforde et Kaune, 1987 ; UNEP/WHO/IRPA, 1993]. Lorsque des volontaires, électriquement isolés par rapport à la terre, mettaient chacun le bout d'un doigt près d'un objet relié à la terre, le seuil de perception des décharges d'étincelles était bas, de l'ordre de 0,6 - 1,5 kV.m⁻¹, dans 10 % des cas. Le niveau liminaire de champ signalé comme provoquant une gêne dans ces conditions d'exposition est de l'ordre de 2,0 - 3,5 kV.m⁻¹. De forts courants de contact peuvent provoquer une contraction musculaire. Il a été rapporté que, chez des volontaires de sexe masculin, le seuil au 50^e percentile pour l'incapacité de lâcher un conducteur chargé était 9 mA à 50/60 Hz, 16 mA à 1 kHz, environ 50 mA à 10 kHz et environ 130 mA à 100 kHz [UNEP/WHO/IRPA, 1993].

Le *tableau II* récapitule les valeurs liminaires de courant pour différents effets indirects de champs de fréquence inférieure ou égale à 100 kHz [UNEP/WHO/IRPA, 1993].

Effets biologiques et études épidémiologiques (jusqu'à 100 kHz)

A l'exception possible des tumeurs de la glande mammaire, les études en laboratoire n'offrent guère de preuves d'un effet de promotion tumorale dû aux champs magnétiques à la fréquence du réseau. Des études complémentaires sur l'animal sont nécessaires, afin d'élucider les effets possibles des champs ELF sur les signaux produits dans les cellules et sur la régulation endocrinienne - qui tous deux pourraient influencer sur le développement tumoral par promotion de la prolifération des cellules initiées - et la seule conclusion possible en l'état actuel des choses est :

- qu'il n'y a pas de preuve convaincante d'un effet cancérigène de ces champs,
- et que ces données ne peuvent pas servir de base pour l'élaboration d'un guide pour la limitation de l'exposition.

Des études en laboratoire sur des systèmes cellulaires et sur l'animal n'ont pas

TABLEAU II

GAMMES DE COURANTS SEUILS AYANT DES EFFETS INDIRECTS SUR L'ÊTRE HUMAIN (HOMMES, FEMMES ET ENFANTS INCLUS) 50 Hz - 100 kHz - RANGES OF THRESHOLD CURRENTS FOR INDIRECT EFFECTS, INCLUDING CHILDREN, WOMEN, AND MEN, 50 Hz TO 100 kHz

EFFET INDIRECT	COURANTS SEUILS (mA) À LA FRÉQUENCE :		
	50 / 60 Hz	1 kHz	100 kHz
SENSATION TACTILE	0,2 - 0,4	0,4 - 0,8	25 - 40
SENSATION DOULOUREUSE AU CONTACT AVEC LE DOIGT	0,9 - 1,8	1,6 - 3,3	33 - 55
CHOC DOULOUREUX / SEUIL DE RELAXATION MUSCULAIRE	8 - 16	12 - 24	112 - 224
CHOC SÉVÈRE / DIFFICULTÉ À RESPIRER	12 - 23	21 - 41	160 - 320

permis d'établir l'existence d'effets des champs basses fréquences révélateurs d'une action nocive, lorsque la densité de courant induit est inférieure ou égale à 10 mA.m⁻². A des niveaux supérieurs de densité de courant induit (entre 10 et 100 mA.m⁻²), on a régulièrement observé des effets plus significatifs sur les tissus, tels que des altérations fonctionnelles du système nerveux ou autres [Tenforde, 1996].

Les données sur le risque de cancer associé à l'exposition aux champs ELF chez des sujets vivant à proximité immédiate de lignes électriques semblent concorder pour indiquer un risque légèrement plus élevé de leucémie chez l'enfant, bien que des études plus récentes mettent en doute l'association faible observée antérieurement. Cependant, les études n'indiquent pas l'existence d'un risque également augmenté pour tout autre type de cancer chez l'enfant, ou toute autre forme de cancer chez l'adulte. On ne connaît pas la base de ce lien hypothétique entre leucémie chez l'enfant et résidence à proximité de lignes électriques : si ce lien n'est pas en relation avec les champs électriques et magnétiques ELF générés par les lignes électriques, il faut relier des facteurs (inconnus) de risque de leucémie aux lignes électriques d'une manière qui reste à déterminer. En l'absence de confirmation par des études de laboratoire, les données épidémiologiques sont insuffisantes pour l'établissement de guides pour la limitation de l'exposition.

Certains rapports ont signalé un risque accru de certains types de cancer (leucémie, tumeurs des tissus nerveux et, dans une certaine mesure, cancer du sein) parmi les travailleurs du secteur de l'électricité. La plupart des études ont utilisé les intitulés d'emploi pour classer les sujets en fonction des niveaux présumés d'exposition aux champs magnétiques. Cependant,

quelques études plus récentes ont utilisé des méthodes plus raffinées d'évaluation de l'exposition ; dans l'ensemble, ces études semblaient indiquer l'existence d'un risque accru de leucémie ou de tumeurs cérébrales, mais ne présentaient pas de cohérence quant au type de cancer pour lequel il y avait augmentation du risque. Ces données ne suffisent pas à l'élaboration d'une base utilisable pour élaborer un guide pour la limitation de l'exposition aux champs ELF. Un grand nombre d'études épidémiologiques n'ont fourni aucune preuve cohérente d'effets défavorables sur la fonction de reproduction.

La mesure des réactions biologiques dans les études en laboratoire et sur des volontaires n'a donné que peu d'indications sur les effets défavorables des champs basses fréquences aux niveaux habituels d'exposition. On a estimé à 10 mA.m⁻², pour des fréquences allant jusqu'à 1 kHz, la densité liminaire de courant pour laquelle on observe des effets mineurs sur les fonctions du système nerveux central. Chez les volontaires, les effets de l'exposition qui reviennent le plus régulièrement sont l'apparition de phosphènes et une baisse minimale du rythme cardiaque pendant ou immédiatement après l'exposition aux champs ELF, sans qu'il y ait de preuve que ces effets transitoires soient associés à un risque à long terme pour la santé. Une diminution de la synthèse nocturne de mélatonine dans la glande pinéale a été notée chez diverses espèces de rongeurs après exposition à des champs électriques et magnétiques faibles, mais aucun effet systématique n'a été signalé chez des êtres humains exposés à des champs ELF en conditions contrôlées. Des études comportant une exposition à des champs magnétiques de 60 Hz et de densité de flux allant jusqu'à 20 µT n'ont pas permis d'observer des effets fiables sur les taux sanguins de mélatonine.

Fondements biologiques de la limitation de l'exposition (100 kHz – 300 GHz)

Les paragraphes qui suivent donnent un aperçu général de la littérature scientifique traitant des effets biologiques et des effets potentiels sur la santé de champs électromagnétiques de fréquence comprise entre 100 kHz et 300 GHz. Des études bibliographiques plus détaillées sont disponibles par ailleurs [NRPB, 1991 ; UNEP/WHO/IRPA, 1993 ; McKinlay et coll., 1996 ; Polk et Postow, 1996 ; Repacholi, 1998].

Effets directs des champs électromagnétiques

Études épidémiologiques

Il n'existe qu'un nombre restreint d'études consacrées aux effets sur la fonction de reproduction et au risque de cancer chez des personnes exposées aux rayonnements micro-ondes. Le PNUE, l'OMS et l'IRPA ont passé en revue les publications consacrées à ce thème [UNEP/WHO/IRPA, 1993].

Effets sur la fonction de reproduction

Deux études complètes portant sur des femmes traitées par diathermie à micro-ondes, afin de soulager les douleurs dues aux contractions utérines au cours de l'accouchement, n'ont pas permis d'apporter la preuve d'effets défavorables sur le fœtus [Daels, 1973 ; 1976]. Néanmoins, sept études portant sur l'évolution des grossesses, chez des femmes professionnellement exposées aux rayonnements micro-ondes et sur les anomalies congénitales dans leur descendance, ont donné aussi bien des résultats positifs et des résultats négatifs. Dans certaines études épidémiologiques portant sur un assez grand nombre de femmes, ouvrières travaillant au soudage de matières plastiques et kinésithérapeutes utilisant des appareils de diathermie à ondes courtes, on n'a pas noté d'effet statistiquement significatif sur les taux d'avortement spontané et les malformations fœtales [Källén et coll., 1982]. Au contraire, dans d'autres études portant sur des populations similaires de travailleuses, on a noté un risque accru de fausse couche et de malformations congénitales

[Larsen et coll., 1991 ; Ouellet-Hellstrom et Stewart, 1993]. Une étude portant sur des hommes travaillant dans des installations radar n'a pas permis de constater d'association entre l'exposition de ces hommes aux micro-ondes et le risque de syndrome de Down dans leur descendance [Cohen et coll., 1977].

Dans l'ensemble, les études portant sur les effets de l'exposition aux micro-ondes sur la fonction de reproduction sont obérées par une évaluation très imparfaite de l'exposition et, dans de nombreux cas, par le nombre limité des personnes prises en compte. Malgré les résultats, en général négatifs, de ces études, il sera difficile de tirer des conclusions claires quant au risque pour la fonction de reproduction tant que l'on ne disposera pas de données épidémiologiques complémentaires sur les sujets fortement exposés et d'une évaluation plus précise de l'exposition.

Études sur le risque de cancer

Les études sur le risque de cancer lié à l'exposition aux micro-ondes sont rares et souffrent en général de l'absence d'évaluation quantitative de l'exposition. Deux études épidémiologiques consacrées à des personnes travaillant sur des radars dans l'industrie aéronautique et dans l'armée des Etats-Unis n'ont pas apporté la preuve d'une augmentation de la morbidité ou de la mortalité, pour quelque cause que ce soit [Barron et Baraff, 1958 ; Robinette et coll., 1980 ; UNEP/WHO/IRPA, 1993]. Des résultats analogues ont été obtenus par Lillienfeld et coll. [1978] dans une étude portant sur des membres du personnel de l'ambassade des Etats-Unis à Moscou chroniquement exposés à des rayonnements micro-ondes de faible niveau. Selvin et coll. [1992] n'ont pas signalé d'élévation du risque de cancer parmi des enfants chroniquement exposés au rayonnement en provenance d'un grand émetteur de micro-ondes situé à proximité de leur domicile. Des études plus récentes n'ont pas mis en évidence d'augmentation significative des tumeurs des tissus nerveux parmi les travailleurs et le personnel militaire exposés à des champs de micro-ondes [Beall et coll., 1996 ; Grayson, 1996]. En outre, il n'a pas été observé de surmortalité globale parmi les utilisateurs de téléphones mobiles [Rothman et coll., 1996a ; 1996b], mais il est encore trop tôt pour qu'il soit possible d'observer un effet sur l'incidence du cancer ou sur la mortalité par cancer.

Une publication a signalé un risque accru de cancer chez le personnel militaire [Szmigielski et coll., 1988] ; cependant, étant donné l'absence d'indications claires sur la taille de la population concernée et les niveaux d'exposition, les résultats de cette étude sont difficiles à interpréter. Dans une étude plus récente [1996], Szmigielski a trouvé une élévation des taux de leucémie et de lymphomes chez des militaires exposés à des champs électromagnétiques, mais l'évaluation de l'exposition à ces champs reste mal définie. Quelques études récentes consacrées à des populations vivant à proximité d'installations génératrices de champs électromagnétiques semblent indiquer une augmentation locale de l'incidence de la leucémie [Hocking et coll., 1996 ; Dolk et coll., 1997a, 1997b], mais les résultats sont peu concluants. Dans l'ensemble, les résultats des quelques rares études épidémiologiques publiées ne fournissent que des informations limitées sur le risque de cancer.

Études en laboratoire

Les paragraphes qui suivent donnent une synthèse et une évaluation critique des études de laboratoire consacrées aux effets biologiques des champs électromagnétiques aux fréquences comprises entre 100 kHz et 300 GHz. Les résultats des études sur des volontaires exposés en conditions contrôlées et des études de laboratoire sur des systèmes cellulaires ou tissulaires et sur des animaux sont discutés séparément.

Études sur des volontaires

Des études réalisées par Chatterjee et coll. [1986] ont démontré que, lorsque la fréquence passe d'une valeur de l'ordre de 100 kHz à une valeur de 10 MHz, l'effet prédominant de l'exposition à un champ électromagnétique de forte intensité n'est plus une stimulation nerveuse et musculaire, mais un échauffement. A 100 kHz, la principale sensation est un fourmillement, tandis qu'à 10 MHz il s'agit de chaleur cutanée. Dans ce domaine de fréquences, il convient donc que les critères de base pour la protection de la santé permettent d'éviter la stimulation des tissus excitables et les effets d'échauffement. Aux fréquences comprises entre 10 MHz et 300 GHz, l'échauffement constitue l'effet principal de l'absorption d'énergie électromagnétique, et toute élévation de température supérieure à 1 ou 2 °C peut avoir des effets nocifs tels que le coup de chaleur ou l'insolation [ACGIH, 1996]. Des études consacrées à des personnes tra-

vaillant en conditions d'astreinte thermique ont montré que la performance dans des tâches simples se dégrade lorsque la température corporelle atteint un niveau proche des conditions physiologiques d'astreinte thermique [Ramsey et Kwon, 1988].

Des volontaires exposés à un courant haute fréquence d'environ 100 à 200 mA au niveau d'un membre ont signalé une sensation de chaleur. Il est peu probable que le DAS correspondant produise, dans le membre concerné, une élévation locale de température supérieure à 1 °C [Chatterjee et coll., 1986 ; Chen et Gandhi, 1988 ; Hoque et Gandhi, 1988], valeur considérée par certains auteurs comme la limite supérieure d'augmentation de la température sans effet nocif [UNEP/WHO/IRPA, 1993]. Les données sur les volontaires rapportées par Gandhi et coll. [1986] pour des fréquences allant jusqu'à 50 MHz, et par Tofani et coll. [1995] pour des fréquences allant jusqu'à 110 MHz (limite supérieure de la bande FM) sont en faveur d'un niveau de référence de 100 mA pour les courants traversant les membres, afin d'éviter les effets d'un échauffement excessif [Dimbylow, 1997].

Plusieurs études ont été consacrées aux réponses thermorégulatrices chez des volontaires au repos exposés à des rayonnements électromagnétiques dans des systèmes d'imagerie par résonance magnétique [Shellock et Cruess, 1987 ; Magin et coll., 1992]. Elles ont en général démontré qu'une exposition de durée inférieure ou égale à 30 minutes, dans des conditions où le DAS pour le corps entier était inférieur à 4 W.kg⁻¹, provoquait une augmentation de moins de 1 °C de la température centrale.

Études cytologiques et études sur l'animal

De nombreux rapports traitent des réponses comportementales et physiologiques des animaux de laboratoire, en particulier des rongeurs, des chiens et des primates non humains, aux effets thermiques des champs électromagnétiques, à des fréquences supérieures à 10 MHz. La thermosensibilité et les réponses thermorégulatrices sont liées à la fois à l'hypothalamus et aux récepteurs thermiques de la peau et des organes internes. Les signaux afférents reflétant une variation de température convergent au niveau du système nerveux central et modifient l'activité des principaux systèmes de contrôle neuro-endocrinien, déclenchant les réponses physiolo-

giques et comportementales nécessaires au maintien de l'homéostasie.

Lors de l'exposition d'animaux de laboratoire à des champs électromagnétiques provoquant une absorption d'énergie supérieure à 4 W.kg⁻¹ environ, on a observé un mode caractéristique de réponse thermorégulatrice dans lequel la température corporelle commence par monter, puis se stabilise à la suite de l'activation des mécanismes de thermorégulation [Michaelson, 1983]. La phase initiale de cette réaction s'accompagne d'une augmentation du volume sanguin due à la mise en circulation de fluide provenant de l'espace extracellulaire, et d'une augmentation de la fréquence cardiaque et de la pression sanguine intraventriculaire. Ces modifications cardiodynamiques sont le reflet de réponses thermorégulatrices qui favorisent la conduction de chaleur vers la surface du corps. L'exposition prolongée des animaux à des niveaux de rayonnement micro-ondes entraînant une augmentation de la température corporelle finit par provoquer une défaillance de ces mécanismes thermorégulateurs.

Plusieurs études sur des rongeurs et des singes ont également démontré la présence d'une composante comportementale dans les réponses thermorégulatrices. Une diminution des performances des rats et des singes a été observée pour des DAS de 1 - 3 W.kg⁻¹ environ [Stern et coll., 1979 ; Adair et Adams, 1980 ; de Lorge et Ezell, 1980 ; D'Andrea et coll., 1986]. Chez les singes, la dégradation du comportement de thermorégulation commence dès que la température de la région hypothalamique augmente de 0,2 - 0,3 °C [Adair et coll., 1984]. On estime que l'hypothalamus est le centre de commande des processus de thermorégulation normaux, et que son activité peut être modifiée par une légère augmentation de la température locale, dans des conditions où la température rectale reste constante.

Des études portant sur des systèmes cellulaires et animaux à des niveaux d'énergie électromagnétique absorbée qui entraînent une augmentation de la température corporelle supérieure à 1 - 2 °C [Michaelson et Elson, 1996] ont permis de mettre en évidence un grand nombre d'effets physiologiques. Il s'agit en particulier des effets suivants : modifications des fonctions nerveuses et neuromusculaires, augmentation de la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique, troubles oculaires (opacités du cristallin et anomalies de la cornée), modifications du système

immunitaire associées au stress, altérations hématologiques, perturbations de la fonction de reproduction (oligospermie, par exemple), effets tératogènes, modifications de la morphologie, de la teneur en eau et en électrolytes et des fonctions membranaires de la cellule.

En conditions d'exposition d'une partie du corps à des champs électromagnétiques intenses, des lésions thermiques significatives peuvent se produire dans des tissus sensibles tels que les yeux et les testicules. L'exposition aux micro-ondes pendant 2 à 3 heures a provoqué une cataracte chez des lapins pour des valeurs de DAS comprises entre 100 et 140 W.kg⁻¹, qui portaient le cristallin à des températures comprises entre 41 et 43 °C [Guy et coll., 1975]. Aucune cataracte n'a été observée chez des singes exposés à des champs de micro-ondes d'intensité semblable ou supérieure, probablement du fait d'une différence entre les modes d'absorption d'énergie de l'oeil du singe et du lapin. A des fréquences très élevées (de 10 à 300 GHz), l'énergie électromagnétique est absorbée principalement dans les couches épidermiques de la peau, les tissus sous-cutanés et la partie externe de l'oeil. A l'extrémité supérieure du domaine de fréquences, l'absorption se fait de plus en plus à la surface du corps. On peut éviter les lésions oculaires à ces fréquences si la densité de puissance des micro-ondes est inférieure à 50 W.m⁻² [Sliney et Wolbarsht, 1980 ; UNEP/WHO/IRPA, 1993].

On s'est beaucoup intéressé ces dernières années aux effets cancérigènes éventuels de l'exposition aux champs de micro-ondes dans le domaine de fréquences des systèmes de communication couramment utilisés, notamment des téléphones mobiles et des stations de base. Les résultats des recherches sur ce thème ont été synthétisés par l'ICNIRP [1996]. En résumé, de nombreux rapports donnent à penser que les champs de micro-ondes n'ont pas d'effets mutagènes et qu'il est par conséquent improbable que l'exposition à ces champs entraîne une cancérogenèse [NRPB, 1992 ; Cridland, 1993 ; UNEP/WHO/IRPA, 1993]. Par contre, certains rapports récents indiquent que l'exposition de rongeurs à des champs de micro-ondes avec des niveaux de DAS de l'ordre de 1 W.kg⁻¹ pourrait entraîner des ruptures de brins sur l'ADN des tissus testiculaires et cérébraux [Sarkar et coll., 1994 ; Lai et Singh, 1995, 1996] ; cependant, aussi bien l'ICNIRP [1996] que Williams [1996] ont relevé des carences méthodolo-

giques qui pourraient avoir influé de façon significative sur ces résultats.

Dans une grande étude sur des rats exposés à des micro-ondes pendant une durée allant jusqu'à 25 mois, un excès de tumeurs malignes primitives a été observé dans le groupe exposé par rapport au groupe témoin [Chou et coll., 1992]. Néanmoins, il n'a pas été noté de différence entre les groupes pour ce qui est de l'incidence des tumeurs bénignes, et la prévalence de tumeurs spécifiques n'était pas supérieure dans le groupe exposé par rapport aux rats de même lot et de même souche maintenus dans des conditions analogues (absence d'éléments pathogènes spécifiques - SPF). Dans l'ensemble, les résultats de cette étude ne peuvent pas être interprétés comme indicatifs d'un effet d'initiation tumorale des champs de micro-ondes.

Plusieurs études ont analysé les effets de l'exposition aux micro-ondes sur le développement de cellules tumorales pré-initiées. Szmigielski et coll. [1982] ont noté une élévation de la vitesse de croissance de cellules de sarcome pulmonaire transplantées chez des rats exposés à des micro-ondes de forte densité de puissance. Il est possible que cet effet résulte d'un affaiblissement de la défense immunitaire de l'hôte en réponse à l'astreinte thermique provoquée par l'exposition aux micro-ondes. Des études récentes faisant appel à des niveaux non thermiques d'irradiation par les micro-ondes n'ont pas mis en évidence d'effets sur le développement du mélanome chez la souris ou du gliome cérébral chez le rat [Satini et coll., 1988 ; Salford et coll., 1993].

Repacholi et coll. [1997] ont rapporté que l'exposition de 100 souris femelles transgéniques *Eμ-pim1* à des champs de 900 MHz pulsés à 217 Hz (largeur d'impulsion : 0,6 ms) pendant des périodes allant jusqu'à 18 mois avait entraîné un doublement de l'incidence du lymphome par rapport aux 101 souris du groupe témoin. Les souris pouvant se déplacer librement dans leur cage, les variations du DAS étaient importantes (de 0,01 à 4,2 W.kg⁻¹). La vitesse du métabolisme au repos chez ces souris étant de 7 à 15 W.kg⁻¹, seules les valeurs hautes du domaine d'exposition auraient pu produire un léger échauffement. Cette étude paraît donc suggérer qu'un mécanisme non thermique serait en cause, ce qui demande des recherches supplémentaires. Néanmoins, avant d'émettre la moindre hypothèse sur le risque pour la santé, il faut répondre à un certain nombre de

questions. Il est nécessaire de reproduire l'étude, de réduire la liberté de mouvement des animaux de façon à diminuer la variation du DAS dû à l'exposition et de déterminer s'il existe ou non une relation dose-réponse. Des études complémentaires sont nécessaires pour savoir si ces résultats se retrouvent ou non dans d'autres modèles animaux, afin d'être à même de les extrapoler à l'être humain. Il est également indispensable d'établir si les résultats obtenus avec des animaux transgéniques sont ou non applicables aux êtres humains.

Cas particulier des formes d'onde des champs pulsés et modulés en amplitude

Comparés aux rayonnements à ondes continues (CW : continuous wave), les champs de micro-ondes pulsés ayant la même vitesse moyenne de dépôt d'énergie dans les tissus sont généralement plus aptes à induire une réponse biologique, notamment s'il existe un seuil bien défini qui doit être dépassé pour que l'effet soit obtenu [ICNIRP, 1996]. L'effet d'« audition des micro-ondes » en est un exemple bien connu [Frey, 1961 ; Frey et Messenger, 1973 ; Lin, 1978] : les personnes dont l'audition est normale peuvent percevoir des champs pulsés - modulés de fréquence comprise entre 200 MHz et 6,5 GHz. Cette sensation auditive a été décrite de diverses façons, comme un bourdonnement, un claquement, un éclatement, selon les caractéristiques de modulation du champ. Les effets d'audition des micro-ondes ont été attribués à une interaction thermoélastique au niveau de la zone auditive du cortex cérébral, avec un seuil de perception de l'ordre de 100 - 400 mJ.m⁻² pour des impulsions de durée inférieure à 30 ms à 2,45 GHz (ce qui correspond à une absorption spécifique de 4 à 16 mJ.kg⁻¹). Une exposition répétée ou prolongée aux effets auditifs des micro-ondes pourrait être à l'origine d'un stress et comporte un risque de lésion.

Certains auteurs sont d'avis que la rétine, l'iris et l'endothélium cornéen du primate sont sensibles à de bas niveaux de rayonnement micro-ondes pulsé [Kues et coll., 1985 ; UNEP/WHO/IRPA, 1993]. Des transformations dégénératives des cellules photosensibles de la rétine ont été signalées pour des niveaux d'énergie absorbée de 26 mJ.kg⁻¹, ce qui est faible. Après administration de maléate de timolol, qui est utilisé dans le traitement du glaucome, le seuil de lésion rétinienne par les champs pulsés est tombé à 2,6 mJ.kg⁻¹. Un

laboratoire indépendant [Kamimura et coll., 1994] a cherché à répéter partiellement ces résultats pour des champs à ondes continues (c'est-à-dire non pulsés) ; cette entreprise n'ayant pas été couronnée de succès, il est impossible d'évaluer les implications potentielles des résultats initiaux de Kues et coll. [1985] pour la santé.

On a signalé que l'exposition à des champs de micro-ondes pulsés intenses amoindrissait la réaction de sursaut chez la souris éveillée et suscitait des mouvements corporels [NRPB, 1991 ; Sienkiewicz et coll., 1993 ; UNEP/WHO/IRPA, 1993]. Le niveau seuil d'absorption spécifique d'énergie au niveau du mésencéphale qui suscitait ces mouvements corporels était de 200 J.kg⁻¹ pour des impulsions de 10 ms. Il reste à déterminer le mécanisme de ces effets des micro-ondes pulsées, dont on pense qu'il est lié au phénomène d'audition des micro-ondes. Pour les rongeurs, les seuils auditifs sont inférieurs d'un ordre de grandeur environ à ceux de l'être humain, soit 1-2 mJ.kg⁻¹ pour les impulsions de durée inférieure à 30 ms. Il a également été noté que des impulsions de cet ordre de grandeur affectaient le métabolisme des neurotransmetteurs et la concentration des neurorécepteurs impliqués dans les réponses au stress et à l'anxiété dans différentes régions du cerveau chez le rat.

Sur la question des effets non thermiques des champs électromagnétiques hautes fréquences, la littérature est principalement centrée sur des rapports consacrés aux effets biologiques in vitro des champs modulés en amplitude, à des valeurs de DAS bien inférieures à celles qui provoquent un échauffement mesurable des tissus. Les premières études menées par deux laboratoires indépendants avaient permis de noter que les champs très hautes fréquences (VHF) modulés en amplitude à des fréquences extrêmement basses (6-20 Hz) provoquaient une libération, faible mais statistiquement significative, de l'ion calcium (Ca⁺⁺) à partir de la surface des cellules du cerveau chez le poussin [Bawin et coll., 1975 ; Blackman et coll., 1979]. Une tentative de répétition de ces résultats en utilisant le même type de champ modulé en amplitude a échoué [Albert et coll., 1987]. Un certain nombre d'autres études relatives aux effets des champs modulés en amplitude sur l'homéostasie de Ca⁺⁺ ont donné des résultats positifs et des résultats négatifs. Par exemple, des effets de ces champs sur la liaison de Ca⁺⁺ à la surface des cellules ont été observés pour les cel-

lules de neuroblastome, les cellules pancréatiques, le tissu cardiaque et les cellules du cerveau chez le chat, mais pas dans le cas de cultures de cellules nerveuses de rat, de cellules des muscles squelettiques de poussin et de cellules du cerveau de rat [Postow et Swicord, 1996].

Il a aussi été signalé que les champs modulés en amplitude modifiaient l'activité électrique du cerveau [Bawin et coll., 1974], inhibaient l'activité cytotoxique des lymphocytes T [Lyle et coll., 1983], diminuaient l'activité de la kinase dépendante de l'AMP non cyclique dans les lymphocytes [Byus et coll., 1984] et déclenchaient une augmentation transitoire de l'activité cytoplasmique de l'ornithine-décarboxylase, enzyme essentielle à la prolifération cellulaire [Byus et coll., 1988 ; Litovitz et coll., 1992]. Par contre, aucun effet n'a été noté sur toute une série d'autres systèmes cellulaires et sites d'action fonctionnelle, en particulier la calotte lymphocytaire, sur la transformation cellulaire néoplasique, ni sur diverses propriétés électriques et enzymatiques de la membrane [Postow et Swicord, 1996]. Les observations de Balcer-Kubiczek et Harrison [1991], sur l'accélération de la transformation néoplasique dans des cellules C3H/10T1/2 exposées à des micro-ondes de 2 450 MHz modulées en impulsion à 120 Hz, sont tout à fait pertinentes quant aux effets cancérogènes potentiels des champs pulsés. L'effet dépend de l'intensité du champ mais ne se produit que lorsqu'un promoteur tumoral chimique, le TPA, est présent dans le milieu de culture de la cellule. Ce résultat donne à penser que les micro-ondes pulsées pourraient avoir des effets co-cancérogènes en combinaison avec un agent chimique qui accroît le taux de prolifération des cellules transformées. A ce jour, personne n'a essayé de répéter ces résultats, dont les implications en matière d'effets sur la santé ne sont pas claires.

L'interprétation de certains des effets biologiques, observés lors de l'exposition aux champs électromagnétiques à modulation d'amplitude, est rendue plus complexe encore par l'existence apparente de « fenêtres » de réponse, à la fois dans le domaine de la densité de puissance et dans celui des fréquences. Ce phénomène, qui remet en question le concept traditionnel de relation monotone entre intensité de champ et gravité des effets biologiques, n'est correctement expliqué par aucun des modèles admis.

Dans l'ensemble, la littérature scientifique consacrée aux effets non thermiques des champs électromagnétiques à modu-

lation d'amplitude est si complexe, la validité des effets rapportés est si mal établie, et la pertinence des effets quant à la santé de l'homme si peu assurée, qu'il est impossible de prendre cet ensemble d'informations pour base en vue de définir des limites d'exposition de l'être humain à ces champs.

Effets indirects des champs électromagnétiques

Dans le domaine de fréquences 100 kHz - 110 MHz, les chocs électriques et les brûlures peuvent être causés soit par contact (toucher) entre une personne et un objet métallique non relié à la terre qui s'est chargé dans un champ, soit par contact entre une personne chargée et un objet métallique relié à la terre. Il convient de noter que la valeur supérieure du domaine de fréquences pour le courant de contact (110 MHz) est imposée par le manque de données sur les fréquences supérieures plutôt que par l'absence d'effets. Néanmoins, 110 MHz est la limite supérieure de fréquence de la bande FM. Les courants seuils qui provoquent des effets biologiques allant, par ordre de gravité croissante, de la perception à la douleur (*tableau III*) ont été mesurés lors d'expériences sur des volontaires en conditions contrôlées [Chatterjee et coll., 1986 ; Tenforde et Kaune, 1987 ; Bernhardt, 1988]. Il a été démontré qu'en général, les courants seuils qui produisent une perception et une douleur varient très peu dans le domaine de fréquences 100 kHz - 1 MHz et sont peu susceptibles d'une variation significative dans le domaine de fréquences allant jusqu'à environ 110 MHz. Comme il a été noté antérieurement pour les fréquences plus basses, il

existe des variations significatives entre la sensibilité des femmes, celle des hommes et celle des enfants pour les champs de fréquences plus élevées. Les données du tableau III représentent la fourchette des valeurs au 50^e percentile pour des individus de différentes tailles et de sensibilités différentes aux courants de contact.

Résumé des effets biologiques et des études épidémiologiques (100 kHz - 300 GHz)

D'après les données expérimentales disponibles, lorsque des personnes au repos sont exposées pendant 30 minutes environ à des champs électromagnétiques produisant un DAS pour le corps entier compris entre 1 et 4 W.kg⁻¹, l'augmentation de la température corporelle reste inférieure à 1 °C. Les données sur l'animal indiquent un seuil de réponse comportementale situé dans le même domaine de DAS. L'exposition à des champs plus intenses, qui donnent des valeurs de DAS supérieures à 4 W.kg⁻¹, peut dépasser la capacité de thermorégulation de l'organisme humain et provoquer des niveaux d'échauffement tissulaire nocifs. De nombreuses études en laboratoire sur des modèles de rongeurs et de primates non humains ont montré l'étendue des lésions tissulaires qui se produisent lorsque l'échauffement d'une partie du corps ou du corps entier entraîne une augmentation de température de plus de 1 - 2 °C. La sensibilité des différents types de tissu aux lésions thermiques varie fortement, mais le seuil d'irréversibilité des effets, même pour les tissus les plus sensibles, est supérieur à 4 W.kg⁻¹ en conditions normales d'environnement.

TABLEAU III

DOMAINES DE COURANTS SEUILS POUR LES EFFETS INDIRECTS CHEZ LES ENFANTS, LES FEMMES ET LES HOMMES (100 kHz À 300 GHz)

- RANGES OF THRESHOLD CURRENTS FOR INDIRECT EFFECTS, INCLUDING CHILDREN, WOMEN, AND MEN (100 kHz TO 300 GHz)

EFFET INDIRECT	COURANTS SEUILS (mA) À LA FRÉQUENCE :	
	100 kHz	1 MHz
SENSATION TACTILE	25 - 40	25 - 40
SENSATION DOULOUREUSE AU CONTACT AVEC LE DOIGT	33 - 55	28 - 50
CHOC DOULOUREUX/SEUIL DE RELAXATION MUSCULAIRE	112 - 224	Non déterminé
CHOC SÉVÈRE/DIFFICULTÉ À RESPIRER	160 - 320	Non déterminé

Ces données constituent la base de la restriction à l'exposition professionnelle, fixée à $0,4 \text{ W.kg}^{-1}$, ce qui laisse une marge de sécurité confortable pour d'autres conditions limitantes telles que des valeurs élevées de température ambiante ou d'humidité relative, ou un niveau élevé d'activité physique.

Les données de laboratoire et les résultats d'études limitées chez l'homme [Michaelson et Elson, 1996] font clairement apparaître que la capacité de thermorégulation de l'organisme peut être compromise par un environnement d'astreinte thermique et par la consommation de drogues et/ou d'alcool. Dans ces conditions, il convient d'introduire des facteurs de sécurité afin d'assurer une protection adéquate des personnes exposées.

L'exposition de volontaires en conditions contrôlées et les études épidémiologiques portant sur des travailleurs exposés à des sources telles que les radars ou les appareils de diathermie médicale et de thermosoudage ont fourni des données sur les réactions humaines aux champs électromagnétiques hautes fréquences qui produisent un échauffement détectable. Ces données vont tout à fait dans le sens des conclusions tirées des études de laboratoire : une augmentation de température de plus de 1 °C dans les tissus peut entraîner des effets biologiques nocifs. Des études biologiques portant sur des travailleurs exposés et sur la population générale n'ont pas fait apparaître d'effet notable sur la santé en conditions d'exposition types. Bien que les travaux épidémiologiques comportent des faiblesses, telles qu'une évaluation insuffisante de l'exposition, ces études n'ont pas réussi à démontrer de façon convaincante que les niveaux d'exposition types entraînent des effets défavorables sur la fonction de reproduction, ou un risque accru de cancer chez les personnes exposées. Cela concorde avec les résultats de recherche en laboratoire sur modèles cellulaires ou animaux, qui n'ont permis d'établir l'existence d'effets tératogènes ou cancérogènes de l'exposition à des niveaux sans effet thermique de champs électromagnétiques hautes fréquences.

L'exposition à des champs électromagnétiques pulsés d'intensité suffisante entraîne certains effets prévisibles, tels le phénomène d'audition des micro-ondes et différentes réponses comportementales. Les études épidémiologiques portant sur des travailleurs exposés et sur la population générale n'ont fourni que des informations limitées et n'ont pas démontré l'existence d'effets sur la santé. En raison de l'échec des tentatives de répétition des résultats, les graves atteintes rétiniennees signalées ont dû être remises en question.

Un grand nombre d'études portant sur les effets biologiques des champs électromagnétiques à modulation d'amplitude, dans la plupart des cas à de faibles niveaux d'exposition, ont donné des résultats positifs et des résultats négatifs. Une analyse approfondie de ces études révèle que les effets des champs à modulation d'amplitude varient fortement en fonction des paramètres d'exposition, des types de cellules et de tissus en cause et des sites d'action biologique examinés. En général, les effets de l'exposition de systèmes biologiques, à des niveaux non thermiques de champ électromagnétique à modulation d'amplitude, sont faibles et très difficiles à relier à des effets potentiels sur la santé. Il n'existe aucune preuve convaincante de l'existence de fenêtres de fréquence et de densité de puissance, pour la réponse à ces champs.

Les chocs électriques et les brûlures peuvent constituer des effets nocifs indirects des champs électromagnétiques hautes fréquences impliquant un contact entre une personne et des objets métalliques se trouvant dans le champ. A des fréquences de 100 kHz - 110 MHz (limite supérieure de la bande FM), les niveaux seuils de courant de contact qui produisent des effets allant de la perception tactile à une douleur forte ne varient pas de façon significative en fonction de la fréquence du champ. Le seuil de perception est compris entre 25 et 40 mA chez des personnes de tailles différentes, et le seuil de la douleur entre 30 et 55 mA ; au-delà de 50 mA, il peut y avoir des brûlures graves, au point de contact des tissus avec un conducteur métallique placé dans le champ.

Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électromagnétiques

Limitation de l'exposition professionnelle et de l'exposition de la population générale

La population exposée en environnement professionnel est composée d'adultes qui, en règle générale, sont exposés dans des conditions connues et formés à identifier le « risque potentiel » et à prendre les précautions qui s'imposent. La population générale, au contraire, est composée de personnes de tous âges et de tous états de santé et peut comprendre des groupes ou des individus particulièrement fragiles. Dans de nombreux cas, les individus constituant la population générale ne se rendent pas compte qu'ils sont exposés à des champs électromagnétiques. En outre, on ne peut raisonnablement s'attendre à ce que chacun d'eux prenne les précautions requises pour limiter l'exposition à un minimum ou l'éviter totalement. C'est pourquoi les restrictions à l'exposition sont plus sévères pour la population générale que pour les travailleurs exposés.

Restrictions de base et niveaux de référence

Les restrictions d'exposition sont fondées sur les effets avérés sur la santé et sont dénommées restrictions de base. Selon la fréquence du champ, les grandeurs physiques utilisées pour spécifier les restrictions de base à l'exposition aux champs électromagnétiques sont la densité de courant, le débit d'absorption spécifique et la densité de puissance. Pour que la protection contre les effets défavorables sur la santé soit assurée, il faut que ces restrictions de base ne soient pas dépassées.

Les niveaux d'exposition de référence sont fournis à des fins de comparaison avec les valeurs mesurées des grandeurs physiques ; le respect de tous les niveaux de référence donnés dans le présent guide assure normalement la conformité aux restrictions de base. Si les valeurs mesurées sont supérieures aux niveaux de référence, il ne s'ensuit pas nécessairement qu'il y ait dépassement des restrictions de base ; une analyse détaillée est nécessaire pour

savoir si les restrictions de base sont respectées ou non.

Considérations générales sur les facteurs de sécurité

Les informations disponibles sur les effets biologiques et les effets sur la santé de l'exposition de populations humaines et d'animaux de laboratoire aux champs électromagnétiques sont insuffisantes ; de ce fait, elles ne sauraient constituer une base rigoureuse pour l'établissement de facteurs de sécurité, pour l'ensemble du domaine de fréquences et pour toutes les modulations de fréquence. En outre, l'incertitude quant au choix du facteur de sécurité adéquat tient pour une part à une connaissance insuffisante du type de dosimétrie à appliquer [Repacholi, 1998]. Les paramètres généraux qui suivent ont été pris en compte lors de la définition de facteurs de sécurité pour les champs hautes fréquences :

- effets de l'exposition aux champs électromagnétiques en conditions d'environnement sévères (température élevée, etc.) et/ou pour des niveaux d'activité élevés ;
- sensibilité thermique potentiellement plus élevée dans certains groupes de population (personnes fragiles et/ou personnes âgées, nourrissons et jeunes enfants, personnes atteintes de maladies ou prenant des médicaments qui compromettent la tolérance à la chaleur).

Les facteurs supplémentaires ci-après ont été pris en compte dans la déduction de niveaux de référence pour les champs hautes fréquences :

- différences dans l'absorption de l'énergie électromagnétique, selon la taille des personnes et leur orientation par rapport au champ ;
- réflexion, focalisation et diffusion du champ incident, qui peuvent entraîner un renforcement de l'absorption locale d'énergie haute fréquence.

Restrictions de base

Différentes données scientifiques ont été utilisées pour l'élaboration des restrictions de base à l'exposition pour différents domaines de fréquences :

- entre 1 Hz et 10 MHz, les restrictions de base s'appliquent à la densité de courant, de façon à prévenir les effets sur les fonctions du système nerveux ;
- entre 100 kHz et 10 GHz, les restrictions de base s'appliquent au DAS, de façon à prévenir l'astreinte thermique au niveau

du corps entier et un échauffement local excessif des tissus ; dans le domaine compris entre 100 kHz et 10 MHz, ces restrictions s'appliquent à la fois à la densité de courant et au DAS ;

- entre 10 et 300 GHz, les restrictions de base s'appliquent à la densité de puissance, de façon à prévenir un échauffement excessif des tissus à la surface du corps ou à proximité de cette surface.

Dans le domaine de fréquences allant de quelques hertz à 1 kHz, pour des niveaux de densité de courant induit supérieurs à 100 mA.m⁻², il y a dépassement des seuils d'altération aiguë de l'excitabilité du système nerveux central et d'autres effets aigus tels que l'inversion du potentiel évoqué visuel. Compte tenu des principes de sécurité rappelés ci-dessus, il a été décidé que, pour les fréquences du domaine compris entre 4 Hz et 1 kHz, il convient de limiter l'exposition professionnelle à des champs induisant des densités de courant inférieures à 10 mA.m⁻²,

autrement dit de prendre un facteur de sécurité de 10. Pour la population générale, on applique un facteur supplémentaire de 5, ce qui donne une restriction de base à l'exposition de 2 mA.m⁻². Au-dessous de 4 Hz et au-dessus de 1 kHz, la restriction de base à la densité de courant induit augmente progressivement, ce qui correspond à l'élévation du seuil de stimulation nerveuse dans ces domaines de fréquences.

Les effets biologiques et les effets sur la santé établis pour le domaine de fréquences compris entre 10 MHz et quelques gigahertz sont cohérents avec les réactions à une élévation de la température corporelle supérieure à 1 °C. Ce niveau d'échauffement est celui qui résulte de l'exposition, pendant environ 30 minutes et en conditions d'environnement modéré, à un DAS pour le corps entier de 4 W.kg⁻¹. Un DAS moyen pour le corps entier de 0,4 W.kg⁻¹ a donc été retenu comme restriction assurant une protection adéquate en cas d'exposi-

TABLEAU IV

RESTRICTIONS DE BASE POUR LES CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES ALTERNATIFS À DES FRÉQUENCES ALLANT JUSQU'À 10 GHz (*)

- BASIC RESTRICTIONS FOR TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS FOR FREQUENCIES UP TO 10 GHz

CARACTÉRISTIQUES DE L'EXPOSITION	DOMAINE DE FRÉQUENCES	DENSITÉ DE COURANT (TÊTE ET TRONC) (mA.m ⁻²) (rms)	DAS MOYEN CORPS ENTIER (W.kg ⁻¹)	DAS LOCAL (TÊTE ET TRONC) (W.kg ⁻¹)	DAS LOCAL (MEMBRES) (W.kg ⁻¹)
TRAVAILLEURS	jusqu'à 1 Hz	40	-	-	-
	1-4 Hz	40/f	-	-	-
	4 Hz-1kHz	10	-	-	-
	1-100 kHz	f/100	-	-	-
	100 kHz-10MHz	f/100	0,4	10	20
	10 MHz-10 GHz	-	0,4	10	20
POPULATION GÉNÉRALE	jusqu'à 1 Hz	8	-	-	-
	1-4 Hz	8/f	-	-	-
	4 Hz-1kHz	2	-	-	-
	1-100 kHz	f/500	-	-	-
	100 kHz-10MHz	f/500	0,08	2	4
	10 MHz-10 GHz-	-	0,08	2	4

(*) • 1^o f est la fréquence, en hertz.

• 2^o Etant donné l'inhomogénéité électrique du corps, il convient de moyenniser les densités de courant sur une section de 1 cm² perpendiculairement à la direction du courant.

• 3^o Pour les fréquences allant jusqu'à 100 kHz, on obtient la densité de courant crête en multipliant la valeur rms par $\sqrt{2}$ (= 1,414). Pour des impulsions de durée tp, il est recommandé de calculer la fréquence équivalente applicable pour le calcul des restrictions de base selon la formule $f = 1/2 tp$.

• 4^o Pour les fréquences allant jusqu'à 100 kHz et pour les champs magnétiques pulsés, la densité de courant maximale associée aux impulsions peut se calculer à partir des temps de montée | descente et de la vitesse maximale de variation de la densité de flux magnétique. La densité de courant induit peut alors être comparée à la restriction de base applicable.

• 5^o Il faut moyenniser tous les DAS sur une période quelconque de 6 minutes.

• 6^o Pour le moyennage du DAS local, la masse de référence est une masse quelconque de 10 g de tissu d'un seul tenant ; pour l'estimation de l'exposition, il convient d'utiliser le DAS maximal ainsi obtenu.

• 7^o Pour des impulsions de durée tp, il est recommandé de calculer la fréquence équivalente applicable pour les restrictions de base selon la formule $f = 1/2 tp$. En outre, pour les expositions aux champs pulsés dans le domaine de fréquences 0,3 - 10 GHz et pour les expositions localisées à la tête, afin de limiter ou de prévenir les effets auditifs dus à l'expansion thermoélastique, on recommande une restriction de base supplémentaire : il convient que l'absorption spécifique ne dépasse pas 10 mJ.kg⁻¹ pour les travailleurs et 2 mJ.kg⁻¹ pour la population générale, moyennés sur 10 g de tissu.

TABLEAU V

**RESTRICTIONS DE BASE POUR LA DENSITÉ DE PUISSANCE
AUX FRÉQUENCES COMPRIS ENTRE 10 ET 300 GHz (*)**

- BASIC RESTRICTIONS FOR POWER
DENSITY FOR FREQUENCIES BETWEEN 10 AND 300 GHz

CARACTÉRISTIQUES DE L'EXPOSITION	DENSITÉ DE PUISSANCE (W.m ⁻²)
Travailleurs	50
Population générale	10

(*) ● 1° Il faut moyenner les densités de puissance sur 20 cm² quelconques de zone exposée et sur un intervalle de temps quelconque de 68 | f^{1,05} min (f étant exprimée en GHz) pour compenser la diminution progressive de la profondeur de pénétration avec l'augmentation de la fréquence.

● 2° Il convient que les densités de puissance maximales dans l'espace, moyennées sur 1 cm², ne dépassent pas 20 fois les valeurs ci-dessus.

TABLEAU VI

**NIVEAUX DE RÉFÉRENCE POUR L'EXPOSITION PROFESSIONNELLE
À DES CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES ALTERNATIFS
(VALEURS RMS EN CONDITIONS NON PERTURBÉES) (*)**

- REFERENCE LEVELS FOR OCCUPATIONAL EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC
AND MAGNETIC FIELDS (UNPERTURBED RMS VALUES)

DOMAINE DE FRÉQUENCES	INTENSITÉ DE CHAMP E (V.m ⁻¹)	INTENSITÉ DE CHAMP H (A.m ⁻¹)	CHAMP B (μT)	DENSITÉ DE PUISSANCE DE L'ONDE PLANE ÉQUIVALENTE Seq (W.m ⁻²)
jusqu'à 1 Hz	-	1,63 x 10 ⁵	2 x 10 ⁵	-
1 - 8 Hz	20 000	1,63 x 10 ⁵ / f ²	2 x 10 ⁵ / f ²	-
8 - 25 Hz	20 000	2 x 10 ⁴ / f	2,5 x 10 ⁴ / f	-
0,025 - 0,82 kHz	500 / f	20 / f	25 / f	-
0,82 - 65 kHz	610	24,4	30,7	-
0,065 - 1 MHz	610	1,6 / f	2,0 / f	-
1 - 10 MHz	610 / f	1,6 / f	2,0 / f	-
10 - 400 MHz	61	0,16	0,2	10
400 - 2 000 MHz	3 f ^{1/2}	0,008 f ^{1/2}	0,01 f ^{1/2}	f / 40
2 - 300 GHz	137	0,36	0,45	50

(*) ● 1° f comme indiqué dans la colonne Domaine de fréquences.

● 2° A condition que les restrictions de base soient respectées et que l'on puisse exclure les effets nocifs indirects, les valeurs d'intensité de champ peuvent être dépassées.

● 3° Aux fréquences comprises entre 100 kHz et 10 GHz, Seq, E², H² et B² doivent être moyennés sur une période quelconque de 6 minutes.

● 4° Pour les valeurs de crête aux fréquences allant jusqu'à 100 kHz, voir tableau IV, note 3°.

● 5° Pour les valeurs de crête aux fréquences supérieures à 100 kHz, voir figures 1 et 2. Entre 100 kHz et 10 MHz, les valeurs de crête des intensités de champ sont obtenues par interpolation de 1,5 fois la valeur de crête à 100 kHz à 32 fois la valeur de crête à 10 MHz. Pour les fréquences supérieures à 10 MHz, il est suggéré que la densité de puissance de crête de l'onde plane équivalente, moyennée sur la largeur d'impulsion, ne dépasse pas 1 000 fois les restrictions Seq ou que l'intensité de champ ne dépasse pas 32 fois les niveaux d'intensité de champ donnés dans le présent tableau.

● 6° Aux fréquences supérieures à 10 GHz, il faut moyenner Seq, E², H² et B² sur une période quelconque de 68 | f^{1,05} min (f étant exprimée en GHz).

● 7° Aucune valeur de champ E n'est donnée pour les fréquences inférieures à 1 Hz, qui correspondent en fait à des champs électriques statiques. Les chocs électriques dus aux sources de faible impédance sont prévenus par l'application des procédures de sécurité électrique classiques pour ces équipements.

tion professionnelle. Pour la population générale, un facteur de sécurité supplémentaire de 5 a été introduit, ce qui donne une limite de DAS moyen pour le corps entier de 0,08 W.kg⁻¹.

Le choix de restrictions de base plus basses pour l'exposition de la population générale tient compte du fait que les individus composant celle-ci peuvent différer des travailleurs, pour ce qui est de l'âge et de l'état de santé.

Dans le domaine des basses fréquences, les données associant les courants transitoires à des effets sur la santé sont actuellement peu nombreuses. L'ICNIRP recommande donc que les restrictions relatives aux densités de courant induit par des champs de crête transitoires ou de très courte durée soient considérées comme des valeurs instantanées qu'il ne convient pas de moyenner par rapport au temps.

Les restrictions de base pour les densités de courant, le DAS moyen pour le corps entier et le DAS local dans le domaine de fréquences compris entre 1 Hz et 10 GHz sont présentées dans le [tableau IV](#). Les valeurs correspondant aux fréquences situées entre 10 et 300 GHz figurent au [tableau V](#).

Niveaux de référence

Lorsque cela est nécessaire, les niveaux de référence sont obtenus à partir des restrictions de base par modélisation mathématique et extrapolation des résultats de recherches en laboratoire pour des fréquences spécifiques. Ces niveaux sont donnés pour les conditions de couplage maximal du champ à la personne exposée, assurant ainsi une protection maximale. Les [tableaux VI et VII](#) présentent respectivement les niveaux de référence pour l'exposition professionnelle et pour l'exposition de la population générale ; ces niveaux sont illustrés par les [figures 1](#) (champs électriques) [et 2](#) (champs magnétiques). Il est prévu que les niveaux de référence soient des valeurs moyennées dans l'espace pour l'ensemble du corps de la personne exposée, sous la réserve expresse que les restrictions de base pour l'exposition locale ne soient pas dépassées.

Pour les champs basses fréquences, diverses méthodes de calcul et de mesure ont été mises au point pour déduire les

niveaux de référence d'intensité de champ à partir des restrictions de base. Les simplifications utilisées jusqu'à présent ne prenaient pas en compte des phénomènes tels que l'inhomogénéité de la distribution et l'anisotropie de la conductivité électrique, ni d'autres facteurs tissulaires qui interviennent dans ces calculs.

La dépendance selon la fréquence des niveaux de référence concorde avec les données sur les effets biologiques et le couplage du champ.

La modélisation du champ magnétique est fondée sur l'hypothèse d'une conductivité homogène et isotrope du corps et ne fait appel qu'à des modèles à boucle conductrice circulaire simple pour évaluer les courants induits dans différents organes et régions du corps, la tête par exemple, en utilisant l'équation ci-après, qui s'applique à un champ sinusoïdal pur de fréquence f dérivée de la loi de Faraday sur l'induction électromagnétique :

$$J = \pi \cdot R \cdot f \cdot \sigma \cdot B \quad (4)$$

B étant la densité de flux magnétique et R le rayon de la boucle d'induction de courant.

Des systèmes plus complexes utilisent un modèle ellipsoïdal pour représenter le tronc ou le corps entier lors de l'estimation des densités de courant induit à la surface du corps [Reilly, 1989 ; 1992].

Si, pour simplifier, on suppose une conductivité homogène de $0,2 \text{ S.m}^{-1}$, une densité de flux magnétique de $100 \mu\text{T}$ à 50 Hz génère à la périphérie du corps des densités de courant comprises entre $0,2$ et 2 mA.m^{-2} [CRP, 1997]. D'après une autre analyse [NAS, 1996], des niveaux d'exposition de $100 \mu\text{T}$ à 60 Hz correspondent à des densités de courant moyennes de $0,28 \text{ mA.m}^{-2}$ et à des densités de courant maximales de l'ordre de 2 mA.m^{-2} . Des calculs plus réalistes, fondés sur des modèles plus élaborés du point de vue anatomique et électrique [Xi et Stuchly, 1994], ont donné des densités de courant maximales supérieures à 2 mA.m^{-2} pour un champ de $100 \mu\text{T}$ à 60 Hz . Toutefois, la présence de cellules biologiques influe sur la géométrie des courants et des champs induits, ce qui entraîne des différences significatives à la fois quant à l'ordre de grandeur (augmentation d'un facteur 2) et au mode d'écoulement du courant induit en comparaison de ce que prédisent les analyses simplifiées [Stuchly et Xi, 1994].

TABLEAU VII

NIVEAUX DE RÉFÉRENCE POUR L'EXPOSITION DE LA POPULATION GÉNÉRALE À DES CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES ALTERNATIFS (VALEURS RMS EN CONDITIONS NON PERTURBÉES) (*)

- REFERENCE LEVELS FOR GENERAL PUBLIC EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (UNPERTURBED RMS VALUES)

DOMAINE DE FRÉQUENCES	INTENSITÉ DE CHAMP E (V.m ⁻¹)	INTENSITÉ DE CHAMP H (A.m ⁻¹)	CHAMP B (μT)	DENSITÉ DE PUISSANCE DE L'ONDE PLANE ÉQUIVALENTE Seq (W.m ⁻²)
jusqu'à 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	-
1 - 8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	-
8 - 25 Hz	10 000	$4 000 / f$	$5 000 / f$	-
0,025 - 0,8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	-
0,8 - 3 kHz	$250 / f$	5	6,25	-
3 - 150 kHz	87	5	6,25	-
0,15 - 1 MHz	87	$0,73 / f$	$0,92 / f$	-
1 - 10 MHz	$87 / f^{1/2}$	$0,73 / f$	$0,92 / f$	-
10 - 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 - 2 000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f / 200$
2 - 300 GHz	61	0,16	0,20	10

(*) ● 1° f comme dans la colonne « Domaine de fréquences ».

● 2° A condition que les restrictions de base soient respectées et que l'on puisse exclure les effets nocifs indirects, les valeurs d'intensité de champ peuvent être dépassées.

● 3° Aux fréquences comprises entre 100 kHz et 10 GHz, Seq, E², H² et B² doivent être moyennés sur une période quelconque de 6 minutes.

● 4° Pour les valeurs de crête aux fréquences allant jusqu'à 100 kHz, voir tableau IV, note 3°.

● 5° Pour les valeurs de crête aux fréquences supérieures à 100 kHz, voir figures 1 et 2. Entre 100 kHz et 10 MHz, les valeurs de crête des intensités de champ sont obtenues par interpolation de 1,5 fois la valeur de crête à 100 kHz à 32 fois la valeur de crête à 10 MHz. Pour les fréquences supérieures à 10 MHz, il est suggéré que la densité de puissance de crête de l'onde plane équivalente, moyennée sur la largeur d'impulsion, ne dépasse pas 1 000 fois les restrictions Seq ou que l'intensité de champ ne dépasse pas 32 fois les niveaux d'intensité de champ donnés dans le présent tableau.

● 6° Aux fréquences supérieures à 10 GHz, il faut moyennner Seq, E₂, H₂ et B₂ sur une période quelconque de $68|f|^{0,05}$ min (f étant exprimée en GHz).

● 7° Aucune valeur de champ E n'est donnée pour les fréquences inférieures à 1 Hz, qui correspondent en fait à des champs électriques statiques. Les charges électriques de surface ne sont pas perçues à des intensités de champ inférieures à 25 kV.m^{-1} . Il convient d'éviter les décharges d'étincelles, source de stress ou de gêne.

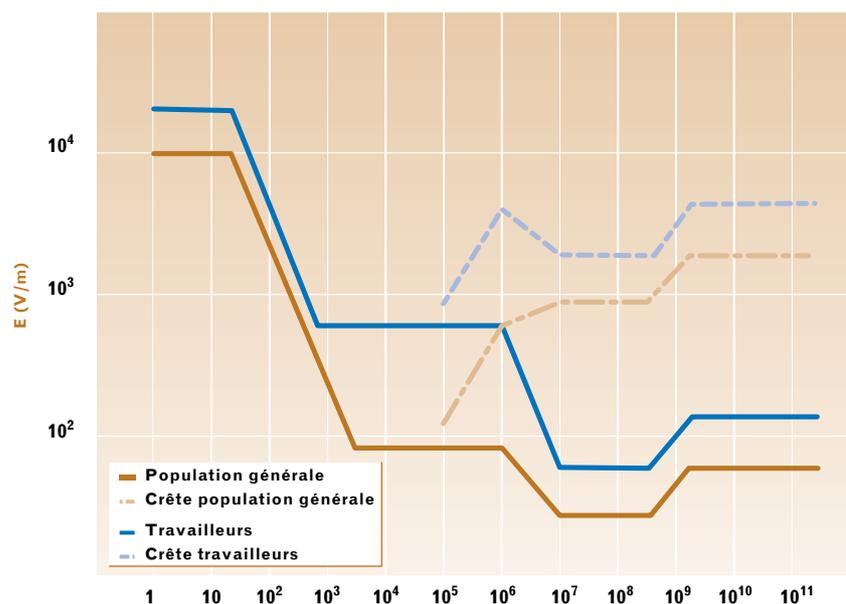


Fig. 1. Niveaux de référence pour l'exposition à des champs électriques variables dans le temps (cf. tableaux VI et VII) - Reference levels for exposure to time-varying electric fields

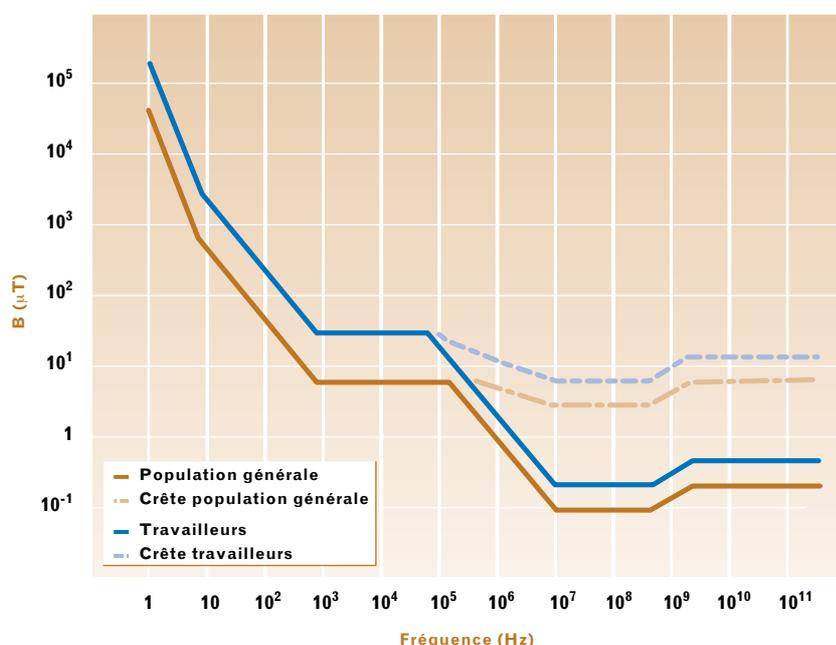


Fig. 2. Niveaux de référence pour l'exposition à des champs magnétiques variables dans le temps (cf. tableaux VI et VII)

- Reference levels for exposure to time-varying magnetic fields (compare tables VI and VII)

Dans la modélisation du champ électrique, il faut tenir compte du fait que, selon les conditions d'exposition, la taille, la forme et l'orientation du corps exposé dans le champ, la densité de charge à la surface du corps peut subir de fortes variations, d'où une distribution variable et non uniforme des courants à l'intérieur du corps. Pour les champs électriques sinusoïdaux de fréquence inférieure à 10 MHz, la densité du courant induit à l'intérieur du corps augmente avec la fréquence. La distribution des densités de courant induit varie inversement à la section transversale du corps et peut être relativement élevée au niveau du cou et des chevilles. Un niveau d'exposition de 5 kV.m⁻¹ pour la population générale correspond, dans les conditions les plus défavorables, à une densité de courant induit de l'ordre de 2 mA.m⁻² au niveau du cou et du tronc, si le vecteur du champ E est parallèle à l'axe du corps [ILO, 1994 ; CRP, 1997]. Néanmoins, la densité du courant induit par un champ de 5 kV.m⁻¹ reste généralement conforme aux restrictions de base dans les conditions d'exposition réalistes les plus défavorables.

Pour démontrer la conformité aux restrictions de base, il convient d'envisager séparément et non de façon cumulative les niveaux de référence pour les champs électriques et les champs magnétiques. En effet, du point de vue de la prévention, les courants induits par les champs élec-

triques et les champs magnétiques ne cumulent pas.

Dans le cas particulier de l'exposition professionnelle à des fréquences inférieures ou égales à 100 kHz, les intensités de champ électrique dérivées peuvent être augmentées d'un facteur 2 lorsque les effets nocifs indirects du contact avec des conducteurs chargés électriquement peuvent être exclus.

Aux fréquences supérieures à 10 MHz, les intensités de champ électrique et magnétique dérivées ont été obtenues à partir de la restriction de base exprimée en DAS pour le corps entier, sur la base de données expérimentales et par calcul. Dans le cas le plus défavorable, le couplage d'énergie atteint un maximum entre 20 MHz et plusieurs centaines de mégahertz. Dans ce domaine de fréquences, les niveaux de référence dérivés ont des valeurs minimales. Les intensités de champ magnétique dérivées ont été calculées à partir des intensités de champ électrique en utilisant la relation entre E et H en champ lointain ($E/H = 377$ ohms). En champ proche, les courbes de variation du DAS en fonction de la fréquence ne sont plus valables ; en outre, le rôle des composantes électrique et magnétique du champ doit être envisagée séparément. Pour une approximation prudente, il est possible d'utiliser les niveaux d'exposition au champ pour une évaluation en champ

proche, étant donné que le couplage de l'énergie provenant du champ électrique ou magnétique ne peut pas être supérieur aux restrictions de base exprimées en DAS. Pour une évaluation moins prudente, il est conseillé d'utiliser les restrictions de base exprimées en DAS moyen corps entier et en DAS local.

Pour l'exposition de la population générale, les niveaux de référence ont été obtenus à partir des niveaux applicables à l'exposition professionnelle, en utilisant différents facteurs sur l'ensemble du domaine de fréquences. Ces facteurs ont été choisis en fonction d'effets reconnus comme spécifiques et pertinents pour les différents domaines de fréquences. De façon générale, ils assurent le respect des restrictions de base sur l'ensemble du domaine de fréquences, et leur valeur correspond à la relation mathématique entre les restrictions de base et les niveaux dérivés, comme indiqué ci-après :

- dans le domaine de fréquences allant jusqu'à 1 kHz, les niveaux de référence pour l'exposition de la population générale aux champs électriques sont deux fois moins élevés que les valeurs fixées pour l'exposition professionnelle. Les valeurs de 10 kV.m⁻¹ à 50 Hz et 8,3 kV.m⁻¹ à 60 Hz retenues pour l'exposition professionnelle comportent une marge de sécurité suffisante pour assurer la prévention des effets de stimulation dus aux courants de contact dans toutes les conditions possibles. Les niveaux de référence pour l'exposition de la population générale ont été fixés à la moitié de ces valeurs, soit 5 kV.m⁻¹ à 50 Hz et 4,2 kV.m⁻¹ à 60 Hz, afin de prévenir les effets nocifs indirects chez plus de 90 % des personnes exposées ;
- dans le domaine des basses fréquences jusqu'à 100 kHz, les niveaux de référence pour l'exposition de la population générale aux champs magnétiques sont inférieurs d'un facteur 5 à ceux fixés pour l'exposition professionnelle ;
- dans le domaine de fréquences compris entre 100 kHz et 10 MHz, les niveaux de référence pour l'exposition de la population générale aux champs magnétiques ont été augmentés par rapport aux valeurs limites présentées dans le guide IRPA de 1988. Dans ce guide, les niveaux de référence pour l'intensité de champ magnétique étaient calculés à partir des niveaux de référence pour l'intensité de champ électrique, par application de la relation entre E et H en champ lointain. Ces niveaux de référence péchaient par excès de prudence ; en effet, aux fréquences inférieures à 10 MHz, le champ magnétique ne contribue pas de façon significa-

tive au risque de choc électrique, de brûlure ou d'effet de charge superficielle, qui constituent la raison principale de la limitation de l'exposition professionnelle aux champs électriques dans ce domaine de fréquences ;

- dans le domaine des hautes fréquences comprises entre 10 MHz et 10 GHz, les niveaux de référence pour l'exposition de la population générale aux champs électriques et magnétiques sont inférieurs d'un facteur 2,2 à ceux fixés pour l'exposition professionnelle. Ce facteur 2,2 correspond à la racine carrée de 5, facteur de sécurité entre les restrictions de base pour l'exposition professionnelle et les restrictions de base pour l'exposition de la population générale. On utilise la racine carrée pour relier les grandeurs « intensité de champ » et « densité de puissance » ;

- dans le domaine des hautes fréquences comprises entre 10 et 300 GHz, les niveaux de référence pour la population générale sont définis par la densité de puissance, comme c'est le cas pour les restrictions de base, et sont inférieurs d'un facteur 5 aux restrictions pour l'exposition professionnelle ;

- bien que l'on dispose de peu d'informations sur la relation entre valeurs de crête des champs pulsés et effets biologiques, il semblerait que, pour des fréquences supérieures à 10 MHz, la valeur de Seq moyenne sur la largeur d'impulsion ne devrait pas dépasser 1000 fois les niveaux de référence, ou que les intensités de champ ne devraient pas dépasser 32 fois les niveaux de référence d'intensité de champ donnés dans les tableaux VI et VII et illustrés par les figures 1 et 2. Pour les fréquences comprises entre 0,3 GHz et plusieurs GHz, et pour une exposition localisée à la tête, il faut, afin de limiter ou d'éviter les effets auditifs dus à l'expansion thermoélastique, limiter l'absorption spécifique due aux impulsions. Dans ce domaine de fréquences, le seuil d'absorption spécifique de 4 à 16 mJ.kg⁻¹ pour la production de ces effets correspond, pour des impulsions de 30 ms, à un DAS de crête de 130 à 520 W.kg⁻¹ au niveau du cerveau. Entre 100 kHz et 10 MHz, les valeurs de crête des intensités de champ des figures 1 et 2 sont obtenues par interpolation de 1,5 fois la valeur de crête à 100 kHz à 32 fois la valeur de crête à 10 MHz ;

- les tableaux VI et VII, ainsi que les figures 1 et 2, montrent différents points de rupture de fréquence dans les niveaux de référence dérivés pour l'exposition de la population générale et pour l'exposition professionnelle. Ce fait provient des différences entre les facteurs utilisés pour l'obtention des niveaux de référence pour la

TABLEAU VIII
NIVEAUX DE RÉFÉRENCE POUR LES COURANTS ALTERNATIFS
DUS AU CONTACT AVEC DES OBJETS CONDUCTEURS (*)
- REFERENCE LEVELS FOR TIME-VARYING
CONTACT CURRENTS FROM CONDUCTIVE OBJECTS

CARACTÉRISTIQUES DE L'EXPOSITION	DOMAINE DE FRÉQUENCES	COURANT DE CONTACT MAXIMAL (mA)
Exposition professionnelle	jusqu'à 2,5 kHz	1,0
	2,5 - 100 kHz	0,4 f (1)
	100 kHz - 110 MHz	40
Exposition de la population générale	jusqu'à 2,5 kHz	0,5
	2,5 - 100 kHz	0,2 f
	100 kHz - 110 MHz	20

(1) f est la fréquence en kHz.

TABLEAU IX
NIVEAUX DE RÉFÉRENCE POUR UN COURANT INDUITS DANS UN MEMBRE
À DES FRÉQUENCES COMPRIS ENTRE 10 ET 110 MHz (*)
- REFERENCE LEVELS FOR CURRENT INDUCED
IN ANY LIMB AT FREQUENCIES BETWEEN 10 AND 110 MHz

CARACTÉRISTIQUES DE L'EXPOSITION	COURANT (mA)
Exposition professionnelle	100
Population de la population générale	45

(*) • 1° Pour la population générale, le niveau de référence est égal au niveau de référence pour l'exposition professionnelle divisé par $\sqrt{5}$.

• 2° Pour que les restrictions de base pour le DAS local soient respectées, on calcule les niveaux de référence à partir de la racine carrée de la moyenne du carré du courant induit sur une période quelconque de 6 minutes.

population générale, la relation avec la fréquence restant toutefois généralement la même pour les niveaux d'exposition de la population générale et les niveaux d'exposition professionnelle.

Niveaux de référence pour les courants de contact et les courants induits

Jusqu'à 110 MHz, ce qui inclut la bande FM, il a été défini des niveaux de référence pour le courant de contact, au delà desquels il faut veiller à éviter les risques de choc électrique et de brûlure. Les niveaux de référence en cas de contact ponctuel sont présentés dans le [tableau VIII](#). Etant donné que les valeurs seuils des courants de contact qui provoquent des réactions biologiques chez l'enfant et chez la femme adulte représentent respectivement à peu près la moitié et les deux tiers des niveaux correspondants chez l'homme adulte, les

niveaux de référence pour le courant de contact fixés pour la population générale sont inférieurs d'un facteur 2 aux valeurs fixées pour l'exposition professionnelle.

Pour le domaine de fréquences compris entre 10 et 110 MHz, les niveaux de référence pour les courants parcourant les membres sont inférieurs aux restrictions de base pour le DAS local ([tableau IX](#)).

Exposition simultanée à des champs de fréquences différentes

Il est important de déterminer si, en cas d'exposition simultanée à des champs de fréquences différentes, les effets de l'exposition sont ou non cumulatifs. Il convient d'étudier cette question séparément pour les effets de la stimulation thermique et électrique et d'appliquer les restrictions de base indiquées ci-après. Les formules ci-dessous s'appliquent aux fré-

quences rencontrées en conditions d'exposition réelles.

Pour la stimulation électrique, c'est-à-dire aux fréquences allant jusqu'à 10 MHz, il est recommandé de sommer les densités de courant induit suivant la formule :

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1 \quad (5)$$

Pour les effets thermiques, c'est-à-dire aux fréquences supérieures à 100 kHz, il est recommandé de sommer les valeurs de DAS et de densité de puissance suivant la formule :

$$\sum_{i=100\text{kHz}}^{10\text{GHz}} \frac{\text{SAR}_i}{\text{SAR}_L} + \sum_{i>10\text{GHz}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1 \quad (6)$$

avec :

J_i : densité de courant induit à la fréquence i ,

$J_{L,i}$: restriction de base pour la densité de courant induit à la fréquence i , telle qu'elle figure dans le tableau IV,

DAS_i : DAS provoqué par l'exposition à la fréquence i ,

DAS_L : limite de DAS indiquée dans le tableau IV,

S_L : limite de densité de puissance indiquée dans le tableau V,

S_i : densité de puissance à la fréquence i .

Pour l'application pratique des restrictions de base, il convient d'utiliser les critères qui suivent en matière de niveaux de référence des intensités de champ.

Pour la densité de courant induit et les effets de la stimulation électrique, c'est-à-dire aux fréquences allant jusqu'à 10 MHz, il convient d'appliquer aux niveaux de champ les deux exigences suivantes :

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{1\text{MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1\text{MHz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1 \quad (7)$$

et

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{65\text{kHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>65\text{kHz}}^{10\text{MHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1 \quad (8)$$

avec :

E_i : intensité de champ électrique à la fréquence i ,

$E_{L,i}$: niveau de référence de champ électrique indiqué dans les tableaux VI et VII,

H_j : intensité de champ magnétique à la fréquence j ,

$H_{L,j}$: niveau de référence de champ magnétique indiqué dans les tableaux VI et VII,

$a = 610 \text{ V.m}^{-1}$ pour l'exposition professionnelle et 87 V.m^{-1} pour l'exposition de la population générale,

$b = 24,4 \text{ A.m}^{-1}$ ($30,7 \mu\text{T}$) pour l'exposition professionnelle et 5 A.m^{-1} ($6,25 \mu\text{T}$) pour l'exposition de la population générale.

On utilise les constantes a et b au-dessus de 1 MHz, pour le champ électrique et au-dessus de 65 kHz, pour le champ magnétique, étant donné que la sommation est fondée sur les densités de courant induit qu'il convient de bien distinguer des considérations sur les effets thermiques. Ces derniers sont pris en compte dans $E_{L,i}$ et de $H_{L,j}$, au-dessus de 1 MHz et de 65 kHz, respectivement (tableaux VI et VII).

Pour les effets thermiques, c'est-à-dire aux fréquences supérieures à 100 kHz, il convient d'appliquer aux niveaux de champ les deux exigences suivantes :

$$\sum_{i=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left(\frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{i>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (9)$$

et

$$\sum_{j=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left(\frac{H_j}{d} \right)^2 + \sum_{j>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{H_j}{H_{L,j}} \right)^2 \leq 1 \quad (10)$$

avec :

E_i : intensité de champ électrique à la fréquence i ,

$E_{L,i}$: niveau de référence de champ électrique indiqué dans les tableaux VI et VII,

H_j : intensité de champ magnétique à la fréquence j ,

$H_{L,j}$: niveau de référence de champ magnétique indiqué dans les tableaux VI et VII,

$c = 610/f \text{ V.m}^{-1}$ (f en MHz) pour l'exposition professionnelle et $87/f^{1/2} \text{ V.m}^{-1}$ pour l'exposition de la population générale,

$d = 1,6/f \text{ A.m}^{-1}$ (f en MHz) pour l'exposition professionnelle et $0,73/f$ pour l'exposition de la population générale.

Pour le courant parcourant un membre ou le courant de contact, il convient d'appliquer respectivement les exigences suivantes :

$$\sum_{k=10\text{MHz}}^{110\text{MHz}} \left(\frac{I_k}{I_{L,k}} \right)^2 \leq 1$$

$$\sum_{n=1\text{Hz}}^{110\text{MHz}} \frac{I_n}{I_{C,n}} \leq 1 \quad (11)$$

avec :

I_k : composante de courant parcourant le membre à la fréquence k ,

$I_{L,k}$: niveau de référence du courant parcourant le membre (cf. tableau IX),

I_n : composante de courant de contact à la fréquence n ,

$I_{C,n}$: niveau de référence du courant de contact à la fréquence n (cf. tableau VIII).

Les formules de sommation ci-dessus sont fondées sur le cas le plus défavorable d'exposition à des champs émis par des sources multiples. Par conséquent, en conditions d'exposition types, on peut admettre des niveaux d'exposition moins restrictifs que ceux indiqués dans les formules ci-dessus pour les niveaux de référence.

Mesures de prévention

L'ICNIRP note qu'il incombe aux entreprises qui sont à l'origine de l'exposition aux champs électriques et magnétiques de faire en sorte que toutes les mesures énumérées dans le présent guide soient respectées.

La protection des travailleurs comporte des mesures de prévention d'ordre technique et organisationnel, des programmes de protection individuelle et une surveillance médicale [ILO, 1994]. Il faut mettre en œuvre des mesures de protection adéquates lorsque l'exposition sur le lieu de travail a pour effet un dépassement des restrictions de base. En premier lieu, il convient, autant que faire se peut, de prendre des mesures de prévention technique, afin de réduire à des niveaux acceptables les champs émis par les équipements. Ces mesures comprennent notamment une conception satisfaisante du point de vue de la sécurité et, si nécessaire, l'utilisation de dispositifs d'interverrouillage ou de mécanismes similaires destinés à la protection de la santé.

Il est recommandé que des mesures d'ordre organisationnel (restrictions d'accès, signalisation acoustique et optique, etc.) soient mises en œuvre en liaison avec les mesures d'ordre technique. Si les mesures de protection individuelle (vêtements, etc.) peuvent être utiles dans certaines conditions, elles ne sauraient constituer qu'un dernier recours pour assurer la protection des travailleurs ; il convient, autant que faire se peut, de donner la priorité aux mesures de prévention d'ordre technique et organisationnel ; en outre, lorsque des équipements de protection individuelle tels que des gants isolants sont utilisés pour se protéger des chocs électriques et des brûlures aux hautes fréquences, les restrictions de base ne doivent pas être dépassées, l'isolation assurée par ces équipements ne protégeant que contre les effets indirects des champs.

Exception faite des vêtements et autres équipements de protection individuelle, on peut appliquer les mêmes mesures à la population générale, lorsqu'il existe un risque que les niveaux de référence déterminés pour cette population soient dépassés. Il est donc indispensable d'établir et de mettre en application des règles permettant de prévenir :

- les interférences avec des dispositifs ou équipements électroniques médicaux (en particulier, les stimulateurs cardiaques) ;
- la détonation de dispositifs électriques de mise à feu (détonateurs) ;
- les incendies et explosions résultant de l'inflammation de produits inflammables par des étincelles produites par un champ induit, un courant de contact ou une décharge disruptive.

Remerciements

Les auteurs remercient la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) de l'Association internationale de radioprotection, l'Organisation mondiale de la santé, le Programme des Nations Unies pour l'environnement, le Bureau international du travail, la Commission européenne, ainsi que le Gouvernement allemand, pour le soutien apporté à la réalisation du présent guide.

BIBLIOGRAPHIE

La présentation des références a été reproduite de façon similaire à celle de l'article original.

ADAIR, E.R. ; ADAMS, B.W. ; AKEL, G.M. - Minimal changes in hypothalamic temperature accompany microwave-induced alteration of thermoregulatory behavior. *Bioelectromagnetics* 5 : 13-30 ; 1984.

ADAIR, E.R. ; ADAMS, B.W. - Microwaves modify thermoregulatory behavior in squirrel monkey. *Bioelectromagnetics* 1 : 1-20 ; 1980.

ALBERT, E.N. ; SLABY, F. ; ROCHE, J. ; LOFTUS, J. - Effect of amplitude modulated 147 MHz radiofrequency radiation on calcium ion efflux from avian brain tissue. *Radiat. Res.* 109 : 19-27 ; 1987.

ALLEN, S.G. ; BERNHARDT, J.H. ; DRISCOLL, C.M.H. ; GRANDOLFO, M. ; MARIUTTI, G.F. ; MATTHES, R. ; MCKINLAY, A.F. ; STEINMETZ, M. ; VECCHIA, P. ; WHILLOCK, M. - Proposals for basic restrictions for protection against occupational exposure to electromagnetic non-ionizing radiations. Recommendations of an International Working Group set up under the auspices of the Commission, of the European Communities. *Phys. Med. VII* : 77-89 ; 1991.

American Conference of Government Industrial Hygienists (ACGIH) - Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists ; 1996.

ASTUMIAN, R.D. ; WEAVER, J.C. ; ADAIR, R.K. - Rectification and signal averaging of weak electric fields by biological cells. *PNAS* 92 : 3740-3743 ; 1995.

ALCER-KUBICZEK, E.K. ; HARRISON, G.H. - Neoplastic transformation of C3H/10T1/2 cells following exposure to 120 Hz modulated 2.45 GHz microwaves and phorbol ester tumor promoter. *Radiat. Res.* 126 : 65-72 ; 1991.

ARIS, D. ; ARMSTRONG, B.G. ; DEADMAN, J. ; THÉRIAULT, G.A. - A mortality study of electrical utility workers in Quebec. *Occ. Environ. Med.* 53 : 25-31 ; 1996.

ARRON, C.I. ; BARAFF, A.A. - Medical considerations of exposure to microwaves (radar). *J. Am. Med. Assoc.* 168 : 1194-1199 ; 1958.

ALUM, A. ; MEVISSSEN, M. ; KAMINO, K. ; MOHR, U. ; LÖSCHER, W. - A histopathological study on alterations in DMBA-induced mammary carcinogenesis in rats with 50 Hz, 100 μ T magnetic field exposure. *Carcinogenesis* 16 : 119-125 ; 1995.

AWIN, S.M. ; GAVALAS-MEDICI, R.J. ; ADEY, W.R. - Reinforcement of transient brain rhythms by amplitude modulated VHF fields. In : LLAURADO, J.G. ; SANCES, A. ; BATTOCLETTI, J.H., eds. - Biological and clinical effects of low frequency magnetic and electric fields. Springfield, IL : Charles C. Thomas ; 1974 : 172-186.

AWIN, S.M. ; KACZMAREK, L.K. ; ADEY, W.R. - Effects of modulated VHF fields on the central nervous system. *Ann NY Acad. Sci.* 274 : 74-81 ; 1975.

BEALL, C. ; DELZELL, E. ; COLE, P. ; BRILL, I. - Brain tumors among electronics industry workers. *Epidemiology* 7 : 125-130 ; 1996.

BENIASHVILI, D.S. ; BILANISHVILI, V.G. ; MENABDE, M.Z. - The effect of low-frequency electromagnetic fields on the development of experimental mammary tumors. *Vopr. Onkol.* 37 : 937-941 ; 1991.

BERGQVIST, U. - Pregnancy outcome and VDU Work - a review. In : LUCZAK, H. ; CAKIR, A. ; AN CAKIR, G., eds. - Work with display units '92. Selected Proceedings of the 3rd International Conference WWDO '92, Berlin Germany, 1-4 September 1992. Amsterdam : Elsevier, 1993 : 70-76.

BERNHARDT, J.H. - The direct influence of electromagnetic fields on nerve and muscle cells of man within the frequency range of 1 Hz to 30 MHz. *Radiat. Environ. Biophys.* 16 : 309-323 ; 1979.

BERNHARDT, J.H. - The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effect. *Radiat. Environ. Biophys.* 27 : 1-27 ; 1988.

BERNHARDT, J.H. - Basic criteria of ELF-standards : worldwide achievement in public and occupation health protection against radiation. Proceedings of the Eighth International Congress of the International Radiation Protection Association. Geneva : IRPA ; 1992 : 933-936.

BLACKMAN, C.F. ; ELDER, J.A. ; WEIL, C.M. ; BENANE, S.G. ; EICHINGER, D.C. ; HOUSE, D.E. - Induction of calcium-ion efflux from brain tissue by radiofrequency radiation : effects of modulation frequency and field strength. *Radio Sci.* 14 : 93-98 ; 1979.

BLANK, M., ed. - Electromagnetic fields ; biological interactions and mechanisms. Washington, DC : American Chemical Society Press ; 1995.

BRACKEN, M.B. ; BELANGER, K. ; HELLENBRAND, K. ; DLUGOSZ, L. ; HOLFORD, T.R. ; MCSHARRY, J.E. ; ADESSO, K. ; LEADERER, B. - Exposure to electromagnetic fields during pregnancy with emphasis on electrically heated beds : association with birthweight and intrauterine growth. *Epidemiol.* 6 : 263-270 ; 1995.

BRENT, R.L. ; BECKMAN, D.A. ; LANDEL, C.P. - Clinical teratology. *Curr. Opin. Pediatr.* 5 : 201-211 ; 1993.

BYUS, C.V. ; LUNDAK, R.L. ; FLETCHER, R.M. ; ADEY, W.R. - Alterations in protein kinase activity following exposure of cultured human lymphocytes to modulated microwave fields. *Bioelectromagnetics* 5 : 341-351 ; 1984.

BYUS, C.V. ; PIEPER, S.E. ; ADEY, W.R. - The effects of low-energy 60 Hz environmental electromagnetic fields upon the growth-related enzyme ornithine decarboxylase. *Carcinogenesis* 8 : 1385-1389 ; 1987.

BYUS, C.V. ; KARTUM, K. ; PIEPER, S. ; ADEY, W.R. - Increased ornithine decarboxylase activity in cultured cells exposed to low energy modulated microwave fields and phorbol ester tumor promoters. *Cancer Res.* 48 : 4222-4226 ; 1988.

CHATTERJEE, I. ; WU, D. ; GANDHI, O.P. - Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contacts hazards analysis in the VLF-MF band. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 33 : 486-494 ; 1986.

CHEN, J.Y. ; GANDHI, O.P. - Thermal implications of high SARs in the body extremities at the ANSI-recommended MF-VHF safety levels. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 35 : 435-441 ; 1988.

BIBLIOGRAPHIE

- CHERNOFF, N. ; ROGERS, J. M. ; KAVET, R. - A review of the literature on potential reproductive and developmental toxicity of electric and magnetic fields. *Toxicology* 74 : 91-126 ; 1992.
- CHOU, C.K. ; GUY, A.W. ; KUNZ, L.I. ; JOHNSON, R.B. ; CROWLEY, J.J. ; KRUPP, J.H. - Long-term, low level microwave irradiation of rats. *Bioelectromagnetics* 13 : 469-496 ; 1992.
- COHEN, B.H. ; LILLIENFIELD, A.M. ; KRAMER, A.M. ; HYMAN, L.C.C. - Parental factors in Down's syndrome : results of the second Baltimore case control study. In : HOOK, E. B. ; PORTER I. H., eds. - Population cytogenetics studies in humans. New York : Academic Press ; 1977 : 301-352.
- COLEMAN, M.P. ; BELL, C.M.J. ; TAYLOR, H.L. ; PRIMIC-ZAKELJ, M. - Leukemia and residence near electricity transmission equipment : a case-control study. *Br. J. Cancer* 60 : 793-798 ; 1989.
- Commission on Radiological Protection - Protection against low-frequency electric and magnetic fields in energy supply and use. Recommendation, approved on 16th/17th February 1995. In : Berichte der Strahlenschutzkommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 7. Stuttgart : Fischer ; 1997.
- COOK, M.R. ; GRAHAM, C. ; COHEN, H.D. ; GERKOVICH, M.M. - A replication study of human exposure to 60-Hz fields : effects on neurobehavioral measures. *Bioelectromagnetics* 13 : 261-285 ; 1992.
- CRIDLAND, N.A. - Electromagnetic fields and cancer : a review of relevant cellular studies. Chilton, UK : National Radiological Protection Board ; Report NRPB-R256 ; 1993.
- DAELS, J. - Microwave heating of the uterine wall during parturition. *Obstet. Gynecol.* 42 : 76-79 ; 1973.
- DEALS, J. - Microwave heating of the uterine wall during parturition. *J. Microwave Power* 11 : 166-167 ; 1976.
- D'ANDREA, J.A. ; DE WITT, J.R. ; GANDHI, O.P. ; STENSAAS, S. ; LORDS, J.L. ; NEILSON, H.C. - Behavioral and physiological effects of chronic 2450-MHz microwave irradiation of the rat at 0,5 mW/cm². *Bioelectromagnetics* 7 : 45-56 ; 1986.
- DE LORGE, J.O. ; EZELL, C.S. - Observing responses of rats exposed to 1.28- and 5.62-GHz microwaves. *Bioelectromagnetics* 1 : 183-198 ; 1980.
- DEMERS, P.A. ; THOMAS, D.B. ; STERNHAGEN, A. ; THOMPSON, W.D. ; CURNEN, M.G.M. ; SATARIANO, W. ; AUSTIN, D.F. ; ISSACSON, P. ; GREENBERG, R.S. ; KEY, C. ; KOLONEL, L.K. ; WEST, D.W. - Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men. *Am. J. Epidemiol.* 132 : 775-776 ; 1991.
- DIMBYLOW, P.J. - FDTD calculations of the whole-body averaged SAR in an anatomically realistic voxel model of the human body from 1 MHz to 1 GHz. *Phys. Med. Biol.* 42 : 479-490 ; 1997.
- DIMBYLOW, P.J. ; MANN, S.M. - SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile communication transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz. *Phys. Med. Biol.* 39 : 1537-1553 ; 1994.
- DIN VDE 0848, Teil 1 - Sicherheit in elektromagnetischen Feldern, Mess und Berechnungsverfahren. Berlin : Beuth-Verlag ; 1995.
- DOLK, H. ; SHADDICK, H. ; WALLS, P. ; GRUNDY, C. ; THAKRAR, B. ; KLEINSCHMIDT, I. ; ELLIOT, P. - Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part I. Sutton Coldfield Transmitter. *Am. J. Epidemiol.* 145 : 1-9 ; 1997a.
- DOLK, H. ; ELLIOT, P. ; SHADDICK, G. ; WALLS, P. ; THAKRAR, B. - Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part II. All high-power transmitters. *Am. J. Epidemiol.* 145 : 10-17 ; 1997b.
- DURNEY, C.H. ; MASSOUDI, H. ; ISKANDER, M.F. - Radiofrequency radiation dosimetry handbook. Brooks Air Force Base, TX : U.S. Air Force School of Aerospace, Medical Division, Reg. No. SAM-TR-85-73 ; 1985.
- FEYCHTING, M. ; AHLBOM, A. - Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high voltage power lines. *Am. J. Epidemiol.* 138 : 467-481 ; 1993.
- FEYCHTING, M. ; AHLBOM, A. - Magnetic fields, leukemia, and central nervous system tumors in Swedish adults residing near high-voltage power lines. *Epidemiology* 5 : 501-509 ; 1994.
- FEYCHTING, M. ; KAUNE, T.W. ; SAVITZ, D.A. ; AHLBOM, A. - Estimating exposure in studies on residential magnetic fields and cancer. *Epidemiology* 7 : 220-224 ; 1996.
- FLODERUS, B. ; PERSSON, T. ; STENLUND, C. ; WENNERBERG, A. ; OST, A. ; KNAVE, B. - Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukemia and brain tumors : a case-control study in Sweden. *Cancer Causes and Control* 4 : 465-476 ; 1993.
- FREY, A.M. - Auditory system response to radio frequency energy. *Aerospace Med.* 32 : 1140-1142 ; 1961.
- FREY, A.M. ; MESSENGER, R. - Human perception of illumination with pulsed ultra-high-frequency electromagnetic radiation. *Science* 181 : 356-358 ; 1973.
- FULTON, J.P. ; COBB, S. ; PREBLE, L. ; LEONE, L. ; FORMAN, E. - Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island. *Am. J. Epidemiol.* 111 : 292-295 ; 1980.
- GANDHI, O.P. ; CHEN, J.Y. ; RIAZI, A. - Current induced in a human being for plane wave exposure conditions 0-50 MHz and for RF sealers. *IEEE transactions on Biomedical Engineering* 33 : 757-767 ; 1986.
- GANDHI, O.P. - Some numerical methods for dosimetry : extremely low frequencies to microwave frequencies. *Radio Science* 30 : 161-177 ; 1995.
- GOODMAN, R. ; BASSET, C.A. ; HENDERSON, A.S. - Pulsing electromagnetic fields induce cellular transcription. *Science* 220 : 1283-1285 ; 1983.
- GOODMAN, R. ; HENDERSON, A.S. - Exposure of salivary gland cells to low-frequency electromagnetic fields alters polypeptide synthesis. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 85 : 3928-3932 ; 1988.
- GOODMAN, R. ; HENDERSON, A.S. - transcription and translation in cells exposed to extremely low frequency electromagnetic fields. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 25 : 335-355 ; 1991.
- GRAHAM, C. ; COOK, M.R. ; COHEN, H.D. ; GERKOVICH, M.M. - Dose-response study of human exposure to 60 Hz electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 15 : 447-463 ; 1994.
- GRAHAM, C. ; COOK, M.R. ; RIFFLE, D.W. ; GERKOVICH, M.M. ; COHEN, H.D. - Nocturnal melatonin levels in human volunteers exposed to intermittent 60 Hz magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 17 : 263-273 ; 1996.
- GRAHAM, C. ; COOK, M.R. ; RIFFLE, D.W. - Human melatonin during continuous magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics* 18 : 166-171 ; 1997.
- GRAYSON, J.K. - Radiation exposure, socioeconomic status, and brain tumor risk in the US Air Force : a nested case-control study. *Am. J. Epidemiol.* 143 : 480-486 ; 1996.
- GREENE, J.J. ; SKOWRONSKI, W.J. ; MULLINS, J.M. ; NARDONE, R.M. - Delineation of electric and magnetic field effects of extremely low frequency electromagnetic radiation on transcription. *Biochem. Biophys. Res. Comm.* 174 : 742-749 ; 1991.
- GUÉNEL, P. ; NICOLAU, J. ; IMBERNON, E. ; CHEVALIER, A. ; GOLDBERG, M. - Exposure to 50-Hz electric field and incidence of leukemia, brain tumors, and other cancers among French electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.* 144 : 1107-21 ; 1996.
- GUY, A. W. ; LIN, J. C. ; KRAMAR, P. O. ; EMERY, A. - Effects of 2450-MHz radiation on the rabbit eye. *IEEE Transactions on Microwave Theory Technique* 23 : 492-498 ; 1975.
- HEATH, C.W., Jr. - Electromagnetic field exposure and cancer : a review of epidemiologic evidence. *Ca. Cancer J. Clin.* 46 : 29-44 ; 1996.
- HOCKING, B. ; GORDON, I.R. ; GRAIN, M.L. ; HATFIELD, G. E. - Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers. *Med. J. Australia* 165 : 601-605 ; 1996.
- HOQUE, M. ; GANDHI, O.P. - Temperature distributions in the human leg for VLF-VHF exposure to the ANSI-recommended safety levels. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 35 : 442-449 ; 1988.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) - Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys.* 66 : 100-106 ; 1994.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) - Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters. *Health Phys.* 70 : 587-593 ; 1996.
- International Commission on Radiological Protection - Human respiratory tract. Model for radiological protection. Oxford : Pergamon Press ; ICRP Publication 66 ; 1994.
- Institute of Electrical and Electronic Engineers - Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. New York : Institute of Electrical and Electronic Engineers ; IEEE C95.1-1991 ; 1992.
- International Labour Organisation (ILO). Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields. Geneva : International Labour Office ; Occupational Safety and Health Series N° 69 ; 1994.
- International Radiation Protection Association/ International Non-Ionizing Radiation Committee (IRPA/INIRC) - Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. *Health Phys.* 54 : 115-123 ; 1988.

- International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee (IRPA/INIRC) - Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. *Health Phys.* 58 : 113-121 ; 1990.
- JOKELA, K. ; PURANEN, L. ; GANDHI, O.P. - Radio frequency currents induced in the human body for medium-frequency/high-frequency broadcast antennas. *Health Phys.* 66 : 237-244 ; 1994.
- KÄLLEN, B. ; MALMQUIST, G. ; MORITZ, U. - Delivery outcome among physiotherapists in Sweden : Is non-ionizing radiation a fatal hazard ? *Arch. Environ. Health* 37 : 81-85 ; 1982.
- KAMIMURA, Y. ; SATO, K. ; SAIGA, T. ; AMEMIYA, Y. - Effects of 2.45 GHz microwave irradiation on monkey eyes. *IEICE Trans. Communications E 77-B* : 762-765 ; 1994.
- KIRSCHVINK, J.L. ; KOBAYASHI-KIRSCHVINK, A. ; DIAZ RICCI, J.C. ; KIRSCHVINK, S.J. - Magnetite in human tissues : a mechanism for the biological effects of weak ELF magnetic fields. *Bioelectromagnetics Suppl. 1* : 101-113 ; 1992a.
- KIRSCHVINK, J.L. ; KOBAYASHI-KIRSCHVINK, A. ; WOODFORD, B.J. - Magnetite biomineralization in the human brain. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 89 : 7683-7687 ; 1992b.
- KUES, H.A. ; HIRST, L.W. ; LUTTY G.A. ; D'ANNA, S.A. ; DUNKELBERGER, G.R. - Effects of 2.45-GHz microwaves on primate corneal endothelium. *Bioelectromagnetics* 6 : 177-188 ; 1985.
- KUSTER, N. ; BALZANO, Q. - Energy absorption mechanisms by biological bodies in the near-field of dipole antennas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 42 : 17-23 ; 1992.
- LACY-HULBERT, A. ; WILKINS, R.C. ; HESKETH, T.R. ; METCALFE, J.C. - No effect of 60 Hz electromagnetic fields on MYC of beta-actin expression in human leukemic cells. *Rad. Res.* 144 : 9-17 ; 1995.
- LAI, H. ; SINGH, N.P. - Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 16 : 207-210 ; 1995.
- LAI, H. ; SINGH, N.P. - Single and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int. J. Radiation Biol.* 69 : 513-521 ; 1996.
- LARSEN, A.L. ; OLSEN, J. ; SAVANE, O. - Gender-specific reproductive outcome and exposure to high-frequency electromagnetic radiation among physiotherapists. *Scand. J. Work Environ. Health* 17 : 324-329 ; 1991.
- LI, D. ; CECKOWAY, H. ; MUELLER, B.A. - Electric blanket use during pregnancy in relation to the risk or congenital urinary tract anomalies among women with a history of subfertility. *Epidemiology* 6 : 485-489 ; 1995.
- LI, C.Y. ; THÉRIAULT, G. ; LIN, R.S. - Epidemiological appraisal of studies of residential exposure to power frequency magnetic fields and adult cancers. *Occup. Environ. Med.* 53 : 505-510 ; 1996.
- LIBURDY, R.P. - Biological interactions of cellular systems with time-varying magnetic fields. *Ann NY Acad. Sci.* 649 : 74-95 ; 1992.
- LILLIENFELD, A.M. ; TONASCIA, J. ; TONASCIA, S. ; LIBAUER, C.A. ; CAUTHEN, G.M. - Foreign service health status study-evaluation of health status of foreign service and other employees from selected eastern European posts. Final report. *Washington, DC* : Department of State ; Contact N° 6025-619073, NTIS PB-288163 ; 1978.
- LIN, J.C. - Microwave auditory effects and applications. *Springfield, IL* : Charles C. Thomas ; 1978.
- LINDBOHM, M.L. ; HIETANEN, M. ; KYRÖNEN, P. ; SALLMEN, M. ; VAN NANDELSTADH, P. ; TASKINEN, H. ; PEKKARINEN, M. ; YLIKOSKI, M. ; HEMMINKI, K. - Magnetic fields of video display terminals and spontaneous abortion. *Am. J. Epidemiol.* 136 : 1041-1051 ; 1992.
- LINET, M.S. ; HATCH, E.E. ; KLEINERMAN, R.A. ; ROBINSON, L.L. ; KAUNE, W.T. ; FRIEDMAN, D.R. ; SEVERSON R.K. ; HAINES, C.M. ; HARTSOCK, C.T. ; NIWA, S. ; WACHOLDER, S. ; TARONE, R.E. - Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *New Eng. J. Med.* 337 : 1-7 ; 1997.
- LITOVITZ, T.A. ; KRAUSE, D. ; MULLINS, J.M. - Effect of coherence time of the applied magnetic field on ornithine decarboxylase activity. *Biochem. Biophys. Res. Comm.* 178 : 862-865 ; 1991.
- LITOVITZ, T.A. ; MONROSE, C.J. ; WANG, W. - Dose-response implications of the transient nature of electromagnetic-field-induced bioeffects : theoretical hypotheses and predictions. *Bioelectromagnetics Suppl. 1* : 237-246 ; 1992.
- LITOVITZ, T.A. ; KRAUSE, D. ; PENAFIEL, M. ; ELSON, E.C. ; MULLINS, J.M. - The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity. *Bioelectromagnetics* 14 : 395-403 ; 1993.
- LÖSCHER, W. ; MEVISSSEN, M. ; LEHMACHER, W. ; STAMM, A. - Tumor promotion in a breast cancer model by exposure to a weak alternating magnetic field. *Cancer Letters* 71 : 75-81 ; 1993.
- LÖSCHER, W. ; MEVISSSEN, M. - Linear relationship between flux density and tumor co-promoting effect of prolonging magnetic exposure in a breast cancer model. *Cancer Letters* 96 : 175-180 ; 1995.
- LÖVSUND, P. ; ÖBERG, P. ; NILSSON, S.E.G. - Magneto- and electrophosphenes : a comparative study. *Med. Biol. Eng. Computing* 18 : 758-764 ; 1980.
- LONDON, S.J. ; THOMAS, D.C. ; BOWMAN, J.D. ; SOBEL, E. ; CHENG, T.C. ; PETERS, J.M. - Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am. J. Epidemiol.* 134 : 923-938 ; 1991.
- LOOMIS, D.P. ; SAVITZ, D.A. ; ANANTH, C.V. - Breast cancer mortality among female electrical workers in the United States. *J. Nat. Cancer Inst.* 86 : 921-925 ; 1994.
- LYLE, D.B. ; SCHECHTER, P. ; ADEY, W.R. ; LUNDAK, R.L. - Suppression of T-lymphocyte cytotoxicity following exposure to sinusoidally amplitude-modulated fields. *Bioelectromagnetics* 4 : 281-292 ; 1983.
- MAGIN, R.L. ; LIBURDY, R.P. ; PERSSON, B. - Biological effects and safety aspects of nuclear magnetic resonance imaging and spectroscopy. *Ann, NY Acad. Sci.* 649 ; 1992.
- Matanoski, G.M. ; Breyse, P.N. ; Elliott, E.A. - Electromagnetic field exposure and male breast cancer. *Lancet* 337 : 737 ; 1991.
- MCCANN, J. ; DIETRICH, F. ; RAFFERTY, C. ; MARTIN, A. - A critical review of the genotoxic potential of electric and magnetic fields. *Mutation Res.* 297 : 61-95 ; 1993.
- MCDOWALL, M. - Mortality in persons resident in the vicinity of electricity transmissions facilities. *Br. J. Cancer* 53 : 271-279 ; 1985.
- MCKINLAY, A.F. ; ANDERSEN, J.B. ; BERNHARDT, J.H. GRANDOLFO, M. ; HOSSMANN, K.A. ; MILD, K.H. ; SWERDLOW, A.J. ; VAN LEEUWEN, M. ; VERSCHAEVE, L. ; VEYRET, B. - Radiotelephones and human health - proposal for a European research programme. Report of a European Commission Expert Group. *Brussels. European Commission Directorate General XIII* ; 1996.
- MCLEAN, J. ; STUCHLY, M.A. ; MITCHEL, R.E. ; WILKINSON, D. ; YANG, H. ; GODDARD, M. ; LECUYER, D.W. ; SCHUNK, M. ; CALLARY, E. ; MORRISON, D. - Cancer promotion in a mouse-skin model by a 60-Hz magnetic field : II. Tumor development and immune response. *Bioelectromagnetics* 12 : 273-287 ; 1991.
- MEVISSSEN, M. ; STAMM, A. ; BUNTENKÖTTER, S. ; ZWINGELBERG, R. ; WAHNSCHAFFE, U. ; LÖSCHER, W. - Effects of magnetic fields on mammary tumor development induced by 7,12 dimethylbenz(a)anthracene in rats. *Bioelectromagnetics* 14 : 131-143 ; 1993.
- MEVISSSEN, M. ; KIETZMANN, M. ; LÖSCHER, W. - In vivo exposure of rats to weak alternating magnetic field increases ornithine decarboxylase activity in the mammary gland by a similar extent as the carcinogen DMBA. *Cancer Letters* 90 : 207-214 ; 1995.
- MICHAELIS, J. ; SCHÜTZ, J. ; MEINERT, R. ; MENGER, M. ; GRIGAT, J. P. ; KALETSCH, U. ; MIESNER, A. ; STAMM, A. ; BRINKMANN, K. ; KÄRNER H. - Childhood leukemia and electromagnetic fields : results of a population-based case-control study in Germany. *Cancer Causes and Control* 8 : 167-174 ; 1997.
- MICHAELSON, S.M. - Biological effects and health hazards of RF and MW energy, fundamentals and overall phenomenology. In : Grandolfo, M. ; Michaelson, S. M. ; Rindi, A. ; eds. *Biological effects and dosimetry of nonionizing radiation.* New York : Plenum Press ; 1983 ; 337-357.
- MICHAELSON, S.M. ; ELSON, E.C. - Modulated fields and « window » effects. In : POLK, C. ; POSTOW, E. ; eds. - *Biological effects of electromagnetic fields.* Boca Raton, FL : CRC Press ; 1996 : 435-533.
- MILHAM, S., JR. - Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. *New Eng. J. Med.* 307 : 294 ; 1982.
- MILLER, A.B. ; TO, T. ; AGNEW, D.A. ; WALL, C. ; GREEN, L.M. - Leukemia following occupational exposure to 60-Hz electric and magnetic fields among Ontario electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.* 144 : 150-160 ; 1996.
- MURPHY, J.C. ; KADEN, D.A. ; WARREN, J. ; SIVAK, A. - Power frequency electric and magnetic fields : a review of genetic toxicology. *Mutation Res.* 296 : 221-240 ; 1993.
- MYERS, A. ; CARTWRIGHT, R.A. ; BONNELL, J.A. ; MALE, J.C. ; CARTWRIGHT, S.C. - Overhead power lines and childhood cancer. *International Conference of Electric and Magnetic Fields in Med. and Biology.* London, December 4-5. *IEEE Conf. Publ. N° 257* ; 1985 : 126.
- National Academy of Science/National Research Council - Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields. *Washington, DC* : National Academy Press ; 1996.

BIBLIOGRAPHIE

- National Council of Radiation Protection - Radiofrequency electromagnetic fields. Properties, quantities and units, biophysical interaction, and measurement. Washington, DC : National Council on Radiation Protection and Measurement ; NCRP Report 67 ; 1981.
- National Council on Radiation Protection - A practical guide to the determination of human exposure to radio-frequency fields. Washington, DC : National Council on Radiation Protection and Measurement ; NCRP Report 119 ; 1993.
- National Radiological Protection Board - Biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation : III : Radiofrequency and microwave radiation. Chilton, UK : National Radiological Protection Board ; Report R-240 ; 1991.
- National Radiological Protection Board. - Electromagnetic fields and the risk of cancer. Report of an Advisory Group on Non ionising Radiation. Chilton, UK : National Radiological Protection Board ; NRPB Documents 3(1) ; 1992.
- National Radiological Protection Board. - Electromagnetic fields and the risk of cancer. Summary of the views of the Advisory Group on Non-ionising Radiation on epidemiological studies published since its 1992 report. Chilton, UK : National Radiological Protection Board ; NRPB Documents 4(5) ; 1993.
- National Radiological Protection Board - Health effects related to the use of visual display units. Report by the Advisory Group on Non-ionising Radiation. Chilton, UK : National Radiological Protection Board ; BRPB Documents 5(2) ; 1994a.
- National Radiological Protection Board. - Electromagnetic fields and the risk of cancer. Supplementary report by the Advisory Group on Non-Ionising Radiation of 12 April 1994. Radiol. Prot. Bull. 154 : 10-12 ; 1994b.
- OLSEN, J.H. ; NIELSEN, A. ; SCHULGEN, G. - Residence near high-voltage facilities and the risk of cancer in children. Danish Cancer Registry ; AG-NIR, 1-26 ; 1993.
- Oak Ridge Associated Universities - Health effects of low-frequency electric and magnetic fields. Oak Ridge, TN : Oak Ridge Associated Universities ; ORAU 92[F9] ; 1992.
- QUELLET-HELLSTROM, R. ; STEWART, W.F. - Miscarriages among female physical therapists, who report using radio and microwave-frequency electromagnetic radiation. Am. J. Epidemiol. 138 : 775-786 ; 1993.
- PHILLIPS, J.L. ; HAGGREN, W. ; THOMAS, W.J. ; ISHIDA-JONES, T. ; ADEY, W.R. - Magnetic field-induced changes in specific gene transcription. Biochim. Biophys. Acta 1132 : 140-144 ; 1992.
- POLK, C. ; POSTOW, E. - Biological effects of electromagnetic fields. 2nd ed. Boca Raton, FL : CRC Press ; 1996.
- POLSON, M. J.R. ; BARKER, A.T. ; FREESTON, I.L. - Stimulation of nerve trunks with time-varying magnetic fields. Med. Biol. Eng. Computing 20 : 243-244 ; 1982.
- POSTOW, E. ; SWINCORD, M.L. - Modulated fields and « window » effects. In : POLK, C. ; POSTOW, E. - Handbook of biological effects of electromagnetic fields. Boca Raton, FL : CRC Press ; 1996 : 535-580.
- PRESTON-MARTIN, S. ; PETERS, J.M. ; YU, M.C. ; GARABRANT, D.H. ; BOWMAN, J.D. - Myelogenous leukemia and electric blanket use. Bioelectromagnetics 9 : 207-213 ; 1988.
- PRESTON-MARTIN, S. ; NAVIDI, W. ; THOMAS, D. ; LEE, P.J. ; BOWMAN, J. ; POGODA, J. - Los Angeles study of residential magnetic fields and childhood brain tumors. Am. J. Epidemiol. 143 : 105-119 ; 1996a.
- PRESTON-MARTIN, S. ; GURNEY, J.G. ; POGODA, J.M. ; HOLLY, E.A. ; MUELLER, B.A. - Brain tumor risk in children in relation to use of electric blankets and water bed heaters : results from the United States West Coast Childhood Brain Tumor Study. Am. J. Epidemiol. 143 : 1116-1122 ; 1996b.
- RAMSEY, J.D. ; KWON, Y.C. - Simplified decision rules for predicting performance loss in the heat. In : Proceedings Seminar on heat stress indices. Luxembourg, CEC ; 1988.
- RANNUNG, A. ; EKSTRÖM, T. ; MILD, K.H. ; HOLMBERG, B. ; GIMENEZ-CONTI, I. ; SLAGA, T.J. - A study on skin tumour formation in mice with 50-Hz magnetic field exposure. Carcinogenesis 14 : 573-578 ; 1993a.
- RANNUNG, A. ; HOLMBERG, B. ; EKSTRÖM, T. ; MILD, K.H. - Rat liver foci study on coexposure with 50-Hz magnetic fields and known carcinogens. Bioelectromagnetics 14 : 14-27 ; 1993b.
- RANNUNG, A. ; HOLMBERG, B. ; MILD, K.H. - A Rat liver foci promotion study with 50-Hz magnetic fields. Environ. Res. 62 : 223-229 ; 1993c.
- RANNUNG, A. ; HOLMBERG, B. ; EKSTRÖM, T. ; MILD, K.H. ; GIMENEZ-CONTI, I. ; SLAGA, T.J. - Intermittent 50 Hz magnetic field and skin tumour promotion in Sencar mice. Carcinogenesis 15 : 153-157 ; 1994.
- REILLY, J.P. - Peripheral nerve stimulation by induced electric currents : exposure to time-varying magnetic fields. Med. Biol. Eng. Computing 3 : 101-109 ; 1989.
- REILLY, J.P. - Electrical stimulation and electropathology. Cambridge, MA : Cambridge University Press ; 1992.
- REPACHOLI, M.H. - Low-level exposure to radiofrequency fields : health effects and research needs. Bioelectromagnetics 19 : 1-19 ; 1998.
- REPACHOLI, M.H. ; STOLWIJK, J.A.J. - Criteria for evaluating scientific literature and developing exposure limits. Rad. Protect. Australia 9 : 79-84 ; 1991.
- REPACHOLI, M.H. ; CARDIS, E. - Criteria for EMF health risk assessment. Rad. Protect. Dosim. 72 : 305-312 ; 1997.
- REPACHOLI, M.H. ; BASTEN, A. ; GEBSKI, V. ; NOONAN, D. ; FINNIE, J. ; HARRIS, A.W. - Lymphomas in Eμ-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900-MHz electromagnetic fields. Rad. Res. 147 : 631-640 ; 1997.
- ROBINETTE, C.D. ; SILVERMAN, C. ; JABLON, S. - Effects upon health of occupational exposure to microwave radiation (radar). Am. J. Epidemiol. 112 : 39-53 ; 1980.
- ROTHMAN, K.J. ; CHOU, C.K. ; MORGAN, R. ; BALZANO, Q. ; GUY, A.W. ; FUNCH, D.P. ; PRESTON-MARTIN, S. ; MANDEL, J. ; STEFFENS, R. ; CARLO, G. - Assessment of cellular telephone and other radio frequency exposure for epidemiologic research. Epidemiology 7 : 291-298 ; 1996a.
- ROTHMAN, K.J. ; LOUGHLIN, J.E. ; FUNCH, D.P. ; DREYER, N.A. - Overall mortality of cellular telephone customers. Epidemiology 7 : 303-305 ; 1996b.
- RUPPE, I. ; HENTSCHEL, K. ; EGGERT, S. ; GOLTZ, S. - Experimentelle Untersuchungen zur Wirkung von 50 Hz Magnetfeldern. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin, fb 11.003 ; 1995 (in German).
- SAFFER, J.D. ; THURSTON, S.J. - Cancer risk and electromagnetic fields. Nature 375 : 22-23 ; 1995.
- SALFORD, L.G. ; BRUN, A. ; EBERHARDT, J.L. - Experimental studies of brain tumor development during exposure to continuous and pulsed 915 MHz radiofrequency radiation. Bioelectrochem. Bioenerg. 30 : 313-318 ; 1993.
- SANDER, R. ; BRINKMANN, J. ; KÜHNE, B. - Laboratory studies on animal and human beings exposed to 50-Hz electric and magnetic fields. CIGRE, International Congress on Large High Voltage Electric systems, Paris, 1-9 September ; CIGRE Paper 31-01 ; 1982.
- SANTINI, R. ; HOSNI, M. ; DESCHAUX, P. ; PACKECO, H. - B16 melanoma development in black mice exposed to low-level microwave radiation. Bioelectromagnetics 9 : 105-107 ; 1988.
- SARKAR, S. ; ALI, S. ; BEHARI, J. - Effect of low power microwave on the mouse genome : a direct DNA analysis. Mutation Res. 320 : 141-147 ; 1994.
- SAVITZ, D.A. - Overview of epidemiological research on electric and magnetic fields and cancer. Am. Ind. Hyg. Ass. J. 54 : 197-204 ; 1993.
- SAVITZ, D.A. ; AHLBOM, A. - Epidemiologic evidence on cancer in relation to residential and occupational exposure. In : Biologic effects of electric and magnetic fields, Vol. 2. New York : Academic Press ; 1994 : 233-262.
- SAVITZ, D.A. ; LOOMIS, D.P. - Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. Am. J. Epidemiol. 141 : 123-134 ; 1995.
- SAVITZ, D.A. ; WACHTEL, H. ; BARNES, F.A. ; JOHN, E.M. ; TVRDIK, J.G. - Case control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields. Am. J. Epidemiol. 128 : 21-38 ; 1988.
- SAVITZ, D.A. ; JOHN, E.M. ; KLECKNER, R.C. - Magnetic field exposure from electric appliances and childhood cancer. Am. J. Epidemiol. 131 : 763-773 ; 1990.
- SCHNORR, T.M. ; GRAJEWSKI, B.A. ; HORNUNG, R.W. ; THUN, M.J. ; EGELAND, G.M. ; MURRAY, W.E. ; CONOVER, D.L. ; HALPERIN, W.E. - Video display terminals and the risk of spontaneous abortion. New Eng. J. Med. 324 : 727-733 ; 1991.
- SCHREIBER, G.H. ; SWAEN, G.M. ; MEIJERS, J.M. ; SLANGEN, J.J. ; STURMANS, F. - Cancer mortality and residence near electricity transmission equipment : a retrospective cohort study. Int. J. Epidemiol. 22 : 9-15 ; 1993.

- SELMAOUI, B. ; LAMBROZO, J. ; TOUITOU, Y. - Magnetic fields and pineal function in humans : evaluation of nocturnal acute exposure to extremely low frequency magnetic fields on serum melatonin and urinary 6-sulfatoxymelatonin circadian rhythms. *Life Sci.* 58 : 1539-1549 ; 1996.
- SELVIN, S. ; SCHULMAN, J. ; MERRIL, D.W. - Distance and risk measures for the analysis of spatial data : a study of childhood cancers. *Soc. Sci. Med.* 34 : 769-777 ; 1992.
- SEVERSON, R.K. ; STEVENS, R.G. ; KAUNE, W.T. ; THOMAS, D.B. ; HOUSER, L. ; DAVIS, S. ; SEVER, L.E. - Acute nonlymphocytic leukemia and residential exposure to power frequency magnetic fields. *Am. J. Epidemiol.* 128 : 10-20 ; 1988.
- SHAW, G.W. ; CROEN, L.A. - Human adverse reproductive outcomes and electromagnetic fields exposures : review of epidemiologic studies. *Environ. Health Persp.* 101 : 107-119 ; 1993.
- SHELLOCK, F.G. ; CRUES, J.V. - Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical imaging at 1.5 T. *Radiology* 163 : 259-262 ; 1987.
- SIENKIEWICZ, Z.J. ; SAUNDERS, R.D. ; KOWALCZUK, C.I. - The biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation : II Extremely low frequency electric and magnetic fields. *Chilton, UK : National Radiological Protection Board ; NRPB R 239 ; 1991.*
- SIENKIEWICZ, Z.J. ; CRIDLAND, N.A. ; KOWALCZUK, C.I. ; SAUNDERS, R.D. - Biological effects of electromagnetic fields and radiations. In : STONE, W.R. ; HYDE, G., eds. - The review of radio science : 1990-1992. *Oxford : Oxford University Press ; 1993, 737-770.*
- SILNY, J. - The influence threshold of a time-varying magnetic field in the human organism. In : BERNHARDT, J.H. ed. - Biological effects of static and extremely low frequency magnetic fields. *Munich : MMV Medizin Verlag ; 1986 : 105-112.*
- SLINEY, D. ; WOLDBARSHT, M. - Safety with laser and other optical sources. *London : Plenum Press ; 1980.*
- SOBEL, E. ; DAVANIPOUR, Z. - EMF exposure may cause increased production of amyloid beta and eventually lead to Alzheimer's disease. *Neurology* 47 : 1594-1600 ; 1996.
- STERN, S. ; MARGOLIN, L. ; WEISS, B. ; LU, S.T. ; MICHAELSON, S.M. - Microwaves : effects on thermoregulatory behavior in rats. *Science* 206 : 1198-1201 ; 1979.
- STEVENS, R.G. - Electric power use and breast cancer : a hypothesis. *Am. J. Epidemiol.* 125 : 556-561 ; 1987.
- STEVENS, R.G. ; DAVIS, S. ; THOMAS, D.B. ; ANDERSON, L.E. ; WILSON, B.W. - Electric power, pineal function and the risk of breast cancer. *The FASEB Journal* 6 : 853-860 ; 1992.
- STEVENS, R.G. ; DAVIS, S. - The melatonin hypothesis : electric power and breast cancer. *Environ. Health Persp.* 104 (Suppl. 1) : 135-140 ; 1996.
- STOLLERY, B.T. - Effects of 50 Hz electric currents on mood and verbal reasoning skills. *Br. J. Ind. Med.* 43 : 339-439 ; 1986.
- STOLLERY, B.T. - Effects of 50 Hz electric currents on vigilance and concentration. *Br. J. Ind. Med.* 44 : 111-118 ; 1987.
- STUCHLY, M.A. ; MCLEAN, J.R.N. ; BURNETT, R. ; GODDARD, M. ; LECUYER, D.W. ; MITCHEL, R.E.J. - Modification of tumor promotion in the mouse skin by exposure to an alternating magnetic field. *Cancer Letters* 65 : 1-7 ; 1992.
- STUCHLY, M.A. ; XI, W. - Modelling induced currents in biological cells exposed to low-frequency magnetic fields. *Phys. Med. Biol.* 39 : 1319-1330 ; 1994.
- SZMIGIELSKI, S. - Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation. *Sci. Tot. Environ.* 180 : 9-17 ; 1996.
- SZMIGIELSKI, S. ; SZUDINSKI, A. ; PIETRASZEK, A. BIELEC, M. ; WREMBEL, J.K. - Accelerated development of spontaneous and benzo(a)pyrene-induced skin cancer in a mice exposed to 2 450-MHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics* 3 : 179-191 ; 1982.
- SZMIGIELSKI, S. ; BIELEC, M. ; LIPSKI, S. ; SOLOLSKA, G. - Immunologic and cancer-related aspects of exposure to low-level microwave and radiofrequency fields. In : MARINO A.A., ed. - Modern bioelectricity. *New York : Marcel Dekker ; 1988 : 861-925.*
- TENFORDE, T.S. - Biological interactions and human health effects of extremely low frequency magnetic fields. In : ANDERSON, L.E. ; STEVENS, R.G. ; WILSON, B.W. eds - Extremely low-frequency electromagnetic fields : the question of cancer. *Columbia, OH : Battelle Press ; 1990 : 291-315.*
- TENFORDE, T.S. - Biological interactions of extremely low frequency electric and magnetic fields. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 25 : 1-17 ; 1991.
- TENFORDE, T.S. - Biological interactions and potential health effects of extremely low frequency magnetic fields from power lines and other common sources. *Ann. Rev. Public Health* 13 : 173-196 ; 1992.
- TENFORDE, T.S. - Cellular and molecular pathways of extremely low frequency electromagnetic field interactions with living systems. In : BLANK, M., ed. - Electricity and magnetism in biology and medicine. *San Francisco, CA : San Francisco Press ; 1993 ; 1-8.*
- TENFORDE, T.S. - Interactions of ELF magnetic fields with living systems. In : Polk, C. ; Postow, E., eds. *Biological effects of electromagnetic fields. Boca Raton, FL : CRC Press ; 1996 : 185-230.*
- TENFORDE, T.S. ; KAUNE, W.T. - Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans. *Health Phys.* 53 : 585-606 ; 1987.
- THÉRIAULT, G. ; GOLDBERG, M. ; MILLER, A.B. ; ARMSTRONG, B. ; GUÉNEL, P. ; DEADMAN, J. ; IMBERNON, E. ; TO, T. ; CHEVALIER, A. ; CYR, D. ; WALL, C. - Cancer risks associated with exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France - 1970-1989. *Am. J. Epidemiol.* 135:550-572 ; 1994.
- TOFANI, S. ; D'AMORE, G. ; FIANDINO, G. ; BENEDETTO, A. ; GANDHI, O.P. ; CHEN, J.Y. - Induced foot-currents in humans exposed to VHF radio-frequency EM fields. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 37 : 96 ; 1995.
- TOMENIUS, L. - 50-Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm county. *Bioelectromagnetics* 7 : 191-207 ; 1986.
- TYNES, T. ; ANDERSEN, A. ; LANGMARK, F. - Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *Am. J. Epidemiol.* 136 : 81-88 ; 1992.
- TYNES, T. ; HALDORSEN, T. - Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines. *Am. J. Epidemiol.* 145 : 219-226 ; 1997.
- UENO, S. - Biological effects of magnetic and electromagnetic fields. *New York : Plenum Press ; 1996.*
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association -Extremely low frequency (ELF) fields. *Geneva : World Health Organization ; Environmental Health Criteria* 35 ; 1984.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. Magnetic Fields. *Geneva : World Health Organization ; Environmental Health Criteria* 69 ; 1987.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association -Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz). *Geneva : World Health Organization ; Environmental Health Criteria* 137 ; 1993.
- VENA, J.E. ; GRAHAM, S. ; HELLMAN, R. ; SWANSON, M. ; BRASURE, J. - Use of electric blankets and risk of post-menopausal breast cancer. *Am. J. Epidemiol.* 134 : 180-185 ; 1991.
- VENA, J.E. ; FREUDENHEIM, J.L. ; MARSHALL, J.R. ; LAUGHLIN, R. ; SWANSON, M. ; GRAHAM, S. - Risk of premenopausal breast cancer and use of electric blankets. *Am. J. Epidemiol.* 140 : 974-979 ; 1994.
- VERKASALO, P.K. - Magnetic fields and leukemia : risk for adults living next to power lines. *Scand. J. Work Environ. Health* 22 (Suppl. 2) : 7-55 ; 1996.
- VERKASALO, P.K. ; PUKKALA, E. ; HONGISTO, M.Y. ; VALJUS, J.E. ; JÖRVINEN, P.J. ; HEIKKILÖ, K.V. ; KOSKENVUO, M. - Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. *Br. Med. J.* 307 : 895-899 ; 1993.
- VERKASALO, P.K. ; PUKKALA, E. ; KAPRIO, J. ; HEIKKILÄ, K.V. ; LOSKENVUO, M. - Magnetic fields of high voltage power lines and risk of cancer in Finnish adults : nationwide cohort study. *Br. Med. J.* 313 : 1047-1051 ; 1996.
- VERREAU, R. ; WEISS, N.S. ; HOLLENBACH, K.A. ; STRADER, C.H. ; DALING, J.R. - Use of electric blankets and risk of testicular cancer. *Am. J. Epidemiol.* 151 : 759-762 ; 1990.
- WALLECZEK, J. - Electromagnetic field effects on cells of the immune system : the role of calcium signaling. *The FASEB Journal* 6 : 3177-3188 ; 1992.
- WALLECZEK, J. ; LIBURNY, R.P. - Nonthermal 60-Hz sinusoidal magnetic-field exposure enhances $^{45}\text{Ca}^{2+}$ uptake in rat thymocytes : dependence on mitogen activation. *FEBS Letters* 271 : 157-160 ; 1990.
- WERTHEIMER, N. ; LEEPER, E. - Electrical wiring configuration and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol.* 102 : 273-284 ; 1979.
- WILLIAMS, G.M. - Comment on « Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells » by H. Lai and N.P. Singh. *Bioelectromagnetics* 17 : 165 ; 1986.
- XI, W ; STUCHLY, M.A. - High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields. *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.* 9 : 127-134 ; 1994.

ANNEXE I

GLOSSAIRE - GLOSSARY

- ▷ **Absorption.** En matière de propagation des ondes radioélectriques, atténuation d'une onde radio par dissipation de son énergie, c'est-à-dire par transformation en une autre forme d'énergie, par exemple en chaleur.
- ▷ **Absorption spécifique (AS).** Énergie absorbée par unité de masse de tissu biologique ; elle s'exprime en joules par kilogramme ($J.kg^{-1}$) ; l'absorption spécifique est l'intégrale sur le temps du débit d'absorption spécifique.
- ▷ **Barrière hémato-encéphalique.** Concept fonctionnel élaboré pour expliquer la raison pour laquelle de nombreuses substances transportées par le sang pénètrent facilement dans d'autres tissus sans pénétrer dans le cerveau ; cette « barrière » fonctionne comme s'il s'agissait d'une membrane continue doublant le système cérébrovasculaire. Ces cellules de l'endothélium capillaire cérébral forment une barrière pratiquement continue qui fait obstacle à la pénétration de substances dans le cerveau à partir du système vasculaire.
- ▷ **Champ lointain.** Région dans laquelle la distance à une antenne émettant un rayonnement est supérieure à la longueur d'onde du champ électromagnétique rayonné ; en champ lointain, les composantes du champ (E et H) sont perpendiculaires à la direction de propagation, et la géométrie du champ est indépendante de la distance à la source.
- ▷ **Champ proche.** Région dans laquelle la distance à une antenne émettant un rayonnement est inférieure à la longueur d'onde du champ électromagnétique rayonné. Note : L'intensité de champ magnétique multipliée par l'impédance de l'espace traversé n'est pas égale à l'intensité de champ électrique et, à des distances à l'antenne inférieures au dixième de la longueur d'onde, ces grandeurs varient en raison inverse du carré ou du cube de la distance si l'antenne est petite comparée à cette distance.
- ▷ **Conductance.** Inverse de la résistance ; elle s'exprime en siemens (S).
- ▷ **Conductivité électrique.** Grandeur scalaire ou vectorielle qui, lorsqu'elle est multipliée par l'intensité de champ électrique, donne la densité du courant de conduction ; c'est l'inverse de la résistivité. Elle s'exprime en siemens par mètre ($S.m^{-1}$).
- ▷ **Constante diélectrique.** Voir Permittivité.
- ▷ **Débit d'absorption spécifique (DAS).** Débit d'absorption d'énergie dans les tissus biologiques ; il s'exprime en watts par kilogramme ($W.kg^{-1}$) ; le DAS est la grandeur dosimétrique couramment adoptée pour les fréquences supérieures à 100 kHz.
- ▷ **Densité de courant.** Vecteur dont l'intégrale sur une surface donnée est égale au courant passant à travers cette surface ; dans un conducteur linéaire, la densité de courant moyenne est égale au courant divisé par la section transversale de ce conducteur. La densité de courant s'exprime en ampères par mètre carré ($A.m^{-2}$).
- ▷ **Densité de flux magnétique (B).** Grandeur vectorielle de champ B qui produit une force agissant sur une ou plusieurs charges en mouvement ; elle s'exprime en teslas (T).
- ▷ **Densité de puissance.** En matière de propagation des ondes radioélectriques, puissance traversant une unité de surface perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde ; elle s'exprime en watts par mètre carré ($W.m^{-2}$).
- ▷ **Dosimétrie.** Mesurage ou calcul de l'intensité du champ électrique interne, de la densité de courant induit, de l'absorption spécifique ou de la distribution des débits d'absorption spécifique chez l'être humain ou l'animal exposé à des champs électromagnétiques.
- ▷ **ELF (Extremely Low Frequency).** Extrêmement basse fréquence ; fréquence inférieure à 300 Hz.
- ▷ **Effet non thermique.** Tout effet autre que thermique de l'énergie électromagnétique sur le corps.
- ▷ **Énergie électromagnétique.** Énergie accumulée dans un champ électromagnétique ; elle s'exprime en joules (J).
- ▷ **Exposition professionnelle.** Toute exposition à des champs électromagnétiques au cours du travail.
- ▷ **Exposition de la population générale.** Toute exposition à des champs électromagnétiques d'individus appartenant au grand public, à l'exclusion de l'exposition professionnelle et de l'exposition au cours d'un acte médical.
- ▷ **Fréquence.** Nombre de cycles sinusoidaux accomplis par une onde électromagnétique en une seconde ; elle s'exprime habituellement en hertz (Hz).
- ▷ **Impédance d'onde.** En notation complexe, rapport de la composante transversale du vecteur champ électrique à celle du vecteur champ magnétique en un même point ; il s'exprime en ohms (Ω).
- ▷ **Intensité de champ électrique.** Force E s'exerçant sur une unité de charge positive stationnaire en un point d'un champ électrique ; elle s'exprime en volts par mètre ($V.m^{-1}$).
- ▷ **Intensité de champ magnétique.** Grandeur vectorielle axiale H qui, avec la densité de flux magnétique, définit un champ magnétique en un point quelconque de l'espace ; elle s'exprime en ampères par mètre ($A.m^{-1}$).
- ▷ **Longueur d'onde.** Distance, dans la direction de propagation d'une onde périodique, entre deux points successifs où la phase est la même.
- ▷ **Micro-ondes.** Rayonnement électromagnétique de longueur d'onde assez courte, pour la transmission et la réception duquel on peut utiliser les guides d'onde et les cavités associées. Note: Ce terme est pris dans l'acception suivante : rayonnements ou champs dont le domaine de fréquences est compris entre 300 MHz et 300 GHz.

ANNEXE I (suite)

GLOSSAIRE - GLOSSARY

▷ **Onde continue.** Onde dont les oscillations successives sont identiques en régime stable.

▷ **Onde plane.** Onde électromagnétique telle que les vecteurs champ électrique et champ magnétique se trouvent dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, et que l'intensité de champ magnétique multipliée par l'impédance de l'espace traversé est égale à l'intensité de champ électrique.

▷ **Perméabilité magnétique.** Grandeur scalaire ou vectorielle qui, multipliée par l'intensité de champ magnétique, donne la densité de flux magnétique ; elle s'exprime en henrys par mètre ($H \cdot m^{-1}$). Note : En milieu isotrope, la perméabilité magnétique est un scalaire ; en milieu anisotrope, c'est un tenseur.

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

▷ **Profondeur de pénétration.** Pour un champ électromagnétique en ondes planes, incident à la limite d'un bon conducteur, la profondeur de pénétration de l'onde est la profondeur à laquelle l'intensité de champ de l'onde se trouve réduite à $1/e$, soit approximativement à 37 % de sa valeur d'origine.

▷ **Radiofréquence (RF).** Toute fréquence à laquelle le rayonnement électromagnétique peut être utilisé en télécommunication. Note : Pour les besoins du présent guide, il s'agit du domaine de fréquences compris entre 300 Hz et 300 GHz.

▷ **Rayonnement non ionisant (RNI).** Tous les rayonnements et champs du spectre électromagnétique qui n'ont normalement pas assez d'énergie pour provoquer l'ionisation de la matière ; ce rayonnement se caractérise par une énergie par photon inférieure à 12 eV environ, des longueurs d'onde supérieures à 100 nm et des fréquences inférieures à 3×10^{15} Hz.

▷ **Résonance.** Variation d'amplitude se produisant lorsque la fréquence de l'onde tend vers ou coïncide avec une fréquence naturelle du milieu ; l'absorption des ondes électromagnétiques par le corps entier atteint sa plus forte valeur, c'est-à-dire la résonance, pour des fréquences (en MHz) correspondant approximativement à $114/L$, L étant la taille de la personne en mètres.

▷ **Valeur efficace (valeur rms).** Certains effets électriques sont proportionnels à la racine carrée de la moyenne des carrés d'une fonction périodique (sur une période). Cette valeur est appelée valeur efficace, ou moyenne quadratique (rms), puisqu'elle est obtenue d'abord par mise au carré de la fonction, puis détermination de la moyenne des carrés obtenus, et enfin extraction de la racine carrée de cette moyenne.

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SÉCURITÉ - 30, rue Olivier-Noyer, 75680 Paris cedex 14

Tiré à part des Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail, 1^{er} trimestre 2001, n° 182 - ND 2143 - 2 400 ex.
N° CPPAP 804/AD/PC/DC du 14-03-85. Directeur de la publication : J.L. MARIÉ. ISSN 0007-9952 - ISBN 2-7389-0879-9