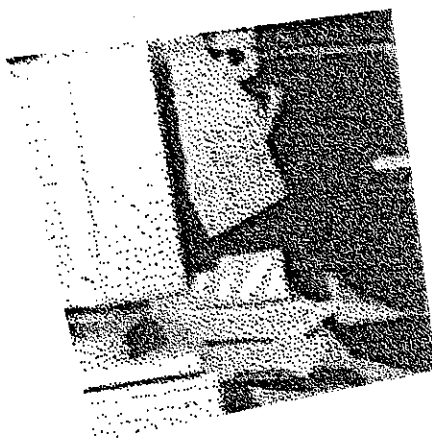


**Bilan des normes
et recommandations d'exposition
aux champs électromagnétiques
(0 à 300 GHz)
et au rayonnement ultraviolet**

Patrick Levallois
Denis Gauvin
Pierre Lajoie
Josée Saint-Laurent

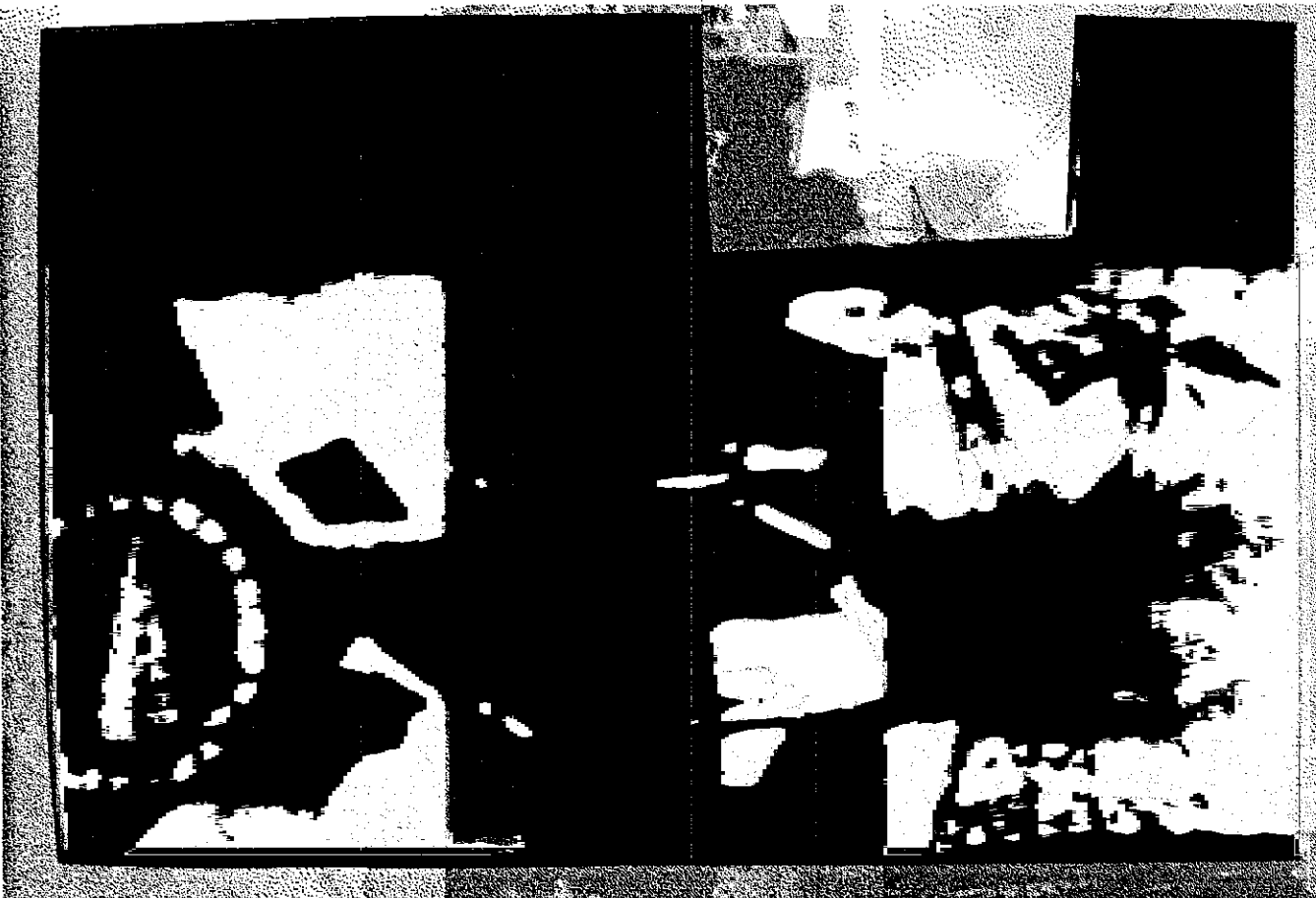


**BILANS DE
CONNAISSANCES**

Juillet 1996

B-047

RAPPORT



IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

**Bilan des normes
et recommandations d'exposition
aux champs électromagnétiques
(0 à 300 GHz)
et au rayonnement ultraviolet**

**Patrick Levallois, Denis Gauvin
Pierre Lajoie et Josée Saint-Laurent
Centre de santé publique de Québec,
Centre hospitalier universitaire de Québec**

**avec la collaboration de
Marc Rhainds**

**BILAN DE
COMMISSAIRES**

RAPPORT

AVIS AUX LECTEURS

Ce rapport se veut être un outil pour l'interprétation des mesures d'exposition. Il ne peut cependant remplacer les documents originaux fournis par les organismes qui réglementent l'exposition aux champs électromagnétiques. Ainsi, bien que les auteurs aient accordé le plus d'attention possible à la transcription des normes et recommandations d'exposition existantes, l'utilisateur de ce guide devra toujours se référer aux documents originaux lorsqu'il aura à formuler un avis officiel.

Table des matières

	page
INTRODUCTION	V
CHAPITRE 1: Le champ magnétique statique	1.1
CHAPITRE 2: Les champs électrique et magnétique à fréquences extrêmement basses (de 30 à 300 Hz)	2.1
CHAPITRE 3: Les champs électrique et magnétique à fréquences vocales basses et très basses (de 300 Hz à 100 kHz)	3.1
CHAPITRE 4: Les radiofréquences et micro-ondes (de 100 kHz à 300 GHz)	4.1
CHAPITRE 5: Les rayonnements ultraviolets	5.1
CONCLUSION	5.13
ANNEXES	5.17
ABRÉVIATIONS	5.19
LEXIQUE	5.21

INTRODUCTION

Le domaine des champs électromagnétiques est relativement vaste. La définition du terme «champ électromagnétique» varie selon les auteurs. Certains considèrent le terme comme général, pouvant s'appliquer à tout le spectre électromagnétique. D'autres vont plutôt limiter ce terme aux fréquences extrêmement basses. Pour notre part, nous utilisons ce terme comme synonyme de «radiations non ionisantes». Conformément au mandat qui nous avait été donné par l'Institut de recherche en santé et en sécurité au travail (IRSSST), nous nous sommes concentrés sur la bande de fréquences de 0 à 300 GHz à laquelle s'est ajouté le domaine du rayonnement ultraviolet.

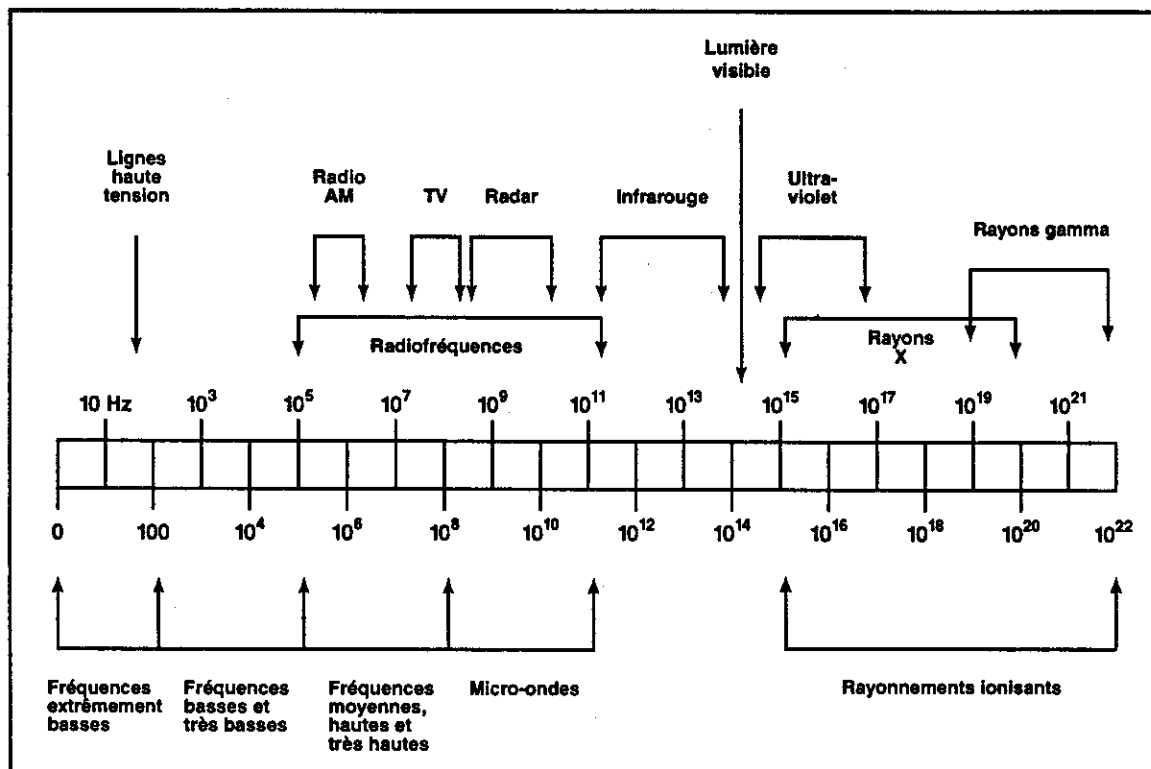
Bien que les champs générés par les ondes électromagnétiques sont tous de même nature physique, les mécanismes d'action par lesquels ces champs produisent des effets chez l'humain peuvent être très différents. Ceci est dû en partie à l'énergie véhiculée par l'onde dont l'intensité augmente de façon importante au fur et à mesure que la longueur d'onde diminue.

De plus, dans le cas de champs proches (*near fields*), ce qui est particulièrement le cas dans les fréquences extrêmement basses, les composantes électrique et magnétique des champs doivent être considérées séparément, ce qui ne s'applique pas aux champs éloignés (*far fields*).

Compte tenu du temps et des ressources limitées pour réaliser notre mandat, nous nous en sommes tenus à une revue des normes ou recommandations générales existantes pour chaque bande de fréquences particulière: champ magnétique statique, fréquences extrêmement basses (de 30 à 300 Hz), fréquences vocales très basses et basses (de 300 Hz à 100 kHz), radiofréquences et micro-ondes (de 100 kHz à 300 GHz) et rayonnement ultraviolet (de 750 à 3 000 THz) (voir figure 1). Nous ne présentons donc pas, sauf exception, les recommandations proposées en regard d'appareils spécifiques.

Nos efforts se sont concentrés sur le fondement et les limites des recommandations proposées pour les expositions directes (sans contact avec des objets exposés). Nous avons essayé de faire ressortir la base des recommandations d'exposition proposées en mettant l'accent sur les incertitudes persistantes qui justifient une certaine prudence dans l'interprétation des mesures d'exposition.

Malgré les contraintes soumises pour réaliser ce travail, nous pensons que ce document sera une aide précieuse à l'hygiéniste et au médecin en santé au travail lorsqu'ils auront à évaluer les risques associés à une exposition aux champs électromagnétiques.

Figure 1: *Le spectre de fréquences électromagnétiques*

Chapitre 1

Le champ magnétique statique

1. LE CHAMP MAGNÉTIQUE STATIQUE

1.1 Description des paramètres

Le champ magnétique peut se définir comme étant une région de l'espace où s'exerce une force capable de modifier la trajectoire de particules chargées. Ce champ est créé sous forme de boucles concentriques autour du conducteur électrique. Le courant magnétique statique est produit par un courant continu, c'est-à-dire un courant circulant continuellement dans la même direction et avec la même intensité (Laliberté, 1995).

L'intensité du champ magnétique se mesure en ampère par mètre (A/m), mais généralement elle est exprimée en densité de flux magnétique et se mesure alors en tesla (T) ou en gauss (G) (1 T équivaut à 10 000 G) (1 A/m équivaut à une densité de flux magnétique de $4\pi \cdot 10^{-7}$ T dans un environnement non magnétique).

Divers équipements ou appareils peuvent émettre des champs magnétiques statiques. Parmi ceux-ci, citons les détecteurs de vol, les systèmes de sécurité d'aéroport, les lignes de transport d'électricité en courant continu, les systèmes de transport par lévitation magnétique, les procédés électrolytiques, les accélérateurs de particules à haute énergie et les réacteurs thermonucléaires. En milieu médical, l'exposition au champ magnétique statique résulte principalement de l'utilisation d'appareils à résonance magnétique (ACGIH, 1992; ICNIRP, 1994).

Le principal mécanisme d'interaction physique établi par lequel les champs magnétiques statiques peuvent interagir avec la matière vivante et sur lequel se basent les recommandations d'exposition est l'interaction électrodynamique avec les fluides conducteurs en mouvement, c'est-à-dire principalement la circulation sanguine. La densité de courant induit produit par le mouvement d'une personne située dans un champ statique peut également servir d'élément de base à l'établissement de limites d'exposition (WHO, 1987; Santé Canada, 1987; Tenforde, 1992).

1.2 Description des normes et recommandations actuelles

Il existe très peu de recommandations et encore moins de normes relativement à l'exposition au champ magnétique statique. Certains organismes reconnus, dont la Commission internationale de protection contre les radiations non ionisantes (ICNIRP), l'Organisation mondiale de la santé (OMS), et l'*American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH), ont établi des recommandations à ce sujet. Des recommandations d'exposition sont également issues d'autres organismes scientifiques. Certaines ont trait spécifiquement à l'utilisation d'appareils diagnostiques à résonance magnétique.

1.2.1 Recommandations internationales

1.2.1.1 Commission internationale de protection contre les radiations non ionisantes (ICNIRP)

En mai 1992, la Commission internationale de protection contre les radiations non ionisantes (ICNIRP), commission indépendante créée par l'Association internationale de radioprotection (IRPA), a approuvé des recommandations pour l'exposition au champ magnétique statique en milieu de travail et pour la population en général (ICNIRP, 1994). Ces recommandations sont présentées au tableau 1.

Comme la majorité des stimulateurs cardiaques ne semblent pas être affectés par un champ inférieur à 0,5 mT, l'ICNIRP recommande aux porteurs de stimulateurs d'éviter les lieux dont la densité de flux magnétique est supérieure à cette limite. Les porteurs d'implants ferromagnétiques ou d'appareils médicaux activés électriquement (comme des prothèses auditives ou des prothèses de membres) peuvent également être affectés par des champs au-dessus de quelques mT. Enfin, l'ICNIRP précise que des précautions devraient être prises afin de prévenir les risques de déplacement d'objets métalliques (*flying metallic objects*) lorsque le champ magnétique est supérieur à 3 mT.

Tableau 1: Limites d'exposition au champ magnétique statique recommandées par l'ICNIRP⁽¹⁾

CARACTÉRISTIQUES DE L'EXPOSITION	DENSITÉ DE FLUX MAGNÉTIQUE (T)
MILIEU DE TRAVAIL	
- journée de travail (VLE-MPT)	0,2
- valeur plafond (VLE-P)	2
- exposition des membres	5
GRAND PUBLIC	
- exposition continue ⁽²⁾	0,04

(1) Ces limites ne s'appliquent pas aux personnes portant un stimulateur cardiaque ou autres appareils implantés activés électriquement ou aux personnes portant des implants ferromagnétiques.

(2) Des expositions occasionnelles supérieures à 0,04 T peuvent être permises sous contrôle approprié en s'assurant que les limites des recommandations en milieu de travail ne sont pas excédées.

VLE-MPT: Valeur limite d'exposition moyenne pondérée par le temps (*threshold limit value-time weighed average*)

VLE-P: Valeur limite d'exposition plafond

SOURCE: ICNIRP, 1994

Ces recommandations se basent sur les résultats des études effectuées chez l'animal et l'humain qui ne suggèrent pas d'effet néfaste sur la santé à la suite d'une exposition transitoire à un champ magnétique statique inférieur à 2 T. Un effet magnétohydrodynamique, entraînant un ralentissement du flot sanguin et une augmentation de la pression artérielle, peut se produire lors d'une exposition sur tout le corps à 5 T. Une telle exposition est acceptable uniquement pour les extrémités. De plus, l'ICNIRP indique qu'en fonction des mécanismes d'interaction connus (courant induit et effet hémodynamique), une exposition à long terme à une densité de champ magnétique de 200 mT ne devrait pas avoir de conséquences néfastes sur la santé. En effet, le mouvement d'une personne dans un champ de 200 mT produira une densité de courant induite de 10 à 100 mA/m². Elle est compatible avec la limite fondamentale de l'IRPA/INIRC pour l'exposition à des champs magnétiques de 50-60 Hz compte tenu de la variation prévisible de ces effets pour les fréquences < 10 Hz. Cette valeur apparaît conservatrice pour l'ICNIRP et résulte du peu de connaissances

actuellement disponibles sur les effets liés à une exposition chronique. Un facteur de sécurité additionnel de 5 a été fixé pour l'exposition de la population générale établissant ainsi la recommandation à 40 mT pour le public.

1.2.1.2 Organisation mondiale de la santé (OMS)

L'Organisation mondiale de la santé n'a pas établi de recommandations relatives à l'exposition au champ magnétique statique. On peut lire dans le *Environmental Health Criteria 69* (WHO, 1987) la conclusion suivante:

On peut conclure que les connaissances disponibles indiquent l'absence d'effet néfaste sur la santé humaine due à une exposition au champ magnétique statique jusqu'à 2 T. Il n'est pas possible de prendre une position définitive relative à la sécurité ou au risque associé à une exposition supérieure à 2 T. Selon des considérations théoriques et quelques données expérimentales,

on peut déduire qu'une exposition à court terme d'un champ magnétique statique supérieur à 5 T peut produire des effets significatifs sur la santé.
(Traduction libre, WHO, 1987, p.20)

1.2.2 Recommandations au Canada

Actuellement, il n'existe au Canada aucune norme ou recommandation relative à l'exposition au champ magnétique statique. En 1987, la Direction de l'hygiène du milieu, de Santé Canada, a toutefois publié des lignes directrices sur l'exposition au champ magnétique provenant d'appareils à résonance magnétique pour les patients et les opérateurs de tels appareils (Santé Canada, 1987). Celles-ci se présentent comme suit :

- pour les opérateurs, l'exposition maximale recommandée durant la journée de travail est établie à 10 mT;
- pour les patients, l'exposition ne doit pas excéder 2 T.

Ces recommandations sont parmi les plus restrictives pour les appareils à résonance magnétique. Santé Canada précise qu'une exposition des opérateurs à des intensités supérieures à celles susmentionnées est permise pour de courtes périodes (environ 10 minutes par heure); toutefois leur nombre et leur durée devraient être réduits le plus possible. Il est également préconisé des mesures correctives lors de situations particulières telles que le port de stimulateur cardiaque ou de pinces métalliques et autres implants métalliques. Aucune recommandation spécifique n'est toutefois présentée à cet effet.

Santé Canada précise, que selon certaines études, il ne semble pas y avoir d'effets négatifs pour le personnel exposé pendant quelques heures à des champs allant jusqu'à 2 T. De plus, aucun effet nuisible à la santé n'aurait été observé pour des expositions sur de longues périodes pour des champs allant jusqu'à 0,5 T. Enfin, ce ministère souligne que les recommandations s'adressant au personnel des laboratoires de physique nucléaire

dans plusieurs pays peuvent servir de niveau de référence pour les opérateurs d'appareils à résonance magnétique.

1.2.3 Recommandations aux États-Unis

Quatre organisations ont établi des recommandations en regard de l'exposition au champ magnétique statique en milieu de travail aux États-Unis. La première est présentée par l'*American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)*, une autre par le département de l'Énergie (US Department of Energy, DOE) et deux sont issues de laboratoires de physique de haute énergie en Californie (Stuchly 1986; Tenforde, 1990; WHO, 1987; ACGIH, 1994). La recommandation de l'ACGIH sera traitée séparément.

1.2.3.1 American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)

Les recommandations présentées par l'*American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)* pour l'année 1994-1995 sont présentées au tableau 2.

Selon l'ACGIH, ces recommandations, basées sur de nombreuses données biologiques existantes, contiennent une marge de sécurité suffisante pour s'assurer qu'aucun effet néfaste sur la santé puisse survenir chez les travailleurs par suite d'une exposition chronique au champ magnétique statique. L'ACGIH mentionne toutefois que des recherches supplémentaires ayant trait à la caractérisation du mécanisme d'action de ce type de champ en relation avec les systèmes vivants sont nécessaires.

Les limites d'exposition recommandées sont en fait les mêmes que celles du Lawrence Livermore National Laboratory qui seront présentées ultérieurement (1.2.3.2). Ces limites sont basées sur la possibilité de produire un potentiel de 1 mV dans l'aorte d'un humain exposé à 60 mT, ce qui est considéré comme négligeable.

Tableau 2: Limites d'exposition au champ magnétique statique recommandées par l'ACGIH

CARACTÉRISTIQUES DE L'EXPOSITION	CHAMP MAGNÉTIQUE
MILIEU DE TRAVAIL	
- Exposition habituelle (<i>routine exposure</i>)	60 mT
- Exposition aux extrémités	600 mT
- Valeur plafond	2 T

Les porteurs de stimulateurs cardiaques et d'autres appareils médicaux similaires ne devraient pas être exposés à un champ magnétique statique excédant 0,5 mT.

SOURCE: ACGIH, 1994

Tableau 3: Autres limites d'exposition au champ magnétique statique en milieu de travail recommandées aux États-Unis

PÉRIODE DE TRAVAIL	RÉGION DU CORPS	CHAMP MAGNÉTIQUE RECOMMANDÉ (selon l'organisme de référence)		
		Stanford Linear Accelerator Center	Lawrence Livermore National Laboratory	DOE
Journée de travail	• Corps entier	20 mT	60 mT ⁽¹⁾⁽²⁾	10 mT
	• Bras, mains ou extrémités	200 mT	600 mT ⁽²⁾	100 mT
Courte période	• Corps entier	200 mT	2 T	100 mT ⁽³⁾ 500 mT ⁽⁴⁾
	• Bras, mains ou extrémités	2 T		1 T ⁽³⁾ 2 T ⁽⁴⁾

(1) Exposition du tronc.

(2) La moyenne pondérée en fonction du temps est calculée sur une période de 8 heures par jour au lieu de 40 heures par semaine lorsque l'intensité maximale du champ magnétique est supérieure à 500 mT.

(3) Exposition durant 1 heure ou moins.

(4) 10 minutes ou moins.

ADAPTÉ DE: WHO, 1987

1.2.3.2 Autres recommandations aux États-Unis

Les recommandations proposées par les autres organismes sont présentées au tableau 3.

Les recommandations proposées par le *Lawrence Livermore National Laboratory* sont plus sévères que celles proposées par l'ICNIRP. La limite de 60 mT est justifiée par le potentiel électrique généré de 1 mV au niveau de l'aorte, niveau considéré comme sécuritaire pour le système cardiaque et les paramètres hémodynamiques. Le champ magnétique maximal de 2 T est proposé en fonction des résultats des études de laboratoire réalisées chez l'animal (Tenforde, 1990). Peu de données ayant trait aux effets chez l'humain sont disponibles. La recommandation d'exposition la plus stricte se rapportant à une période de travail de 8 heures est celle proposée par le DOE qui se situe à 10 mT afin de limiter le courant induit au niveau du système cardiovasculaire.

1.2.4 Recommandations en Europe

1.2.4.1 National Radiological Protection Board (NRPB)

Le *National Radiological Protection Board* (NRPB) au Royaume-Uni a produit un rapport présentant des limites d'exposition aux champs électrique et magnétique pour les travailleurs et le public (NRPB, 1991). Cet organisme indique qu'en regard des évidences présentes, il est raisonnable de fixer des limites d'exposition aiguë pour l'humain au champ magnétique statique en se basant sur les études chez l'animal et chez l'humain. Ainsi, le NRPB indique que les évidences suggèrent qu'une exposition en milieu de travail inférieure à 2 T permettrait d'éviter les effets aigus tels que les vertiges et les nausées. De tels effets ont été observés chez des travailleurs exposés à un champ de 4 T. Toutefois, en regard du manque d'information relativement aux effets possibles à long terme, il est recommandé de restreindre l'exposition des travailleurs, afin que leur moyenne d'exposition pour une journée n'excède

pas 200 mT. Ce critère a été reconduit en 1993 (NRPB 1993) en précisant de plus une limite d'exposition générale maximale de 2 T et une limite d'exposition des membres de 5 T. Les porteurs de stimulateurs cardiaques et de prothèses, sensibles à des champs magnétiques statiques, devraient être restreints à des champs inférieurs, soit moins de 0,5 mT. De plus, il est précisé que dans un champ magnétique statique supérieur à 3 mT, des précautions devraient être prises afin d'éviter les risques dus aux mouvements d'objets ferromagnétiques.

1.2.4.2 Comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC)

Le Comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC) a soumis en novembre 1994 un projet de prénorme d'exposition humaine aux champs électromagnétiques (EMF-HSD, 1995). Tel qu'il est spécifié par cet organisme, ces limites visent à prévenir les effets aigus chez l'humain par suite d'une exposition aux champs statiques et aux champs électrique et magnétique dans la bande de fréquences de 0 à 10 Hz (CENELEC, 1994). Les recommandations pour les champs magnétiques se situant dans la bande de fréquences de 0 à 0,1 Hz sont les mêmes que celles préconisées par l'ICNIRP: 2 T pour l'exposition des travailleurs, 0,2 T pour une moyenne d'exposition répartie sur 24 heures et 5 T pour l'exposition des membres. Pour le public en général, la limite proposée est de 0,04 T. Les bases fondamentales sur lesquelles est fondée la limite de 2 T sont les possibilités de vertiges, nausées et d'effets sur la santé liés à l'arythmie cardiaque, l'altération des fonctions mentales et l'induction d'un champ électrique à travers les principaux vaisseaux sanguins. Le critère de 5 T pour l'exposition des membres est permis du fait de l'absence d'organe critique ou d'importants vaisseaux sanguins dans ces parties du corps.

Le CENELEC spécifie que les stimulateurs cardiaques et autres équipements actifs implantés peuvent être affectés par des niveaux de champs inférieurs à ceux proposés. Cet organisme prépare des recommandations spécifiques pour ces types d'appareils.

1.2.5 Recommandations ailleurs dans le monde

L'*Australian National Health and Medical Research Council* a proposé des recommandations relatives aux expositions au champ magnétique statique en milieu de travail associées à l'utilisation d'un appareil à résonance magnétique (Repacholi, 1992). Le niveau recommandé pour la période de travail est de 200 mT. Des limites de 2 T pour le corps entier sont recommandées pour une exposition de courte durée au champ émis par un appareil à résonance magnétique et de 5 T, pour l'exposition aux extrémités.

1.3 Bases des recommandations

L'établissement des recommandations d'exposition au champ magnétique statique s'appuie principalement sur des résultats d'études expérimentales réalisées chez l'animal. L'ensemble des études effectuées tendent à démontrer l'absence d'effet significatif pour une exposition inférieure à 2 T sur les systèmes biologiques suivants : la croissance cellulaire ; la reproduction ; le développement pré et postnatal ; les activités bioélectriques des neurones ; le comportement ; les fonctions cardiovasculaires ; le système sanguin ; les fonctions du système immunitaire ; la régulation physiologique et le rythme circadien (WHO, 1987 ; Santé Canada, 1987 ; Tenforde, 1992 ; ICNIRP, 1994).

Bien que peu nombreuses, certaines études expérimentales réalisées chez des volontaires peuvent fournir de l'information utile à l'établissement de limites d'exposition. Ainsi, on a démontré que chez l'humain situé dans un champ de 4 T, le mouvement rapide des yeux et de la tête pouvait produire des vertiges, des nausées, des magnétosphènes ainsi qu'une sensation de goût métallique. De plus, l'exposition chronique au champ magnétique de 0,15 mT n'a démontré aucun effet sur le rythme circadien (NRPB, 1991).

Très peu de données épidémiologiques sont disponibles relativement à l'exposition des travailleurs exposés au champ magnétique statique. Deux études chez les travailleurs, réalisées auprès d'une industrie de cellules électrolytiques (Marsh,

1982) et auprès d'un autre groupe de travailleurs exposés également au champ magnétique statique (Budinger, 1984), ne démontrent pas d'effet néfaste sur la santé humaine pour des expositions au champ magnétique statique inférieures à 2 T. Cependant des études, menées chez les travailleurs de l'industrie de l'aluminium exposés à de forts champs magnétiques statiques, ont rapporté une augmentation des taux de mortalité causée par la leucémie. Toutefois, il est possible qu'un agent carcinogène, autre que le champ magnétique statique, puisse être à l'origine de ces observations (Rockette, 1993 ; Mur, 1987). Les limites d'exposition de courte durée (2 T) sont donc basées sur les données disponibles en regard des effets aigus et chroniques chez l'animal et l'humain. Le choix d'une limite de 200 mT pour l'exposition moyenne d'une journée de travail semble basé sur l'utilisation d'un facteur de sécurité de 10.

En fait, le principal mécanisme biologique sur lequel se fonde l'établissement de recommandations d'exposition au champ magnétique statique plus strictes est la création d'un courant électrique induit dû au mouvement des charges ioniques du corps humain, telles que celles retrouvées au niveau des vaisseaux sanguins par la circulation sanguine (WHO, 1987).

Ainsi, la base fondamentale des recommandations du *Lawrence Livermore National Laboratory* en Californie s'appuie sur ce principe. On calcule, pour un champ de 60 mT, qu'il y aura induction d'un potentiel électrique maximum de 1 mV au niveau de l'aorte (Miller, 1987), lequel ne devrait pas produire d'effets néfastes sur la performance cardiaque ou sur les paramètres hémodynamiques (Tenforde, 1990). Compte tenu d'études effectuées chez les singes, il est rapporté qu'une exposition aiguë à un champ de 1,5 T pourrait entraîner des modifications électrocardiographiques significatives (altérations de l'onde T), mais pas d'élévation de la pression artérielle. Cependant, une exposition à un champ de 5 T pourrait entraîner une réduction du flux aortique de 7 % chez l'humain (WHO, 1987 ; Tenforde, 1990). Comme on ne retrouve pas de larges vaisseaux sanguins aux extrémités des membres, des limites supérieures d'exposition sont permises jusqu'à 5 T.

L'ICNIRP s'appuie également sur le principe de l'induction du courant créé par le mouvement d'une personne placée dans un champ. La densité de courant induit par un champ de 200 mT (entre 10 et 100 mA/m²) ne produirait pas d'effet néfaste au fonctionnement du système nerveux (ICNIRP, 1994). Cette affirmation est basée sur l'équivalence de ce niveau avec le 10 mA/m² considéré comme acceptable pour les champs de fréquences extrêmement basses.

Selon des informations non publiées, citées par Tenforde (WHO, 1987), la limite d'exposition proposée par le département d'énergie des États-Unis représente le seuil à partir duquel des magnétophosphènes peuvent se produire lors d'exposition aux champs alternatifs de fréquences extrêmement basses. Également, cette limite de champ statique correspondrait au seuil du potentiel électrique induit mesurable dans le système circulatoire central.

Enfin, bien que les recommandations proposées par le Stanford Linear Accelerator Center soient celles les plus utilisées aux États-Unis (Tenforde, 1990), les données présentant la base de ces critères ne sont pas facilement accessibles et n'ont pu être obtenues pour la rédaction de ce rapport.

1.4 Limites des recommandations

1.4.1 Limites liées à l'exposition prise en compte

Les limites proposées réfèrent à l'exposition isolée à un champ magnétique continu. Cependant, il est rare de ne pas être exposé de façon concomitante à un champ alternatif. Compte tenu qu'il est possible que ces deux types de champs interagissent ensemble (voir chapitre 2), il s'agit d'une limite devant être prise en considération.

Par ailleurs, la plupart des recommandations d'exposition sont basées sur le risque de troubles du système nerveux central et de la circulation

sanguine dans les gros vaisseaux causés par les courants induits dans l'organisme humain (WHO, 1987). Il est cependant probable qu'il existe d'autres mécanismes d'action importants. Ceci pourrait justifier de considérer d'autres paramètres d'exposition.

1.4.2 Limites quant aux données disponibles sur l'évaluation des effets résultant d'une exposition aiguë

La plupart des études effectuées sur le champ statique portent sur les animaux dont les primates. Cependant, peu d'études ont été réalisées chez l'humain. Ainsi, il n'existe pas de données d'études ayant évalué l'effet d'une exposition intense de longue durée chez des travailleurs (WHO, 1987). De plus, la limite de 2 T apparaît comme niveau seuil pour les effets irréversibles (WHO, 1987). Par contre, certains effets réversibles ont été observés lors d'expositions en laboratoire plus faibles de l'ordre de 0,1 T (WHO, 1987).

Bien que la plupart des résumés des textes officiels consultés font état d'un niveau sans effet nocif sur la santé (*NOAEL*) de 2 T, on peut noter que beaucoup d'expérimentations ont été menées avec des champs maximaux de 1,5 T (Tenforde, 1990). Par exemple, l'absence d'effets sur la tension artérielle des singes n'a été vérifiée que jusqu'à une exposition de 1,5 T (Tenforde, 1990).

1.4.3 Limites quant aux données disponibles en regard des effets d'une exposition chronique

Les données disponibles quand aux effets possibles d'une exposition chronique au champ magnétique sont très limitées. Par exemple, il n'existe pas, à notre connaissance, d'études de cancérogenèse effectuées chez l'animal en regard de ce type d'exposition. Par ailleurs, les données provenant des études épidémiologiques, bien que plutôt rassurantes, sont peu nombreuses.

1.4.4 Limites quant aux mécanismes d'action pris en considération par les organismes proposant des recommandations d'exposition

Le principal mécanisme pris en considération par les organismes proposant des recommandations d'exposition est l'effet résultant du courant induit sur les systèmes nerveux et cardiovasculaire. Cependant, d'autres mécanismes d'interaction avec l'humain ont été mis en évidence. En particulier, l'effet de magnéto orientation, qui entraîne une orientation des molécules, agissant ainsi sur les cellules de la rétine et sur les hématies falciformes, est bien démontré. L'absence d'effet détectable chez le singe par électrorétinogramme jusqu'à une exposition de 1,5 T est considérée comme rassurante (WHO, 1987). Cependant, les données sur les effets visuels résultant d'une exposition chez l'humain sont plutôt limitées, et l'effet possible chez les porteurs d'anémie falciforme mérite d'être pris en considération (ICNIRP, 1994).

Un autre effet magnétomécanique bien documenté chez l'animal est l'effet de transfert (*translation effect*) qui peut entraîner le mouvement de certaines cellules contenant des particules de magnétite. Cet effet expliquerait la capacité de plusieurs animaux (oiseaux, poissons) à se diriger en suivant un champ géomagnétique dont l'intensité varie de 30 à 70 μ T (Tenforde, 90; ICNIRP, 94). Bien que les particules de magnétite semblent exister chez l'humain, on n'a pas démontré qu'il existait des cellules capables de réagir à de si faibles niveaux de champs magnétiques statiques. D'autres recherches seront nécessaires pour préciser ces effets.

1.4.5 Limites liées aux facteurs de sécurité pris en compte lors de l'établissement des recommandations d'exposition

La marge de sécurité pour les valeurs plafonds recommandées par l'ACGIH et l'ICNIRP semble conforme aux pratiques dans le domaine de la radioprotection. Cependant, il est difficile d'évaluer la valeur des facteurs de sécurité proposés compte tenu des limites applicables aux données

disponibles sur les effets potentiels d'une exposition chronique. À noter que le niveau recommandé par l'ACGIH pour la journée de travail est parmi les plus bas (60 mT).

1.5 Résumé

À l'échelle mondiale, certaines recommandations ont été établies relativement à l'exposition au champ magnétique statique en milieu de travail. Les données actuellement disponibles n'indiquent aucun effet significatif sur les principaux systèmes biologiques pour une exposition aiguë au champ magnétique statique inférieur à 1,5-2 T. Les recommandations à court terme (niveau plafond) pour chacun des organismes recensés ne dépassent d'ailleurs pas 2 T pour l'exposition du corps entier. L'exposition des membres ou des extrémités sur de courtes périodes est tolérée jusqu'à un niveau de 5 T, compte tenu que les effets hémodynamiques possibles à ces niveaux ne peuvent se produire aux extrémités. Des limites inférieures sont présentées pour la journée de travail étant donné le manque de connaissance quant aux effets d'une exposition chronique. Ces principales recommandations pour la période de travail sont résumées au tableau 4.

Les recommandations d'exposition au champ magnétique statique proposées par les principaux organismes varient entre 10 à 200 mT pour la période de travail. L'ICNIRP, l'ACGIH et le NRPB proposent une limite d'exposition à 0,5 mT pour les porteurs de stimulateurs cardiaques ou autres appareils activés électriquement. Le *Lawrence Livermore National Laboratory* a établi cette limite à 1 mT. Selon les connaissances scientifiques actuelles, ces limites établies semblent plutôt sécuritaires. Toutefois, certaines incertitudes demeurent quant aux effets possibles des champs magnétiques statiques par suite d'une exposition chronique. Ces incertitudes justifient une réévaluation des recommandations existantes au fur et à mesure que les connaissances sur les effets possibles de ces champs évoluent.

Tableau 4: Résumé des recommandations d'exposition au champ magnétique statique en milieu de travail

ORGANISME	CHAMP MAGNÉTIQUE (T)	
	Journée de travail	Courtes périodes ou valeurs plafonds
ICNIRP*	0,2	2 ⁽²⁾
ACGIH*	0,06	2 ⁽²⁾
DOE*	0,01	0,5 ⁽¹⁾
Lawrence Livermore National Laboratory*	0,06	2 ⁽¹⁾
Stanford Linear Accelerator Center*	0,02	0,2 ⁽²⁾
NRPB	0,2	2 ⁽²⁾

* Des niveaux plus élevés pour les mains, les bras ou les extrémités sont également proposées par ces organismes.

(1) Courtes périodes.

(2) Valeurs plafonds.

SOURCE: WHO, 1987; ACGIH, 1994; ICNIRP, 1994

RÉFÉRENCES

ACGIH. Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices. Cincinnati OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1992, pp. 51-54.

ACGIH. 1994-1995 Threshold Limit Values for Chemical substances and Physical agents and Biological Exposure Indices. Cincinnati OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1994, 119 p.

Budinger T.F., Bristol K.S., Yen C.K., Wong P. Biological Effects of Static Magnetic Fields. 1984 (ICNIRP, 1994).

CENELEC. Comité européen de normalisation électrotechnique. Human Exposure to Electromagnetic Field – Low Frequency (0 Hz to 10 kHz). Projet de prénorme européenne, par ENV 50166-1, septembre 1994.

EMF-HSD. CENELEC publishes its EMF Prestandard. EMF Health & Safety Digest, février 1995, pp. 5-6.

ICNIRP. Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Health Physics, janvier 1994, vol. 66, n° 1, pp. 100-106.

Jacob H. Vocabulaire des matières dangereuses utilisées au travail. Bulletin de terminologie 215. Bureau de la traduction, Direction de la terminologie et des services linguistiques, 1995, 1039 p.

Laliberté L. Champs électrique et magnétique en milieu industriel. Colloque de l'Association de santé et sécurité des pâtes et papiers du Québec inc. et de l'Association de santé et sécurité des industries de la forêt du Québec inc., 6 avril 1995.

Marsh J.L., Armstrong T.J., Jacobson A.P., Smith R.G. Health Effects of Occupational Exposure to Steady Magnetic Fields. American Industrial Hygiene Association Journal, 1982, 43, pp. 474-484 (ICNIRP, 1994).

Miller G. Exposure Guidelines for Magnetic Fields. American Industrial Hygiene Association Journal, 1987, vol. 48, n° 12, pp. 957-968.

Mur J.M., Moulin J.J., Meyer-Bisch C., Massin N., Coulon J.P. and Louergue J. Mortality of Aluminium Reduction Plant Workers in France. International Epidemiological Association, 1987, pp. 257-264.

NRPB. Biological Effects of Exposure to Non-ionising Electromagnetic Fields and Radiation. I. Static Electric and Magnetic Fields. National Radiological Protection Board, NRPB-R238, 1991, 32 p.

NRPB. Board Statement on Restrictions on Human Exposure to Static and Time Varying Electromagnetic Fields and Radiation. National Radiological Protection Board, vol. 4, n° 5, 1993.

Repacholi M.H. Guidelines and Standards. Non-ionizing Radiation Proceedings, 2nd International Non-Ionizing Radiation Workshop. Wayne Greene Ed., International Radiation Protection Association, Vancouver, 10-14 mai 1992, pp. 965-982.

Repacholi M.H. Standards on Static and ELF Electric and Magnetic Fields and their Scientific Basis. Biological Effects and Dosimetry of Static and ELF Electromagnetic Fields. M. Grandolfo, S.M. Michaelson et A. Randiz, Plenum Press Ed., New York, 1985, pp. 667-684.

Rockette H.E. and Arena V.C. Mortality Studies of Aluminum Reduction Plant Workers: Potroom and Carbon Department. Journal of Occupational Medicine, vol. 25(7), 1983, pp. 549-557.

Santé Canada. Code de sécurité - 26. Lignes directrices sur l'exposition aux champs électromagnétiques provenant d'appareils cliniques à résonance magnétique. Santé Canada, Direction de l'hygiène du milieu, Direction générale de la protection de la santé, H46-2/87-127F, 1987, 22 p.

Stuchly M.A. Human Exposure to Static and Time-varying Magnetic Fields. Health Physics, 1986, vol. 5, n° 2, pp. 215-225.

Tenforde T.S. Static Magnetic Fields: a Summary of Biological Interactions, Potential Health Effects, and Exposure Guidelines. Non-ionizing Radiation Proceedings, 2nd International Non-Ionizing Radiation Workshop, Vancouver, 10-14 mai, 1992, pp. 396-413.

Tenforde T.S. Biological Effects of Static Magnetic Fields. Int. J. of Applied Electromagnetics in Materials, 1990, pp. 157-165.

WHO. Environmental Health Criteria 69: Magnetic Fields. World Health Organization, Genève, 1987, 197 p.

Chapitre 2

Les champs électrique et magnétique
à fréquences extrêmement basses
(de 30 à 300 Hz)

Table des matières

	page
2. LES CHAMPS ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE À FRÉQUENCES EXTRÊMEMENT BASSES (DE 30 À 300 HZ)	2.5
2.1 Description des paramètres	2.5
2.2 Description des normes et recommandations actuelles	2.5
2.2.1 Recommandations internationales	2.5
2.2.1.1 Association internationale de radioprotection (IRPA)	2.5
2.2.1.2 Organisation mondiale de la santé (OMS)	2.5
2.2.2 Recommandations au Canada	2.7
2.2.3 Recommandations aux États-Unis	2.7
2.2.3.1 American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)	2.8
2.2.3.2 American Industrial Hygiene Association (AIHA)	2.8
2.2.4 Recommandations en Europe	2.8
2.2.4.1 Comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC)	2.8
2.2.5 Recommandations ailleurs dans le monde	2.8
2.2.5.1 Australie	2.8
2.3 Base des recommandations	2.8
2.4 Limites des recommandations	2.11
2.4.1 Limites liées à l'évaluation de l'exposition	2.11
2.4.2 Incertitudes liées au cheminement du courant induit dans l'organisme humain	2.11
2.4.3 Limites liées à l'évaluation des effets résultant d'une exposition chronique	2.12
2.4.4 Limites liées à l'exposition indirecte (courants de contact)	2.12
2.4.5 Limites liées au mécanisme d'action	2.13
2.4.6 Limites liées aux facteurs de sécurité	2.14
2.5 Résumé	2.14
RÉFÉRENCES	2.16

2. LES CHAMPS ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE À FRÉQUENCES EXTRÊMEMENT BASSES (de 30 à 300 Hz)

2.1 Description des paramètres

Par convention internationale, les champs à fréquences extrêmement basses (FEB) comprennent les champs de fréquences variant de 30 à 300 Hz. À ces fréquences, les longueurs d'onde considérées sont très grandes (> 1 000 km). Ainsi, les paramètres d'exposition d'intérêt sont le champ électrique et le champ magnétique. Par ailleurs, ces champs induisent à l'intérieur du corps humain de faibles densités de courant, et il n'y a actuellement pas d'autres paramètres permettant d'estimer une dose absorbée effective. Les principaux paramètres d'exposition considérés sont donc l'intensité des champs, la densité de courant induit et la durée de l'exposition. La plupart des études sur les effets de ces fréquences concernent la fréquence du réseau électrique (50/60 Hz).

2.2 Description des normes et recommandations actuelles

Il n'existe actuellement que très peu de normes sur l'exposition à des champs à FEB. Des recommandations sont présentées par divers organismes ou associations dont les plus connus sont l'Association internationale de radioprotection (IRPA), l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et la Conférence américaine des hygiénistes industriels gouvernementaux (ACGIH).

2.2.1 Recommandations internationales

2.2.1.1 Association internationale de radioprotection (IRPA)

L'Association internationale de radioprotection (IRPA) et le Comité international de protection contre les rayonnements non ionisants (INIRC),

maintenant devenu la Commission internationale de protection contre les radiations non ionisantes (ICNIRP), ont publié en 1990 des recommandations provisoires sur l'exposition aux champs électrique et magnétique de 50/60 Hz (INIRC/IRPA, 1990). Ces recommandations reconfirmées lors du dernier congrès de l'IRPA tenu en 1993 (EMF-HSD, ICNIRP, 1993), sont résumées dans le tableau 6.

Ces recommandations d'exposition maximale sont basées sur la connaissance des effets résultant du courant induit à l'intérieur de l'humain à la suite d'une exposition aiguë. En ce qui concerne le champ électrique, le critère proposé pour une journée de travail est fondé sur l'induction d'un courant de 4 mA/m² au niveau de la tête ou du tronc lors d'une exposition à un champ non perturbé de 10 kV/m. Des expositions temporaires en milieu de travail jusqu'à 30 kV/m sont permises pour une durée maximale de 2 h 40.

La valeur maximale recommandée quant au champ magnétique pour une journée de travail est susceptible d'entraîner un courant induit de 1 mA/m² au niveau du tronc. Les valeurs maximales recommandées en milieu de travail pour des expositions de moins de 2 h correspondent à l'induction possible d'un courant de 10 mA/m². L'IRPA, en collaboration avec l'*International Labour Organization*, a publié récemment un guide pratique pour la protection des travailleurs exposés aux CEM de 50/60 Hz (ILO, 1994). En plus de présenter les recommandations de l'IRPA et de l'OMS, ce guide fournit des éléments pratiques quant aux rôles et compétences des autorités responsables. Il précise de plus les procédures de surveillance, de contrôle et d'évaluation de l'exposition en milieu de travail.

2.2.1.2 Organisation mondiale de la santé (OMS)

L'Organisation mondiale de la santé n'a pas produit de recommandation spécifique sur l'exposition en milieu de travail. Un résumé des conclusions des *Environmental Health Criteria* 35 et 69 (WHO, 1984, 1987), qui traitent de l'exposition à ces champs, est présenté dans le tableau 6.

Tableau 5: Limites d'exposition aux champs électrique et magnétique de 50/60 Hz recommandées par l'Association internationale de radioprotection

CARACTÉRISTIQUES DE L'EXPOSITION	CHAMP ÉLECTRIQUE (kV/m) (rms)	CHAMP MAGNÉTIQUE (mT) (rms)
MILIEU DE TRAVAIL		
– toute la journée	10	0,5
– court terme	30 ⁽¹⁾	5 ⁽²⁾
– exposition des membres	—	25
GRAND PUBLIC		
– pendant 24 h	5	0,1
– quelques heures par jour	10	1

(1) La durée de l'exposition au champ entre 10 et 30 kV/m peut être calculée avec la formule $t \leq 80/E$ où t est la durée d'exposition en heures et E le champ électrique en kV/m.

(2) \leq à 2 heures par jour.

SOURCE: INIRC/IRPA, 1990

Tableau 6: Recommandations de l'Organisation mondiale de la santé quant aux expositions aux champs à FEB

CARACTÉRISTIQUES DE L'EXPOSITION	CHAMP ÉLECTRIQUE	CHAMP MAGNÉTIQUE
MILIEU DE TRAVAIL	aucune limite mais, éviter les microchocs	aucune recommandation
GRAND PUBLIC	< 10 kV/m limiter l'exposition à long terme aux niveaux les plus bas que l'on peut raisonnablement atteindre	aucune recommandation

SOURCE: WHO, 1984 et 1987; Anderson et Kaune, 1991

L'OMS ne fait aucune recommandation de limite d'exposition sur les champs magnétiques, mais précise qu'aucun effet significatif n'est observé si le courant induit est inférieur à 10 mA/m². Certains effets biologiques mineurs ont été rapportés lors

de courtes expositions de 10 à 100 mA/m², tels que les phosphènes. Il y aurait un risque significatif lors d'une exposition supérieure à 100 mA/m² (WHO, 1987).

2.2.2 Recommandations au Canada

Il n'existe pas actuellement au Canada de recommandations ou de directives sur les FEB.

Le rapport du groupe de travail canadien sur les champs électrique et magnétique spécifie que les raisons motivant l'absence de telles recommandations proviennent de l'insuffisance de données scientifiques à ce sujet (Santé Canada, 1989).

2.2.3 Recommandations aux États-Unis

2.2.3.1 American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)

L'ACGIH a adopté en 1993 des recommandations d'exposition en regard des fréquences sub-radio (≤ 30 kHz) incluant les champs à FEB (ACGIH, TLV, 1993-94). Ces recommandations ont été précisées dans la dernière version des valeurs limites d'exposition (VLE) [*threshold limit values (TLV)*] (ACGIH, TLV, 1994-95). Un résumé de ces recommandations pour les FEB est présenté au tableau 7.

Ainsi, dans sa dernière version de recommandations de VLE, l'ACGIH a clairement affirmé que

les valeurs d'exposition recommandées sont des valeurs plafonds (ceiling values) à ne jamais dépasser. Pour la fréquence de 60 Hz, les valeurs maximales d'exposition sont donc de 25 kV/m et de 1 mT, soit inférieures à celles préconisées par l'IRPA pour une durée de quelques heures. D'après les documents présentés par l'ACGIH (ACGIH, 1991) justifiant ces recommandations, il est mentionné que celles-ci visent à maintenir chez l'humain un courant induit inférieur ou égal à 10 mA/m².

En recommandant ces valeurs plafonds, l'ACGIH a précisé que, compte tenu des données insuffisantes quant aux effets d'une exposition aux CEM de fréquences extrêmement basses chez l'humain, il lui était impossible de proposer des valeurs limites d'exposition pour une journée de travail [moyenne pondérée par le temps (MPT)] [*time-weighted average (TWA)*]. Par ailleurs, compte tenu des risques pour le confort et la sécurité secondaires aux micro-chocs et au courant induit généré par le contact avec un objet conducteur non mis à la terre, l'ACGIH recommande la mise à la terre de tels objets dès que l'exposition dépasse 5 à 7 kV/m. Si la mise à la terre n'est pas possible, ou dès que le champ électrique dépasse 15 kV/m, il est recommandé que le travailleur utilise des vêtements protecteurs (isolants).

Tableau 7: Recommandations de valeurs limites d'exposition plafond (VLE plafond) au travail selon l'ACGIH pour les FEB*

FRÉQUENCES (f)	CHAMP ÉLECTRIQUE (kV/m) (rms)	FRÉQUENCES	CHAMP MAGNÉTIQUE (mT) (rms)
≤ 100 Hz	25	1 à 300 Hz	$\frac{60}{f}$ **
100 Hz à 4 kHz	$\frac{2,5 \times 10^3}{f}$		

f: fréquence exprimée en hertz.

* Les recommandations pour les porteurs de stimulateurs cardiaques sont plus strictes.

** Pour les extrémités, la valeur plafond peut être multipliée par un facteur de 5.

À cause de l'interférence possible des champs électrique et magnétique de fréquence réseau (50/60 Hz) avec les stimulateurs cardiaques, l'ACGIH recommande qu'à moins d'indication contraire du fabricant, les porteurs de ces appareils ne soient pas exposés à des champs dépassant 1 kV/m ou 0,1 mT.

2.2.3.2 American Industrial Hygiene Association (AIHA)

L'American Industrial Hygiene Association (AIHA) a précisé récemment sa position au sujet de l'exposition aux FEB (AIHA, 1993). Compte tenu des données existantes, l'AIHA ne peut statuer sur les effets pouvant être associés à ce type d'exposition. De plus, en raison de l'hétérogénéité des résultats des études disponibles (*conflicting data*), elle recommande une approche prudente. Ses recommandations peuvent se résumer comme suit :

- caractériser complètement les niveaux d'exposition dans les environnements industriels ;
- éduquer les travailleurs quant aux effets possibles de ces champs, aux niveaux d'exposition recommandés et aux moyens de protection ;
- suivre les recommandations d'exposition de l'ACGIH et de l'IRPA/ICNIRP.

2.2.4 Recommandations en Europe

La majorité des recommandations ayant cours en Europe ont été présentées récemment par Maddock (1992). La plupart des pays ont adopté des recommandations similaires ou très proches de celles de l'IRPA. Parmi les pays de l'Europe occidentale, seule l'Allemagne possède des normes sur l'exposition en milieu de travail : un maximum de 20,7 kV/m pour le champ électrique et de 5 mT pour le champ magnétique de 50/60 Hz. Ces recommandations sont basées sur la densité de courant induit chez l'humain.

2.2.4.1 Comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC)

Le Comité européen de normalisation électrotechnique a récemment proposé des prénormes d'exposition maximale aux champs de FEB (CENELEC, 1994). Ces recommandations sont présentées aux tableaux 8 et 9.

Ces niveaux d'exposition sont basés sur la possibilité d'induction d'un courant induit maximal de 10 mA/m².

2.2.5 Recommandations ailleurs dans le monde

2.2.5.1 Australie

L'Australie a proposé en 1989 des recommandations intérimaires d'exposition pour les champs de 50/60 Hz (NHMRC, 1989). Il s'agit en fait des mêmes recommandations que celles de l'IRPA (INIRC/IRPA, 1990). Le *National Health and Medical Research Council* (NHMRC), qui a élaboré ces recommandations, préconise aussi de développer dans les milieux de travail des programmes de mesures et d'éducation afin de protéger les travailleurs.

2.3 Base des recommandations

Toutes les recommandations qui concernent les FEB sont basées sur le même raisonnement. Seuls les effets prouvés de l'exposition aux champs électrique et magnétique, pour l'évaluation de risques et l'évaluation de normes, sont pris en considération. Le seul mécanisme suffisamment compris et utilisable est l'induction de courant dans l'organisme humain. Les effets possibles de cette induction de courant sont principalement la stimulation des fibres nerveuses et musculaires. Les plages d'intensité de courant pouvant être responsables de tels effets varient selon la fréquence des champs, mais sont assez similaires dans la gamme des FEB (sauf pour les phosphènes).

Tableau 8: Recommandations de prénorme – Niveaux maximaux d'exposition au champ électrique recommandés par le CENELEC

FRÉQUENCES (<i>f</i>) (Hz)	CHAMP ÉLECTRIQUE (kV/m)
MILIEU DE TRAVAIL	
0,1 à 50	30 ^a
50 à 1500	1500/ <i>f</i> ^a
GRAND PUBLIC	
0,1 à 60	10
60 à 1500	600/ <i>f</i>

a Pour les fréquences de 0,1 à 150 Hz, le temps ne doit pas excéder la valeur obtenue par la formule suivante: $t \leq 80/E$.
f: fréquence exprimée en hertz.

SOURCE: CENELEC, 1994

Tableau 9: Recommandations de prénorme – Niveaux maximaux d'exposition au champ magnétique recommandés par le CENELEC

FRÉQUENCES (Hz)	CHAMP MAGNÉTIQUE (mT)
MILIEU DE TRAVAIL	
4 à 1500	80/ <i>f</i>
GRAND PUBLIC ^a	
1,15 à 1500 (Version A)	32/ <i>f</i>

a Le CENELEC propose deux versions de normes à être étudiées par les pays membres. La version A est dérivée de la restriction de base du courant induit.
f: fréquence exprimée en hertz.

SOURCE: CENELEC, 1994

Les premiers effets observables du courant induit chez l'humain sont les phosphènes. Il s'agit d'un phénomène de scintillement lumineux perçu par l'oeil en l'absence de stimulation lumineuse. Ce phénomène, qui est observé dans la migraine ophthalmique, peut être stimulé par l'induction de courant électrique dans la rétine lors d'une exposition aux champs électrique ou magnétique de type FEB. Ce phénomène est présent immédiatement après le début de l'exposition et est complètement réversible après cessation de l'exposition. La sensibilité maximale de la rétine pour l'induction de ce phénomène est obtenue lors d'une exposition à des champs de 18 à 20 Hz (Tenforde, 1990). À une fréquence de 50 Hz, ce phénomène est observé généralement lors d'une induction de courant de 30 à 100 mA/m², ce qui équivaut à une exposition à un champ magnétique d'environ 10 mT (Maddock, 1992). Le *National Radiological Protection Board* (NRPB) au Royaume-Uni affirme ainsi que le courant induit maximal acceptable pour les champs de 50 Hz devrait être de 20 mA/m², étant donné qu'au-dessus de ce niveau, les phosphènes peuvent apparaître. Cependant, il a été estimé récemment que, pour une fréquence de 60 Hz, des phosphènes pourraient être induits par un courant dans la rétine d'environ 10 mA/m² (Tenforde, 1990).

L'ensemble des recommandations d'exposition maximale pour les champs des FEB réfère à l'absence de risque significatif lorsque l'intensité du courant induit ne dépasse pas 10 mA/m². C'est en particulier le raisonnement invoqué par l'OMS (WHO, 1987) et par l'IRPA (INIRC/IRPA, 1990) pour justifier les recommandations maximales d'exposition proposées. Une synthèse des effets possibles selon l'intensité du courant induit a été publiée par l'OMS (WHO, 1987) sur la base des travaux et synthèses publiées par Bernhardt (Bernhardt, 1979). Elle est présentée au tableau 10.

En fait, même si les phosphènes sont considérés par Bernhardt, toute l'argumentation justifiant le critère maximal de 10 mA/m² est basé sur le risque de stimulation des tissus humains (nerfs et muscles), principalement à partir de 100 mA/m², et sur la constatation que des courants de 10 à 1 000 mA/m² sont observés dans le corps humain, par exemple, lors de l'activité cardiaque.

La stimulation de l'ossification a été ajoutée secondairement par l'OMS parmi les effets constatés mais non dangereux. Le champ magnétique induit, responsable de cet effet, entraînerait une densité de courant à l'intérieur de l'os pouvant aller de 2 à 20 mA/m² (WHO, 1987). Cependant, les champs impliqués ne sont pas de type sinusoïdal.

Tableau 10: Courant induit nécessaire pour produire des effets biologiques dans la gamme de fréquences de 3 à 300 Hz

DENSITÉ DU COURANT (mA/m ²)	EFFETS
> 1000	extrasystoles et fibrillations ventriculaires possibles: danger évident
100-1000	modification de l'excitabilité du système nerveux, stimulation musculaire prouvée: danger possible
10-100	phosphènes, autres effets possibles sur le système nerveux, stimulation de l'ossification: effets évidents, mais dont le caractère délétère n'est pas prouvé
1-10	effets biologiques mineurs
< 1	absence d'effets établis

comme l'est typiquement le courant électrique. Il s'agit en fait de champs magnétiques pulsés à des fréquences dans la bande des FEB (principalement de 60 à 75 Hz) mais dont le contenu fréquentiel va du champ continu à une partie des radiofréquences (> 10 MHz) (Bassett, 1989). Il n'est donc pas possible d'appliquer ce genre d'effet aux champs de fréquences sinusoïdales tels que ceux de la fréquence réseau.

Les risques possibles d'interférence avec les stimulateurs cardiaques sont mentionnés par l'IRPA et l'OMS, mais seul l'ACGIH préconise des recommandations spécifiques pour les porteurs de stimulateurs cardiaques. Les risques ont trait à la modification du fonctionnement des stimulateurs fonctionnant sur le mode «demande» (c'est-à-dire fonctionnant selon le besoin), et principalement de type unipolaire (le stimulateur externe servant d'anode). Les interférences sont possibles pour des champs de 50/60 Hz dès que les intensités de champs dépassent 1,7 kV/m et 14 μ T (Bernhardt, 1992). Cependant, seule une faible proportion des stimulateurs cardiaques serait sensible à ces interférences, surtout à partir de 0,2 mT (INIRC /IRPA, 1990; Bernhardt, 1992). Les valeurs maximales recommandées par l'ACGIH se situent donc dans cette plage de valeurs et se basent en fait sur les données présentées par l'IRPA (INIRC/IRPA, 1990).

2.4 Limites des recommandations

Ces recommandations, bien qu'étant basées sur des données expérimentales solides, comportent certaines limites dont il est important de tenir compte lors de l'interprétation des résultats de mesure.

2.4.1 Limites liées à l'évaluation de l'exposition

Étant donné que le mécanisme biologique exact reliant l'exposition à faible dose aux effets observés n'est pas connu, il est impossible de préciser avec certitude le ou les paramètres permettant d'évaluer la dose effective (celle qui est responsable des effets). Pour l'instant, on peut constater que divers paramètres présents lors de l'exposition

aux champs électrique et magnétique de FEB, susceptibles d'être déterminants dans l'interaction avec l'humain, ne sont pas considérés dans les recommandations d'exposition :

- le contenu global de l'exposition selon les diverses fréquences, incluant les harmoniques ;
- le caractère intermittent de l'exposition, la fréquence et l'intensité des ondes transitoires d'intensité élevée (*transients*) ;
- le champ magnétique terrestre et la possibilité d'effets de résonance ;
- le niveau ambiant général (*background*).

Récemment, un atelier organisé par le *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) a réuni divers experts afin de déterminer les paramètres les plus utiles à mesurer lors d'études épidémiologiques. D'après le résumé publié sur les résultats de cet atelier, le consensus qui aurait été établi serait le suivant (EMF-HSD, NIOSH/DOE, 1994) :

- caractériser le spectre global d'exposition au courant alternatif (*AC broadband spectral content*) ;
- mesurer le champ magnétique terrestre (*geomagnetic field*) ;
- prendre en compte la variabilité de l'exposition.

En fait, il faut bien avouer qu'il faudra encore attendre longtemps avant de connaître exactement les paramètres les plus utiles à mesurer. Pour l'instant, on doit réaliser que les paramètres pris en considération dans les recommandations d'exposition sont fort probablement insuffisants, et n'ont pas de lien bien établi avec le risque lié à l'exposition chronique à faible dose.

2.4.2 Incertitudes liées au cheminement du courant induit dans l'organisme humain

Les données permettant d'extrapoler les niveaux de champs de courant induit à l'intérieur de

différentes parties du corps humain sont encore précaires. Bernhardt (1988) a ainsi recommandé d'utiliser des facteurs de sécurité complémentaires afin de tenir compte des incertitudes associées aux hypothèses utilisées dans ces extrapolations. Le cheminement précis du courant induit à l'intérieur de l'organisme est difficile à modéliser. Il est possible que les pics de courants induits soient plus importants que les niveaux moyens pour ce qui est de la stimulation cellulaire.

2.4.3 Limites liées à l'évaluation des effets résultant d'une exposition chronique

Les recommandations d'exposition réfèrent toutes à des expositions aiguës. L'ACGIH a pris soin de préciser dans la dernière version de ses recommandations (ACGIH, VLE, 1994-95) qu'il s'agissait de valeurs plafonds. La précaution n'a pas été prise dans la plupart des recommandations des autres organismes. L'IRPA accepte des niveaux supérieurs à ceux de l'ACGIH pour une exposition de quelques heures. Par contre, elle a avancé de façon provisoire des niveaux-guides pour une journée complète de travail.

Les facteurs de sécurité appliqués par l'IRPA sont présentés plutôt de façon empirique et témoignent des difficultés que l'on a à évaluer l'incertitude relative aux effets possibles d'une exposition chronique. Bernhardt, dont les travaux sont à l'origine des recommandations de l'OMS et de l'IRPA, a d'ailleurs toujours été très prudent quant à la possibilité de proposer des recommandations en regard des expositions chroniques (Bernhardt, 1979; Bernhardt, 1988). Le manque de données concernant les effets possibles à long terme de l'exposition chronique à des niveaux entraînant des courants induits d'environ 1 à 10 mA/m² a ainsi été rappelé récemment (Bernhardt, 1992).

Compte tenu des possibilités de risque de cancer associé à une exposition beaucoup plus faible (Levallois et Gauvin, 1994; Levallois, 1994), il est important de garder à l'esprit que les recommandations actuelles sont basées sur les risques associés à l'exposition de courte durée. Bien que l'ajout de facteurs de sécurité soit conforme aux pratiques

habituelles en matière de radioprotection, il est incertain que les facteurs de sécurité proposés par l'IRPA assurent l'innocuité d'une exposition chronique à ces champs.

2.4.4 Limites liées à l'exposition indirecte (courants de contact)

Il s'agit de l'exposition résultant des contacts directs que la personne, vivant ou travaillant dans un environnement exposé, peut avoir avec des objets non mis à la terre. Des contacts proches d'un objet chargé vont entraîner des sensations de décharges électriques peu agréables qui sont responsables de courants induits transitoires, mais parfois intenses. Le contact direct entraînera un courant pouvant être permanent. Les effets généralement attribués aux courants de contact sont, par ordre croissant d'importance, les suivants (Bernhardt, 1988; Bernhardt, 1992):

- perception du courant;
- sensation désagréable;
- mouvement important pouvant être secondaire à la surprise ou au caractère désagréable;
- lâcher prise: une personne ne peut « lâcher prise » à cause de la contraction musculaire incontrôlable;
- tétanos respiratoire: arrêt respiratoire généré par la contraction des muscles respiratoires;
- fibrillation cardiaque: contraction non synchrone du muscle cardiaque.

Des explications sont données à ce sujet dans les documents de l'IRPA (INIRC/IRPA, 1990) et de l'ACGIH (ACGIH, 1991) et il est fait mention des moyens recommandés pour prévenir ou réduire ces problèmes: mise à la terre des objets exposés, port de vêtements protecteurs. Cependant, ces courants sont très rarement pris en compte dans l'évaluation du risque associé aux FEB et aucune recommandation concernant leur niveau n'est généralement proposée, sauf par le NRPB. Signalons toutefois que les recommandations d'exposition maximale

sous une ligne à haute tension pour le champ électrique (entre 8 et 12 kV en Amérique du Nord) sont basées sur les risques associés au courant induit lors du contact avec des objets non isolés (IRPA/INIRC, 1991; Levallois, 1994). Ces valeurs sont fondées sur le *US National Electrical Safety Code* (US-NESC) qui recommande un courant de contact maximal de 5 mA [American National Standards Institute (ANSI), 1990]. Par ailleurs, le document de CENELEC à ce sujet fait état d'un maximum de 1,5 mA pour les travailleurs et de 1 mA, pour le grand public.

La recommandation du US-NESC est basée sur le risque de difficulté à lâcher prise à partir de 6 mA qui est d'environ 1 sur 200 (chez les femmes) qui sont les plus sensibles à ces effets (Bernstein, 1991). Le niveau de perception du courant est cependant beaucoup plus faible puisque près de la moitié des personnes le perçoivent à partir de 0,3 à 0,4 mA (Bernstein, 1991). Ainsi, afin d'éviter ces problèmes et de plus graves, le courant de contact maximal accepté pour les appareils électriques en Amérique du Nord est de 0,5 mA (ANSI, 1988).

Doit-on se préoccuper uniquement des risques aigus associés à ces courants de contact? On peut se poser la question. En effet, l'intensité des courants induits par ces contacts est nettement supérieure à celle des courants induits directement par l'exposition aux champs électrique et magnétique. En fait, il est possible que les courants induits par des courants de contact sous le seuil de perception entraînent une exposition importante et possiblement certains effets (Bridges, 1994).

2.4.5 Limites liées au mécanisme d'action

Toutes les recommandations d'exposition actuellement existantes sont basées sur un seul mécanisme possible d'action, soit celui associé au courant induit. Cependant, de plus en plus d'évidences laissent suggérer que d'autres mécanismes pourraient être en cause. Ainsi, Graham et Cohen, lors d'expérimentations à double insu ont démontré que des niveaux de champs de 60 Hz de 9 kV/m et de 0,02 mT pouvaient entraîner, principalement après une exposition intermittente, un ralentissement

du rythme cardiaque au repos (de quelques battements par minute) et une altération des potentiels évoqués auditifs et visuels (Graham, 1985). De plus, plusieurs effets observés *in vitro* ou chez l'animal peuvent difficilement être expliqués par le simple effet physique d'un courant induit. Il s'agit, entre autres, des effets suivants (Anderson et Kaune, 1991; Tenforde, 1990; Levallois, 1994):

- l'altération du transport calcique transmembranaire chez diverses cellules exposées à des champs entraînant un courant induit de l'ordre du mA/m²;
- la réduction de la sécrétion de la mélatonine chez le rat lors d'expositions à des champs engendrant un courant induit de l'ordre du mA/m²;
- l'altération de la transcription et de la traduction de l'ARN à des niveaux de champs engendrant un courant induit aussi faible que 0,03 mA/m²;
- le phénomène de fenêtre objectivé par le fait que certains effets soient spécifiques à certaines fréquences et à certaines intensités.

D'autres mécanismes sont donc en cause et beaucoup d'hypothèses et de spéculations ont cours à ce sujet. Les mécanismes couramment discutés sont les suivants:

- un effet possible de résonance magnétique dû à l'interaction du champ magnétique terrestre avec le champ alternatif (Tenforde, 1990);
- l'action directe des champs sur certains récepteurs contenant des composés magnétiques (magnétites) (Kirschvink, 1992);
- l'action, selon un modèle à multiples étapes (*multistage model*), et qui serait occasionnée par des expositions intermittentes (Litovitz, 1992).

Bernhardt a affirmé récemment de façon très claire (Bernhardt, 1992) que les effets présentés précédemment ne peuvent être expliqués par la théorie du courant induit, et que d'autres mécanismes devraient être étudiés et, éventuellement, pris en compte lors de l'évaluation des effets liés à des expositions chroniques à faibles doses. Il est

cependant clair qu'il faudra attendre plusieurs années avant d'avoir des réponses à ce sujet. Pour l'instant, même si le concept d'effets associés au courant induit est solide pour les effets aigus, il ne peut être utilisé pour estimer les effets possibles d'une exposition chronique. Ces incertitudes expliquent le caractère provisoire des recommandations de l'IRPA/ICNIRP.

2.4.6 Limites liées aux facteurs de sécurité

Les facteurs de sécurité utilisés par les organismes proposant des recommandations d'exposition sont rarement explicites et très variables. Le facteur de sécurité utilisé pour le champ magnétique (10) est différent de celui utilisé pour le champ électrique (3). En fait, d'après les données fournies par l'IRPA (INIRC/IRPA, 1990), le champ électrique de 10 kV, considéré comme acceptable en milieu de travail pour toute la journée, entraînerait au niveau du tronc et de la tête un courant induit de 4 mA/m², et celui considéré comme acceptable pour le champ magnétique (0,5 mT) entraînerait un courant induit dans le corps d'environ 1 mA/m². La même constatation peut être faite pour l'exposition du public, car un facteur supplémentaire de 5 est appliqué pour le champ magnétique, alors qu'un facteur supplémentaire de 2 est appliqué pour le champ électrique.

2.5 Résumé

Pour cette gamme de fréquences (de 30 à 300 Hz), les paramètres d'exposition habituellement considérés sont le champ électrique et le champ magnétique. Toutes les recommandations d'exposition maximale à ces champs, proposées en Amérique du Nord et ailleurs dans le monde, sont basées sur les risques associés à l'exposition aiguë et à la prise en compte de l'effet possible du courant induit par une exposition directe. Le courant maximal induit recommandé est de 10 mA/m², ce qui correspond pour les fréquences du réseau électrique (50-60 Hz) à une exposition maximale de 25 kV/m (champs non perturbés) et de 5 mT. Certaines variantes sont proposées par les divers organismes ayant émis des recommandations, mais seule l'ACGIH spécifie clairement qu'il s'agit de valeurs plafonds. Les valeurs plafonds recommandées par

cet organisme pour une fréquence de 60 Hz sont en fait de 25 kV/m et de 1 mT. L'IRPA propose des valeurs maximales légèrement plus élevées que l'ACGIH (30 kV/m et 5 mT), mais qui n'entraînent pas généralement une induction de courant supérieure à 10 mA/m² (sauf pour le champ électrique, où elle est légèrement plus élevée). Cependant, l'IRPA propose des valeurs moyennes pour une exposition de travail en appliquant des facteurs de sécurité dont la valeur, en matière de protection de la santé à long terme, est difficile à évaluer. En fait, la plupart des organismes émettant des recommandations et les experts consultés s'entendent pour affirmer qu'il n'est pas possible actuellement d'évaluer le risque associé à une exposition chronique et donc, de proposer des recommandations d'exposition garantissant une protection contre ces effets éventuels.

D'autres limites associées à l'établissement des recommandations d'exposition ont été décrites. Il s'agit principalement de :

- la difficulté à extrapoler, à partir des niveaux de champs non perturbés, l'induction de courant dans différentes parties du corps ;
- la méconnaissance des mécanismes d'action susceptibles d'entraîner des effets résultant d'une exposition chronique à faible dose ;
- la non-prise en compte de l'exposition réelle, en particulier le contenu spectral de l'exposition, le champ magnétique terrestre, la variabilité de l'exposition ;
- le peu d'emphase mis sur l'exposition indirecte par courant de contact avec des objets non mis à la terre.

Nous avons aussi noté que seuls l'AIHA des États-Unis et le NHMRC d'Australie ont préconisé une politique de prudence en regard de ces expositions en milieu de travail, incluant des programmes de mesures et l'éducation des travailleurs sur les effets possibles de ces champs et les moyens de protection.

Le tableau 11 résume les différentes recommandations d'exposition pour les fréquences extrêmement basses en milieu de travail.

Tableau 11: Résumé des recommandations d'exposition aux champs électromagnétiques à FEB en milieu de travail

ORGANISME	FRÉQUENCES	CHAMP ÉLECTRIQUE (kV/m)		CHAMP MAGNÉTIQUE (mT)	
		Journée	Court terme	Journée	Court terme
IRPA/INIRC ^d	50/60 Hz	10	30 ^a	0,5	5 ^{b,c}
ACGIH	1 à 300 Hz ≤ 100 Hz 100 Hz à 4 kHz	25 ^d $\frac{2,5 \times 10^{3d}}{f}$			60/f ^c
Allemagne	50/60 Hz		20,7		5
CENELEC	0,1 à 50 Hz 50 à 1 500 Hz 4 à 1 500 Hz		30 ^e 1 500/f ^e		80/f

a La durée de l'exposition à un champ entre 10 et 30 kV/m peut être calculée avec la formule $t \leq 80/E$ où t est la durée d'exposition en heures et E le champ électrique en kV/m.

b ≤ à 2 heures par jour.

c Pour les extrémités, la valeur plafond peut être multipliée par un facteur de 5.

d Valeur plafond à ne jamais dépasser.

e De 0,1 à 150 Hz, le temps ne doit pas excéder $t \leq 80/E$.

f: fréquence exprimée en hertz.

SOURCE: INIRC/IRPA, 1990; WHO, 1984; ACGIH, 1994; CENELEC, 1994

RÉFÉRENCES

ACGIH. 1993-1994. Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. Cincinnati OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1993.

ACGIH. Documentation on the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices. Cincinnati OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1991, pp. 55-70.

ACGIH. 1994-1995. Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. Cincinnati OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1994, 119 p.

AIHA. Expanded Position Statement on Extremely Low Frequency and Magnetic Fields. American Industrial Hygiene Association Journal, 1993, vol. 54, p. A-335.

Allen S.G., Bernhardt J.H., Driscoll, C.M.H. et al. Proposals for Basic Restrictions for Protection Against Occupational Exposure to Electromagnetic Non-ionizing Radiations. Recommendations of an International Working Group Set Under the Auspices of the Commission of the European Communities, Physical Medica, 1991, vol. 7, n° 2, pp. 77-89.

Anderson L.E., Kaune W.T. Les champs électrique et magnétique à extrêmement basses fréquences. La protection des rayonnements non ionisants, 2^e édition, Organisation mondiale de la santé, Publications régionales, Série européenne n° 25, Copenhague, éditée par: Michaël J. Suess, Benwell-Morisson Deirdre A., 1991, chap. 5, pp. 209-291.

ANSI. Leakage Current from Appliances, C 101.1. American National Standards Institute, New York, 1973.

ANSI. National Electrical Safety Code. American National Standards Institute, ANSI/IEEE, SH12641, 1990.

Basset CAL. Fundamental and Practical Aspects of Therapeutic Uses of Pulsed Electromagnetic Fields (PEMFs). Critical Reviews in Biomedical Engineering, 1989, vol. 17, n° 5, pp. 451-529.

Bennet W.R. Characteristics of ELF EM Fields and Nature of Exposures. Health Effects of Low-Frequency Electric and Magnetic Fields, Oak Ridge Associated Universities, juin 1992, DRAU 92/F8, II1-II-98.

Bernhardt J.H. Non-Ionizing Radiation Safety: Radio Frequency Radiation, Electric and Magnetic Fields. Phys Med Biol, 1992, vol. 37, n° 4, pp. 807-844.

Bernhardt J.H. The Establishment of Frequency Dependant Limits for Electric and Magnetic Fields and Evaluation on Indirect Effects. Radiat Environ Biophys, 1988, vol. 27, pp.1-27.

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, 1979, vol.16, pp. 309-323.

Bernstein T. Electrical Shock Hazards and Safety Standards. IEEE Transactions on Education, 1991, vol. 34, n° 3, pp. 216-222.

Bridges J.E. Unperceived Body Currents Arising from Contact with Metal Objects in 60 Hz Fields. Project Abstracts, the Annual Review of Research on Biological Effects of Electric and Magnetic Fields from the Generation, Delivery and Use of Electricity, 1994, p. A-29.

CENELEC. Draft European Prestandard, Human Exposure to Electromagnetic Fields, Low-Exposure (0 Hz to 10 kHz). Comité européen de normalisation électrotechnique, pr Env 50166-1: 1994, septembre 1994, 24 p.

EMF-HSD. ICNIRP maintains 1990 exposure guidelines. EMF Health and Safety Digest, vol. 11, juin 1993, n° 6, p. 5.

EMF-HSD. CENELEC approves EMF prestandards. EMF Health and Safety Digest, vol. 12, n° 10, novembre/décembre 1994, p.8.

EMF-HSD. NIOSH/DOE Workshop on Exposure Assessment for Epidemiology. EMF Health and Safety Digest, octobre 1994, vol. 12, n° 9, pp.13-15.

Graham C., Cohen H.D. Influence of 60 Hz Fields on Human Behaviour. Physiology, Biochemistry. New York State, Power Lines Project, 1985.

INIRC/IRPA. Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields. International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association, Health Physics, 1990, vol. 58, n° 1, pp. 113-122.

Jacob H. Vocabulaire des matières dangereuses utilisées au travail. Bulletin de terminologie 215. Bureau de la traduction, Direction de la terminologie et des services linguistiques, 1995, 1039 p.

Kirschvink J.L., Kobayashi-Kirschvink A., Diazricci J.I.C., Kirschvink S.J. Magnetite in Human Tissues: a Mechanism for the Biological Effects of Weak ELF Magnetic Fields. Bioelectromagnetics, 1992, suppl. 1, pp. 101-113.

Levallois P., Gauvin D. Les risques associés aux champs électromagnétiques générés par les lignes de transport et de distribution de l'électricité. Évaluation environnementale du projet Grande-Baleine, dossier synthèse n° 9, partie I, Bureau de soutien à l'examen public du projet Grande-Baleine, 1994, 115 p.

Levallois P. Les dangers associés à l'exposition aux champs électromagnétiques de 60 Hz en milieu de travail. Travail et Santé, 1994, vol. 10, n° 2, pp. 510-515.

Litovitz T.A., Montrose C.J., Wang W. Dose-response Implications of the Transient Nature of Electromagnetic-Field-Induced Bioeffects: Theoretical Hypotheses and Prediction. Bioelectromagnetics, 1992, suppl. 1, pp. 237-246.

Maddock B.J. Exposure Limits around the World (Standards for Exposure to Electric and Magnetic Fields at Low Frequencies). Electric and Magnetic Fields in the Workplace, Proceedings of Meeting Held at Eurodisney, 21-23 octobre 1992, complété par: RAF Cox, International Commission on Occupational Health Radiation and Work Committee, 1992, chap. 17; pp. 1-24.

NHMRC. Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields (1989). Approuvé par le National Health and Medical Research Council, Canberra, novembre 1989, et produit en format intérimaire en instance de publication, 24 p.

NRPB. Guidance as to Restrictions on Exposures to Time Varying Electromagnetic Fields and the 1988 Recommendations of the International Non-Ionizing Radiation Committee. Guidance on Standards. National Radiological Protection Board, NRPB-GS11, mai 1989, 22 p.

Santé Canada. Votre santé et les champs électromagnétiques. Rapport du Groupe de travail sur les champs électrique et magnétique. Direction de l'hygiène du milieu, Direction générale de la protection de la santé, Santé Canada, 89-DHM-150, mai 1989, 15 p.

Stuchly M.A. Introduction to Bioelectromagnetics. Non-Ionizing Radiation Proceedings, 2nd International Non-Ionizing Radiation Workshop, édité par: M. Wayne Greene, International Radiation Protection Association, Vancouver, 10-14 mai, 1992, pp. 17-31.

Tenforde T.S. Biological Interactions and Human Health Effects of Extremely Low Frequency Magnetic Fields. Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields: the Question of Cancer, édité par: B.W. Wilson, R.G. Stevens, L.E. Anderson, Battelle Press, 1990, pp. 291-315.

The IRPA Non-Ionizing Radiation Committee. Review of Concepts, Quantities, Units and Terminology for Non-Ionizing Radiation Protection. IRPA Guidelines on Protection Against Non-Ionizing Radiation, édité par: A.S. Duchêne, J.R.A. Lakey, M.H. Repacholi, Pergamon Press, 1991, pp. 8-41.

WHO. Environmental Health Criteria 35: Extremely Low Frequency (ELF) Fields. World Health Organisation, Genève, 1984, 131 p.

WHO. Environmental Health Criteria 69: Magnetic Fields. World Health Organization, Genève, 1987, 197 p.

Wood A.W. Possible Health Effects of 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields: Review of Proposed Mechanisms. Australian Physical and Engineering Sciences in Medicine, 1993, vol. 16, n° 1, pp. 1-21.

Chapitre 3

Les champs électrique et magnétique
à fréquences vocales, basses
et très basses (de 300 Hz à 100 kHz)

Table des matières

	page
3. LES CHAMPS ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE À FRÉQUENCES VOCALES, BASSES ET TRÈS BASSES (de 300 Hz à 100 kHz)	3.5
3.1 Description des paramètres	3.5
3.2 Description des normes et recommandations actuelles	3.5
3.2.1 Recommandations internationales	3.5
3.2.1.1 Association internationale de radioprotection (IRPA)	3.5
3.2.1.2 Organisation mondiale de la santé (OMS)	3.5
3.2.2 Recommandations au Canada	3.6
3.2.2.1 Santé Canada	3.6
3.2.3 Recommandations aux États-Unis	3.7
3.2.3.1 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)	3.7
3.2.3.2 American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)	3.7
3.2.4 Recommandations en Europe	3.7
3.2.4.1 National Radiological Protection Board (NRPB)	3.7
3.2.4.2 Comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC)	3.8
3.3 Base des recommandations	3.10
3.4 Limites des recommandations	3.11
3.4.1 Limites liées à l'évaluation de l'exposition	3.11
3.4.2 Limites liées à la connaissance des effets possibles associés à l'exposition chronique	3.11
3.4.3 Limites liées à la connaissance du cheminement du courant dans l'organisme humain	3.12
3.4.4 Limites liées aux facteurs de sécurité	3.12
3.5 Résumé	3.12
RÉFÉRENCES	3.14

3. LES CHAMPS ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE À FRÉQUENCES VOCALES, BASSES ET TRÈS BASSES

3.1 Description des paramètres

La plupart des organismes (WHO, 1993; ACGIH, 1994; AIHA, 1994) subdivisent la bande des fréquences de 300 Hz à 100 kHz en trois classes: les fréquences vocales (FV) de 300 Hz à 3 kHz, les fréquences très basses (FTB) de 3 kHz à 30 kHz et les fréquences basses (FB) de 30 kHz à 100 kHz.

Les appareils produisant ces fréquences sont, entre autres, les installations vidéo (de 15 à 35 kHz), les stations de communication (30 kHz ou plus) et les fours industriels électriques (de 1 à 10 kHz). Pour ces fréquences, les ondes mesurent entre 1 à 100 km de longueur.

Le principal phénomène d'interaction de ces champs avec le corps humain exposé est le courant induit par les champs électrique et magnétique (WHO, 1993; Maddock, 1992). Ce dernier s'exprime en ampère par mètre carré (A/m^2). Les paramètres d'exposition pris en compte lors des évaluations environnementales sont l'intensité du champ électrique, exprimé en volt par mètre (V/m), la densité du flux magnétique en tesla (T) et leurs fréquences.

Quelques organismes expriment les recommandations d'exposition au champ magnétique en A/m plutôt qu'en T. Pour les besoins du présent texte, ces recommandations seront présentées en tesla ($1 A/m$ équivaut à $4\pi \cdot 10^{-7} T$ dans un environnement non magnétique) (NRPB, 1989).

Il convient également de considérer les facteurs suivants:

- l'occupation des zones exposées;
- la durée réelle d'exposition ou les moyennes temporelles;

- les caractéristiques spatiales de l'exposition (corps entier ou partie du corps);

- l'uniformité du champ (moyenne spatiale).

Des recommandations de courant de contact existent, mais ne sont pas traitées dans cet ouvrage. Il en est de même pour les champs pulsés. Le lecteur est invité à consulter les documents officiels des organismes émettant des recommandations de cet ordre.

3.2 Description des normes et recommandations actuelles

Il y a peu de littérature référant spécifiquement aux fréquences se situant entre 300 Hz et 100 kHz (Miller, 1987; Bernhardt, 1988). Cependant, quelques organismes et associations ont établi des recommandations pour cette gamme de fréquences. Celles-ci sont présentées dans les sections qui suivent.

3.2.1 Recommandations internationales

3.2.1.1 Association internationale de radioprotection (IRPA)

L'IRPA n'a pas présenté de recommandation en ce qui a trait à ces fréquences.

3.2.1.2 Organisation mondiale de la santé (OMS)

L'Organisation mondiale de la santé n'a pas émis de recommandations pour les fréquences se situant entre 300 Hz et 100 kHz.

L'OMS a cependant produit un document portant sur les fréquences de 300 Hz à 300 GHz (WHO, 1993), mais n'a proposé des recommandations que pour les fréquences supérieures à 100 kHz.

3.2.2 Recommandations au Canada

3.2.2.1 Santé Canada

Les recommandations contenues dans le *Code de sécurité 6* s'adressent au grand public et au personnel travaillant à proximité des dispositifs émettant des rayonnements. Les recommandations de Santé Canada couvrent les fréquences de 10 kHz à 300 GHz. Les valeurs limites du tableau 12 sont des valeurs à ne pas dépasser pour les fréquences en question lorsque la durée de l'exposition est inférieure à 6 minutes.

Ces recommandations ne s'appliquent pas aux émetteurs portatifs et aux autres dispositifs fonctionnant à des fréquences inférieures à 1 GHz, dont la puissance de sortie est inférieure ou égale à 7 W.

Santé Canada permet que les limites présentées au tableau 12 soient dépassées sous certaines conditions. En effet, les limites peuvent être supérieures durant quelques minutes (< 6 min) en fonction de facteurs d'augmentation de 1,1 à 2,4 dans la mesure où l'exposition subséquente est réduite par un facteur de 3. Santé Canada a également émis des recommandations sur le courant de contact. Celles-ci figurent dans le *Code de sécurité n° 6* (Santé Canada, 1993).

Les travailleuses enceintes sont incluses dans les définitions de travailleurs sous radiofréquences données par Santé Canada.

Tableau 12: Recommandations de Santé Canada de valeurs limites d'exposition – Valeur moyenne pour les fréquences de 10 kHz à 1 MHz*

	CHAMP ÉLECTRIQUE (V/m)	CHAMP MAGNÉTIQUE (mT)
MILIEU DE TRAVAIL	600	0,006
GRAND PUBLIC	280	0,003

* Moyenne pour une période de six minutes.

SOURCE: Santé Canada, 1993

Tableau 13: Recommandations pour l'exposition maximale permise selon IEEE C95.1-1991 pour les FTB et FB en milieux contrôlés et non contrôlés*

FRÉQUENCES (f)	CHAMP ÉLECTRIQUE (V/m)	CHAMP MAGNÉTIQUE (mT)
3 kHz à 100 kHz	614	0,2

* Les valeurs d'exposition relatives à l'intensité des champs électrique et magnétique sont des valeurs obtenues par la moyenne spatiale des valeurs prises dans l'espace équivalant au plan vertical de la coupe transversale du corps humain (espace projeté). Ces recommandations réfèrent à des valeurs moyennes sur une durée de six minutes.

SOURCE: IEEE, 1992

3.2.3 Recommandations aux États-Unis

3.2.3.1 *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*

L'*Institute of Electrical and Electronics Engineers* et le *Standards Coordination Committee 28 on Non-Ionizing Radiation Hazards* ont révisé en 1991 les recommandations ANSI C95.1-1982. Cette révision, appelée IEEE C95.1-1991, a été soumise à l'*American Standards Association* (ANSI) et a été homologuée en 1992. Ces recommandations couvrent les fréquences de 3 kHz à 300 GHz et sont présentées au tableau 13 en regard de la gamme de fréquences de 3 kHz à 100 kHz.

L'IEEE spécifie qu'en milieu contrôlé, le courant induit (moyenne par seconde) chez un individu ne doit pas être supérieur à 1 000 mA pour les fréquences comprises entre 0,3 et 100 kHz.

3.2.3.2 *American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)*

L'ACGIH a adopté en 1993 (ACGIH, TLV, 1993-94), et précisé en 1994 (ACGIH, TLV, 1994-95), des recommandations d'exposition pour le milieu de travail en regard des fréquences sub-radio

(≤ 30 kHz) incluant les FV, les FTB et des radiofréquences couvrant entre autres les fréquences de 30 kHz à 100 kHz (FB). Le tableau 14 résume ces recommandations.

Elles sont en fait similaires à celles de l'IEEE et se basent sur la densité de courant induit dans le corps qui doit rester inférieure à 10 mA/m² pour les FEB (ACGIH, 1991). Les valeurs limites d'exposition pour cette bande de fréquences sont valables autant pour l'exposition du corps entier que pour une partie du corps.

3.2.4 Recommandations en Europe

3.2.4.1 *National Radiological Protection Board (NRPB)*

Le *National Radiological Protection Board* (NRPB) du Royaume-Uni a émis récemment plusieurs recommandations de niveau d'action pour cette gamme de fréquences (NRPB, 1989). Ces niveaux d'action sont présentés au tableau 15.

Tableau 14: Recommandations de valeurs limites d'exposition (VLE plafonds)* aux champs électromagnétiques au travail selon l'ACGIH pour les FV, les FTB, et les FB

FRÉQUENCES (f)	CHAMP ÉLECTRIQUE (V/m)	CHAMP MAGNÉTIQUE (mT)
300 Hz à 4 kHz	$\frac{2,5 \times 10^6}{f}$	0,2
4 kHz à 30 kHz	625	0,2
30 kHz à 100 kHz	614	0,2

* Ces recommandations peuvent ne pas être sécuritaires pour les porteurs de stimulateurs cardiaques.

f: fréquence en Hz.

(1) Valeur moyenne pour une durée de 6 minutes.

Tableau 15: Niveaux de référence pour l'exposition aux champs électromagnétiques de 100 Hz à 100 kHz selon le NRPB*

FRÉQUENCES (f)	CHAMP ÉLECTRIQUE (V/m)	CHAMP MAGNÉTIQUE (mT)
100 Hz à 1 kHz	$614/f$ (kHz)	$0,2/f$ (kHz)
1 à 30 kHz	614	0,2
30 kHz à 100 kHz	614	$6 \times 10^{-3}/f$ (MHz)

f = L'unité de fréquence indiquée pour chaque strate.

SOURCE: NRPB, 1989

3.2.4.2 Comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC)

Le Comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC) a fait paraître, en septembre 1994, un projet de prénorme européenne. Ce projet est présentement soumis pour étude aux 18 pays membres du CENELEC. Ce projet de norme vise à uniformiser les niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques inférieurs à 10 kHz. Les pays membres peuvent cependant établir des normes d'exposition plus sévères (CENELEC, 1994).

La particularité du CENELEC est de définir non seulement des restrictions de base à ne pas dépasser, mais également des niveaux de référence.

Les restrictions de base sont des niveaux de densité de courant (A/m^2) induit dans le corps. Ces niveaux ne doivent jamais être dépassés.

Les restrictions de base de courant induit dans la tête ou dans le tronc pour une exposition continue à un champ alternatif externe sont données au tableau 16.

Si un champ électrique et un champ magnétique de même fréquence sont présents simultanément, les densités de courant induit correspondantes devraient être additionnées.

Les niveaux de référence sont des niveaux de champs facilement mesurables, dérivés des niveaux de base. Cette dérivation inclut une marge

Tableau 16: Recommandations de niveaux de densité de courant induit à ne pas dépasser selon le CENELEC

FRÉQUENCES (f) (Hz)	DENSITÉ DU COURANT INDUIT DANS LA TÊTE ET DANS LE TRONC (mA/m^{2*}) (rms)
4-1 000	10
1 000-10 000	$f/100$

* La densité de courant induit doit être calculée suivant une moyenne pour des surfaces de 100 mm^2 perpendiculairement à la circulation du courant.

SOURCE: CENELEC, 1994

Tableau 17: Recommandations de niveaux de référence d'exposition au champ électrique pour les FV et les FTB selon le CENELEC

FRÉQUENCES (<i>f</i>) (Hz)	CHAMP ÉLECTRIQUE (kV/m)
MILIEU DE TRAVAIL	
300 - 1 500	1 500 / <i>f</i>
1 500 - 10 000	1
GRAND PUBLIC	
300 - 1 500	600 / <i>f</i>
1 500 - 10 000	0,4

SOURCE: CENELEC, 1994

Tableau 18: Recommandations de niveaux de référence d'exposition au champ magnétique pour les FV et les FTB selon le CENELEC

FRÉQUENCES (<i>f</i>) (Hz)	CHAMP MAGNÉTIQUE (mT)	
	Tête ou tronc	Membres
MILIEU DE TRAVAIL		
300 - 1 500	80 / <i>f</i>	1 250 / <i>f</i>
1 500 - 10 000	0,053	0,83
GRAND PUBLIC (Version A)*		
300 - 1 500	32 / <i>f</i>	
1 500 - 10 000	0,021	

* Le CENELEC propose deux versions de normes à être étudiées par les pays membres.
La version A est dérivée de la restriction de base de courant induit.

SOURCE: CENELEC, 1994

de sécurité en considération du large éventail de situations d'exposition possibles, parfois dans des conditions extrêmes. Les restrictions de base ne doivent pas être dépassées si le champ est inférieur au niveau de référence.

Pour les travailleurs dont la situation d'exposition est en général clairement définie, les niveaux de

référence peuvent être supérieurs en autant que les niveaux de base ne sont pas dépassés. Cette méthode d'évaluation peut être nécessaire pour les milieux où les champs sont, de façon marquée, non uniformes.

Si des champs électrique et magnétique de plusieurs fréquences sont présents simultanément, la

conformité avec les recommandations peut être vérifiée à l'aide de formules appropriées tenant compte de l'additivité des effets.

Les limites s'appuient sur les effets à court terme bien établis concernant la stimulation par le courant induit des cellules électriquement excitables dans les muscles et les nerfs. Les restrictions de base ont été faites dans le but de prévenir les conséquences défavorables de tels effets.

Des recommandations de niveau d'exposition pour les courants de contact sont également proposées, mais ne seront pas traitées ici. Le CENELEC affirme que des niveaux d'intensité plus bas que ceux spécifiés peuvent avoir des effets à long terme sur la santé, mais que les résultats des recherches actuelles ne peuvent fournir de paramètres pour restreindre l'exposition.

La plupart des stimulateurs cardiaques et autres appareils implantables sont conçus pour faire face aux interférences électromagnétiques. Cependant, quelques appareils, ainsi que quelques implants métalliques, peuvent être affectés par des niveaux d'exposition inférieurs aux recommandations. Les recommandations du CENELEC concernant les stimulateurs cardiaques sont en préparation. Elles ne s'appliquent pas aux personnes sous traitement médical ou soumises à des examens diagnostiques.

3.3 Base des recommandations

Les recommandations applicables à ces fréquences sont basées principalement sur des études expérimentales. Les principaux effets identifiés dans ces études portent sur le courant induit dans le corps par les champs électrique et magnétique. Il s'agit principalement de la stimulation des fibres nerveuses et musculaires (WHO, 1993; ACGIH, 1991; NRPB, 1989; Tenforde, 1990; Maddock, 1992; Bernhardt, 1988). Cependant, la plupart des études portent sur des fréquences inférieures à celles traitées dans cette section. Ainsi, les effets du courant induit identifiés à d'autres fréquences servent généralement de références pour l'ensemble des fréquences ayant comme principal mécanisme le courant induit.

Toutefois, plusieurs études suggèrent qu'il y aurait d'autres mécanismes d'action que le courant induit. Lors des études expérimentales portant sur les effets biologiques des champs, des effets ont été observés pour des champs dont l'amplitude était modulée en fréquences extrêmement basses. Les effets avaient trait aux paramètres suivants: électroencéphalogramme chez le chat et le lapin, mobilité des ions calcium dans le tissu cérébral *in vitro* et *in vivo*, cytotoxicité lymphocytaire *in vitro*, activité d'une enzyme intervenant dans la croissance et la division cellulaire. Cependant, certaines de ces réponses ont été difficiles à confirmer et la portée physiologique de ces effets n'est pas clairement établie (WHO, 1993).

Le seuil de stimulation des tissus nerveux et musculaires dépend fortement de la fréquence. Ainsi, le seuil de densité de courant nécessaire pour stimuler les tissus nerveux et musculaires varie de 0,1 à 1 A/m² à 300 Hz à environ 10-100 A/m² à 100 kHz (WHO, 1993). Selon l'OMS, les limites d'exposition concernant les densités de courant induit dans les tissus devraient comporter un facteur de sécurité suffisant pour limiter la densité à 10 mA/m² à 300 Hz. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle des courants naturels de l'organisme. Au-dessus de 300 Hz, la densité de courant nécessaire à l'excitation du tissu nerveux croît avec la fréquence jusqu'à ce que les effets thermiques prennent le relais (WHO, 1993).

Selon Maddock (1992), l'existence d'effets directs du courant induit est rare, car il faut un champ externe relativement important pour produire des effets. De plus, il n'y aurait pas de différence fondamentale entre le courant induit par le champ électrique et le champ magnétique sauf en ce qui concerne la distribution du courant à l'intérieur du corps.

Peu d'études portant directement sur les effets de l'exposition aiguë ou chronique aux champs de 300 Hz à 300 GHz ont été réalisées chez l'humain. Selon l'OMS, les quelques études épidémiologiques relatives à ces fréquences n'ont pas permis à ce jour de démontrer une influence quelconque sur la santé.

3.4 Limites des recommandations

Bien que ces limites soient basées sur les études expérimentales, *in vivo* et *in vitro*, un certain nombre d'effets restent peu connus ou insuffisamment documentés pour le moment.

3.4.1 Limites liées à l'évaluation de l'exposition

Les seuls paramètres pris en compte actuellement pour l'élaboration des recommandations sont les champs électrique et magnétique ainsi que la fréquence dominante ou choisie. Cependant, les appareils de mesure des champs généralement utilisés ne permettent pas de caractériser le spectre global d'exposition des diverses fréquences en présence.

Le phénomène biologique exact reliant l'exposition à faible dose aux effets observés n'étant pas connu, il est impossible de présenter un indice permettant d'évaluer une dose effective.

Plusieurs paramètres présents lors de l'exposition aux champs électrique et magnétique inférieurs à 100 kHz, et susceptibles d'être déterminants dans l'interaction avec l'humain, ne sont pas considérés dans les recommandations:

- le contenu global de l'exposition selon les diverses fréquences, incluant les harmoniques;
- le caractère intermittent de l'exposition, la fréquence et l'intensité élevée des ondes transitoires (*transients*);
- le champ magnétique terrestre et la possibilité d'effets de résonance;
- le niveau ambiant général (*background*).

Par ailleurs, même si le courant induit semble le principal paramètre sur lequel sont basées les recommandations d'exposition, il ne peut être mesuré facilement. Cependant, de nouveaux appareils seraient actuellement disponibles pour mesurer ce courant (AIHA, 1994). On doit aussi

reconnaître que les recommandations tenant compte de la durée d'exposition telles que celles du *Code de sécurité n° 6* de Santé Canada sont très difficiles à vérifier vu qu'il n'existe pas de dosimètre permettant d'évaluer l'exposition personnelle à ces champs.

Le champ électrique étant perturbé par la présence d'objets et par le corps humain, la mesure du champ non perturbé peut être bien différente de celle qui est présente lors de l'exposition en milieu de travail.

3.4.2 Limites liées à la connaissance des effets possibles associés à l'exposition chronique

Toutes les recommandations présentées sont basées sur les effets d'une exposition de courte durée. Jusqu'ici, rien n'indique de manière définitive que les champs électromagnétiques puissent intervenir dans le processus de la cancérogenèse. Plusieurs études expérimentales montrent que ces champs n'ont pas d'effet mutagène et que, selon toute probabilité, ils n'agissent pas comme agents initiateurs de la cancérogenèse (WHO, 1993). Cependant, un certain nombre d'études épidémiologiques ont rapporté un accroissement de l'incidence de cas de cancer dans des populations exposées aux champs magnétiques (WHO, 1993).

Les recherches sur les effets chroniques de l'exposition sont encore peu développées. Cependant, les connaissances concernant les interactions biologiques des champs autres que celles provenant des courants induits ne sont pas suffisamment approfondies pour les prendre en considération lors de l'établissement des recommandations d'exposition (Bernhardt, 1988).

À l'heure actuelle, nous ne connaissons pas tous les mécanismes d'interaction entre les champs et le corps humain. Certaines interactions sont suspectées, mais ne sont pas encore validées. Des effets auraient été observés au niveau microscopique relativement à la perturbation de systèmes biologiques telles les membranes cellulaires et les structures intracellulaires (WHO, 1993).

L'examen des diverses recommandations révèle une certaine disparité entre les niveaux d'exposition préconisés. Ces écarts entre les organismes proviennent des différentes bases choisies, de l'incertitude et de la signification de ces bases, et enfin, de l'interprétation des différentes données scientifiques. Les recommandations varient d'un pays à l'autre selon les jugements de valeur concernant la validité des arguments scientifiques ou l'importance relative des effets sur la santé (Maddock, 1992; Czerski, 1986).

3.4.3 Limites liées à la connaissance du cheminement du courant dans l'organisme humain

Les données permettant d'extrapoler les niveaux de champs en courant induit à l'intérieur de différentes parties du corps humain sont précaires. Une des principales limites observées lors de la détermination des recommandations d'exposition concerne la corrélation de la densité de courant dans les tissus internes avec l'exposition magnétique externe. Bernhardt (1988) souligne que le modèle de calcul des valeurs moyennes d'exposition se base sur la distribution du champ électrique dans le cœur et la tête. Le trajet exact du courant induit n'est cependant pas connu et peut causer des dommages locaux.

Les valeurs d'exposition maximales proposées sont basées en majeure partie sur les résultats d'études expérimentales chez l'animal et non chez l'humain. Ainsi, les données concernant le courant induit sont extrapolées. Cette extrapolation ajoute à l'incertitude liée aux effets des champs de FV, de FTB et de FB.

3.4.4 Limites liées aux facteurs de sécurité

Il est très difficile d'apprécier la valeur des facteurs de sécurité utilisés pour l'établissement des recommandations proposées. D'une part, les niveaux sans effet chez l'humain pour cette gamme de fréquences sont plutôt incertains et les facteurs de sécurité qui visent à tenir compte des incertitudes existantes sont rarement précisés de façon explicite.

3.5 Résumé

Pour la bande de fréquences de 300 Hz à 100 kHz, peu de recommandations d'exposition ont été émises par les organismes internationaux. Cependant, toutes les recommandations existantes sont fondées sur les effets possibles du courant induit dans le corps humain. Pour cette bande de fréquences, les limites de courant induit dans le corps dépendent généralement de la fréquence. Cependant, les bandes de fréquences utilisées pour émettre les recommandations diffèrent d'un organisme à l'autre.

Ainsi, l'ACGIH recommande un niveau maximal de champ électrique de 8 333 V/m pour la fréquence de 300 Hz alors que le NRPB et le CENELEC recommandent, pour cette même fréquence, une limite de 2 047 V/m et de 5 000 V/m respectivement. À 100 kHz, tous les organismes en arrivent à la même recommandation, c'est-à-dire 614 V/m (600 V/m dans le *Code de sécurité 6*, Santé Canada, 1993).

En ce qui concerne le champ magnétique, l'ACGIH recommande une exposition maximale de 200 μ T pour l'ensemble de la bande de fréquences de 300 Hz à 100 kHz. L'IEEE recommande cette même valeur pour la bande de fréquences de 3 kHz à 100 kHz. Les recommandations des autres organismes varient sensiblement. En effet, le NRPB propose un niveau de référence de 267 μ T à 300 Hz et 80 μ T à 100 kHz, alors que le CENELEC recommande 270 μ T à 300 Hz et 53 μ T à 100 kHz. Le plus bas niveau d'exposition a été établi par Santé Canada, soit 6 μ T pour la bande de fréquences de 10 kHz à 1 MHz.

Ces recommandations sont basées sur des données expérimentales portant sur d'autres fréquences et qui souvent, sont extrapolées pour les FV, les FTB et les FB. L'OMS et l'IRPA ne proposent pas de niveaux d'exposition pour ces fréquences en spécifiant que les données expérimentales ne permettent pas de déterminer de façon claire si ces champs sont porteurs d'effets sur la santé.

Le tableau 19 résume les recommandations des différents organismes pour cette gamme de fréquences.

Tableau 19: Synthèse des recommandations d'exposition maximale aux champs électromagnétiques à FV, VTB et FB en milieu de travail pour le courant induit direct

ORGANISME	FRÉQUENCES	CHAMP ÉLECTRIQUE (V/m)	CHAMP MAGNÉTIQUE (mT)
Santé Canada	10 kHz-100 kHz	600	0,006
IEEE	3 kHz-100 kHz	614	0,2
ACGIH	100 Hz-4 kHz	$(2,5 \times 10^6)/f^a$	0,2
	4 kHz-30 kHz	625	0,2
	30 kHz-100 kHz	614	0,2
CENELEC ^d	300-1 500 Hz	$1 500/f^b$	$80/f^a$
	1 500-10 000 Hz	1 000	0,053

a f : fréquence en Hz.

b f : fréquence en kHz.

c f : fréquence en MHz.

d Recommandations de niveau de référence (n'est pas un maximum).

SOURCE: Santé Canada, 1993; IEEE, 1992; ACGIH, 1994; CENELEC, 1994

RÉFÉRENCES

- AIHA.** American Industrial Hygiene Association. Expanded Position Statement on Extremely Low Frequency and Magnetic Fields. American Industrial Hygiene Association Journal, 1993, n° 54; A-335.
- AIHA.** Radio-Frequency and Microwave Radiation. Non-Ionizing Radiation Guide Series, 2^e édition, American Industrial Hygiene Association, Fairfax VA, 1994, 33 p.
- ACGIH.** 1994-1995 Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. Cincinnati OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1994, 119 p.
- ACGIH.** Documentation on the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. Cincinnati OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1991, pp. 45-70.
- ACGIH.** 1993-1994 Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. Cincinnati OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1993.
- Bernhardt J.H.** Non-Ionizing Radiation Safety: Radiofrequency Radiation, Electric and Magnetic Fields. Radiat Environ Biophys, 1992, vol. 37, pp. 807-844.
- Bernhardt J.H.** The Establishment of Frequency Dependant Limits for Electric and Magnetic Fields and Evaluation on Indirect Effects. Radiat Environ Biophys, 1988, vol. 27, pp. 1-27.
- Carrière P.É.** Rayonnements non ionisants. Hygiène du travail, Les éditions Le Griffon d'argile inc., Sainte-Foy, Québec, 1985, pp. 307-368.
- CENELEC.** Draft European Prestandard. Human Exposure to Electromagnetic Fields. Low-Exposure (0 Hz to 10 kHz). Comité européen de normalisation électrotechnique. pr Env 50166-1: 1994, septembre 1994, 24 p.
- IEEE.** IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE C95.1-1991, avril 1992, 76 p.
- Jacob H.** Vocabulaire des matières dangereuses utilisées au travail. Bulletin de terminologie 215. Bureau de la traduction, Direction de la terminologie et des services linguistiques, 1995, 1039 p.
- Maddock B.J.** Exposure Limits around the World (Standards for Exposure to Electric and Magnetic Fields at Low Frequencies). Electric and Magnetic Fields in the Workplace, Proceedings of meeting held at Eurodisney, 21-22 octobre 1992, complété par: RAF Cox, International Commission on Occupational Health Radiation and Work Committee, 1992, chap. 17, pp. 1-24.
- Miller G.** Exposure Guidelines for Magnetic Fields. American Industrial Hygiene Association Journal, vol. 48, décembre 1987, pp. 957-968.
- NRPB.** Board Statement on Restrictions on Human Exposure to Static and Time Varying Electromagnetic Fields and Radiation. National Radiological Protection Board, vol. 4, n° 5, 1993.
- Santé Canada.** Limites d'exposition à des champs de radiofréquences de la gamme 10kHz - 300 GHz. Code de sécurité 6. Direction de l'hygiène du milieu, Direction générale de la protection de la santé, Santé Canada, 1993, 62 p.
- Stuchly M.A.** Introduction to Bioelectromagnetics. Non-Ionizing Radiation, Proceedings, 2nd International Non-Ionizing Radiation Workshop, édité par: M. Wayne Greene, International Radiation Protection Association, 1992, pp. 17-31.
- Tenforde T.S.** Biological Interactions and Human Health Effects of Extremely Low Frequency Magnetic Fields. Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields: the Question of Cancer, édité par: B.W. Wilson, R.G. Stevens, L.E. Anderson, Battelle Press, 1990, pp. 291-315.

The IRPA Non-Ionizing Radiation Committee.
IRPA Guidelines on Protection Against Non-Ionizing Radiation, édité par: A.S. Duchêne, J.R.A. Lakey, M.H. Repacholi, Pergamon Press, 1991, pp. 1-41.

WHO. Environmental Health Criteria 137: Electromagnetic Fields (300 Hz et 300 GHz).
World Health Organization, Genève, 1993.

WHO. Environmental Health Criteria 69: Magnetic fields. World Health Organization, Genève, 1987, 197 p.

Chapitre 4

Les radiofréquences et micro-ondes
(de 100kHz à 300 GHz)

Table des matières

	page
4. LES RADIOFRÉQUENCES ET MICRO-ONDES (de 100 kHz à 300 GHz)	4.5
4.1 Description des paramètres	4.5
4.2 Description des normes et recommandations actuelles	4.5
4.2.1 Recommandations internationales	4.5
4.2.1.1 Association internationale de radioprotection (IRPA)	4.5
4.2.1.2 Organisation mondiale de la santé (OMS)	4.6
4.2.2 Recommandations au Canada	4.7
4.2.2.1 Santé Canada	4.7
4.2.3 Recommandations aux États-Unis	4.8
4.2.3.1 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)	4.8
4.2.3.2 American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)	4.10
4.2.4 Recommandations en Europe	4.10
4.3 Base des recommandations	4.10
4.4 Limites des recommandations	4.12
4.4.1 Estimation de la dose reçue	4.12
4.4.2 Détermination du <i>LOAEL</i>	4.12
4.4.3 Effets résultant d'une exposition chronique	4.13
4.5 Résumé	4.13
RÉFÉRENCES	4.15

4 LES RADIOFRÉQUENCES ET MICRO-ONDES (de 100 kHz à 300 GHz)

4.1 Description des paramètres

Par convention internationale, les champs de fréquences radio (RF) couvrent les fréquences allant de 100 kHz à 300 GHz (IRPA, 1991; WHO, 1993). La partie du spectre des radiofréquences se situant entre 300 MHz et 300 GHz est souvent appelée micro-ondes (MO). Les radiofréquences sont fréquemment subdivisées selon leurs longueurs d'onde comme suit (WHO – Europe 1991):

- moyennes fréquences (MF): 300-3 000 kHz
- hautes fréquences (HF): 3-30 MHz
- très hautes fréquences (THF): 30-300 MHz
- ultrahautes fréquences (UHF): 300-3 000 MHz
- superhautes fréquences (SHF): 3-30 GHz
- extrêmement hautes fréquences (EHF): 30-300 GHz

Dans le domaine des radiofréquences, on utilise en général la densité de puissance pour définir le niveau d'exposition aux champs électromagnétiques. Celle-ci s'exprime en watt par mètre carré (W/m^2) ou encore en milliwatt par mètre carré (mW/m^2). Par contre, dans des situations où l'on se situe près de la source de radiofréquences, il est nécessaire, pour décrire le champ électromagnétique, de préciser l'intensité du champ électrique qui se mesure en volt par mètre (V/m) et celle du champ magnétique qui s'exprime en ampère par mètre (A/m).

D'autres paramètres doivent être pris en considération pour l'interprétation des mesures en particulier:

- les fréquences d'exposition;
- la caractéristique des modulations;

- la caractéristique des champs pulsés;
- la durée d'exposition;
- la polarisation (orientation) du champ;
- la partie du corps exposé;
- la présence d'objets environnants;
- la variation spatiale du champ au point de mesure.

Ces facteurs peuvent influencer l'absorption d'énergie par le corps humain et les effets biologiques chez l'humain.

Au-dessus de 100 kHz, plusieurs des interactions biologiques observées peuvent être corrélées avec le taux de dépôt d'énergie par unité de masse. Cette énergie absorbée est exprimée sous forme de débit d'absorption spécifique (DAS) [*specific absorption rate* (SAR)]. Le DAS est une mesure de dose effective produisant un réchauffement des tissus et est exprimé en watt par kilogramme (W/kg) ou en milliwatt par gramme (mW/g). Le DAS est habituellement estimé pour une exposition sur tout le corps ou pour des parties du corps.

4.2 Description des normes et recommandations actuelles

Il n'existe pas de normes d'exposition pour cette gamme de fréquences, mais des recommandations qui sont cependant largement diffusées et font l'objet d'un consensus assez général.

4.2.1 Recommandations internationales

4.2.1.1 Association internationale de radioprotection (IRPA)

L'IRPA a publié récemment (IRPA, 1991) une mise à jour de ses recommandations d'exposition sur les radiofréquences. Les limites d'exposition recommandées pour les milieux de travail sont présentées au tableau 20.

Tableau 20: Limites d'exposition aux radiofréquences en milieu de travail selon l'IRPA

FRÉQUENCES	CHAMPS NON PERTURBÉS (rms)		DENSITÉ DE PUISSANCE ÉQUIVALENTE POUR ONDES PLANES (W/m ²)
	ÉLECTRIQUE (V/m)	MAGNÉTIQUE (A/m)	
100-1 000 kHz	614	1,6/f	—
> 1-10 MHz	614/f	1,6/f	—
> 10-400 MHz	61	0,16	10
> 400-2 000 MHz	3 f ^H	0,008 f ^H	f/40
> 2-300 GHz	137	0,36	50

À noter que les valeurs mentionnées dans ce tableau sont des valeurs moyennes sur 6 minutes. Des exigences supplémentaires sont présentées pour tenir compte de situations particulières :

- le courant induit dans le corps humain et rejoignant la terre ne doit pas excéder 200 mA ;
- la limite pour les champs pulsés (moyenne sur la largeur de la pulsation) est 32 fois la valeur de champs donnée dans le tableau 20 et 1 000 fois la valeur donnée sous forme de densité de puissance ;
- ces recommandations ne doivent pas entraîner un débit d'absorption moyen (DAS) pour le corps entier sur 6 minutes supérieur à 0,4 W/kg, aux extrémités, à 20 W/kg et dans quelques autres parties du corps à 10 W/kg ;
- ces limites s'appliquent à des ondes continues ou modulées ;
- dans le cas de fréquences supérieures à 10 MHz en conditions de champs proches, les limites de champs électrique et magnétique peuvent être dépassées si : $5/6 (E^2/120\pi) + 1/6 (120\pi H^2) \leq$ densité de puissance équivalente (W/m²), prévue au tableau 21. E = champ électrique (V/m) et H = champ magnétique (A/m) ;
- les courants de contact avec des objets métalliques devraient être inférieurs à 50 mA afin d'éviter les risques de brûlures ;

– pour la population général, les recommandations d'exposition sont présentées au tableau 21.

Les mêmes conditions supplémentaires relatives aux milieux de travail sont appliquées, excepté que le DAS pour le corps entier ne doit pas dépasser 0,08 W/kg.

De façon générale, lorsqu'une exposition à multiples fréquences se produit, l'effet additif des expositions doit être considéré et la somme des fractions :

$$\frac{\text{valeur mesurée}}{\text{valeur recommandée}^{(1)}} \text{ pour chacune des fréquences doit être inférieure à 1.}$$

4.2.1.2 Organisation mondiale de la santé (OMS)

L'OMS a présenté en 1993, une nouvelle publication sur les effets des radiofréquences (WHO, 1993). Il s'agit en fait d'un document rédigé conjointement avec l'IRPA et qui reprend intégralement les recommandations de l'IRPA vues précédemment (voir 4.2.1.1).

(1) Pour les champs électrique et magnétique, le carré des valeurs doit être considéré.

Tableau 21: Limites d'exposition aux radiofréquences pour la population en général selon l'IRPA

FRÉQUENCES	CHAMPS NON PERTURBÉS (rms)		DENSITÉ DE PUISSANCE ÉQUIVALENTE (W/m ²)
	ÉLECTRIQUE (V/m)	MAGNÉTIQUE (A/m)	
100-1 000 kHz	87	0,23/f ^H	—
1-10 MHz	87/f ^H	0,23/f ^H	—
10-400 MHz	27,5	0,073	2
400-2 000 MHz	1,375/f ^H	0,0037/f ^H	f/200
2-300 GHz	61	0,16	10

f: fréquence en MHz.

4.2.2 Recommandations au Canada

4.2.2.1 Santé Canada

Santé Canada a publié des recommandations précisant les limites d'exposition pour la gamme des radiofréquences (HWC, 1991). Ces recommandations sont destinées principalement au personnel des ministères et organismes fédéraux. Cependant, des recommandations sont aussi proposées pour la population générale. Le *Code de sécurité 6* est devenu *de facto* un guide national dans le domaine

des radiocommunications. Pour obtenir une autorisation afin d'installer ou de modifier une tour de communication, Industrie Canada requiert que le propriétaire prouve qu'il respectera les valeurs-guides recommandées.

Le tableau 22 présente les limites d'exposition proposées pour les milieux de travail.

Ces limites sont les expositions maximales permises de densité de puissance sous la forme d'une moyenne sur 6 minutes.

Tableau 22: Limites d'exposition recommandées par Santé Canada en milieu de travail pour la gamme des radiofréquences

FRÉQUENCES	CHAMPS NON PERTURBÉS (rms)		DENSITÉ DE PUISSANCE (W/m ²)
	ÉLECTRIQUE (V/m)	MAGNÉTIQUE (A/m)	
10-1 000 kHz	600	4,9/f	—
1-10 MHz	600/f	4,9/f	—
10-30 MHz	60	4,9/f	—
30-300 MHz	60	0,163	10
300-1 500 MHz	3,46/f ^H	0,0093/f ^H	f/30
1,5-300 GHz	140	0,36	50

f: fréquence en MHz.

Les limites permises pour la population en général sont présentées au tableau 23.

Les valeurs maximales de densité de puissance sont présentées sous forme d'une moyenne sur 6 minutes d'exposition.

Des recommandations sont proposées pour le courant de contact (indirect), mais pas pour le courant induit directement par les champs.

Dans le cas d'émetteurs portatifs ou d'autres appareils produisant des champs hautement variables spatialement, les valeurs présentées peuvent être dépassées si les DAS suivants sont respectés.

4.2.3 Recommandations aux États-Unis

4.2.3.1 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

L'IEEE a publié en 1992 ses dernières recommandations sur la gamme des radiofréquences (IEEE, 1992) qui ont été ensuite entérinées par l'*American National Standard Institute* (Lin, 1994).

Les recommandations concernant les milieux de travail (environnements contrôlés) sont présentées au tableau 24.

DAS (W/kg) selon les populations exposées

	TRAVAILLEURS	POPULATION EN GÉNÉRAL
Moyen sur 20 % du corps	0,4	0,2
Local dans l'oeil	0,4	0,2
Moyenne sur 1 g de tissu à l'exception de la surface du corps et dans les membres	8	4
Local sur 10 g de tissu à la surface du corps et dans les membres	25	12

Tableau 23: Les limites d'exposition pour la population générale présentées par Santé Canada pour la gamme des radiofréquences

FRÉQUENCES	CHAMPS NON PERTURBÉS (rms)		DENSITÉ DE PUISSANCE (W/m ²)
	ÉLECTRIQUE (V/m)	MAGNÉTIQUE (A/m)	
10-1 000 kHz	280/f	2,19/f	—
1-10 MHz	280/f	2,19/f	—
10-30 MHz	28	2,19/f	—
30-300 MHz	28	0,073	2
300-1 500 MHz	1,616/f ^{0,5}	0,004/f ^{0,5}	f/150
1,5-300 GHz	62	0,16	10

f: fréquence en MHz.

Tableau 24: Exposition maximale permise pour les environnements contrôlés (milieux de travail) par l'IEEE pour la gamme des radiofréquences

FRÉQUENCES	CHAMPS NON PERTURBÉS (rms)		DENSITÉ DE PUISSANCE (W/m ²)
	ÉLECTRIQUE (V/m)	MAGNÉTIQUE (A/m)	
100-3 000 kHz	614	16,3/f	—
3-30 MHz	1842/f	16,3/f	—
30-100 MHz	61,4	16,3/f	—
100-300 MHz	61,4	0,163	10
300-3 000 MHz			f/30
3-15 GHz			100
15-300 GHz			100

f: fréquence en MHz.

Les limites d'exposition présentées concernent les valeurs moyennes de champs ou de densité de puissance sur 6 minutes à l'exception des fréquences supérieures à 15 GHz où la durée considérée décroît progressivement pour atteindre 10 secondes à 300 GHz. Ces valeurs sont jugées acceptables si les conditions suivantes sont respectées:

- le courant induit (moyenne par seconde) chez une personne debout ne doit pas dépasser 100 mA dans chaque pied dans la bande de fréquences se situant entre 100 kHz et 100 MHz;
- il s'agit d'une exposition moyenne sur tout le corps;
- l'effet additif de différentes fréquences doit être considéré (selon la même démarche que l'IRPA);
- ces fréquences doivent être modifiées pour les expositions pulsées en tenant compte du temps d'exposition et de la largeur de pouls.

Les valeurs maximales d'exposition aux champs et à la densité de puissance peuvent être dépassées si le DAS (calculé sur 6 minutes) ne dépasse pas

0,4 W/kg comme moyenne d'exposition sur tout le corps et 8 W/kg par gramme de tissu excepté pour les extrémités où 20 W/kg calculé sur 10 g de tissu est toléré.

Pour le cas des environnements non contrôlés, qui visent principalement la population en général, d'autres recommandations sont proposées (voir tableau 25).

Les mêmes conditions relatives à l'exposition occupationnelle sont ajoutées excepté que la période d'échantillonnage pour la mesure du champ électrique peut être plus élevée pour le champ électrique: 30 minutes de 3 MHz à 3 GHz, et le courant induit dans chaque pied qui ne doit pas être supérieur à 45 mA pour les fréquences se situant entre 0,1 et 100 MHz.

Les limites de champs peuvent être dépassées si le DAS pour tout le corps n'excède pas 0,08 W/kg et 1,6 W/kg localement, calculé par gramme de tissu, excepté pour les extrémités où 4 W/kg par 10 g de tissu est considéré comme la valeur maximale.

Tableau 25: Exposition maximale recommandée pour les environnements non contrôlés par l'IEEE pour la gamme des radiofréquences

FRÉQUENCES	CHAMPS NON PERTURBÉS (rms)		DENSITÉ DE PUISSANCE (W/m ²)
	ÉLECTRIQUE (V/m)	MAGNÉTIQUE (A/m)	
100-1 340 kHz	614	16,3/f	—
1,34-3 MHz	823,8/f	16,3/f	—
3-30 MHz	823,8/f	16,3/f	—
30-100 MHz	27,5	158,3/f 1,668	—
100-300 MHz	27,5	0,0729	2
300-3 000 MHz			f/150
3-15 GHz			f/150
15-300 GHz			100

f : fréquence en MHz.

4.2.3.2 American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)

Dans son dernier recueil des TLV (ACGIH, 1994), l'ACGIH a modifié ses anciennes recommandations pour présenter des limites d'exposition identiques à celles de l'IEEE (IEEE, 1992) exposées précédemment (voir 4.2.3.1).

4.2.4 Recommandations en Europe

Des limites d'exposition aux radiofréquences ont été proposées dans plusieurs pays européens dont l'Allemagne et le Royaume-Uni (Repacholi, 1990). Ces valeurs sont toutes basées sur le même principe que les recommandations précédentes, c'est-à-dire la prévention de l'effet thermique. Le Royaume-Uni comme l'OMS, l'IRPA et l'IEEE préconisent en milieu de travail un DAS maximal pour tout le corps de 0,4 W/kg. Par contre, l'Allemagne présente des valeurs de champs et de densité de puissance plus élevées, basées sur un DAS maximum de 1 W/kg (Repacholi, 1990).

Puis, dernièrement, la Commission des communautés européennes (CCE, 1992) a proposé des recommandations d'exposition pour la gamme de fréquences de 30 à 300 MHz, correspondant à la plage où l'énergie absorbée est au maximum. La recommandation proposée est similaire à celles de l'IEEE et de l'IRPA.

4.3 Base des recommandations

Toutes les limites d'exposition aux radiofréquences proposées par les organismes nationaux ou internationaux sont fondées principalement sur la prise en compte des effets thermiques engendrés par le transfert de l'énergie photonique des ondes de radiofréquences en énergie thermique au corps humain.

Cette propriété des radiofréquences a été mise en évidence dès la fin du 19^e siècle par d'Arsonval et a été utilisée par la suite dans différents procédés dont l'utilisation thérapeutique sous forme de diathermie (Cleary, 1990a).

Cependant, ce n'est que beaucoup plus récemment, dans les années 1960-1970, que l'on a mis en évidence certains facteurs déterminants pour la

quantité d'énergie absorbée: la taille, la forme, l'orientation, les propriétés diélectriques des objets ou des corps exposés. La connaissance de ces différents facteurs était indispensable pour extrapoler à l'humain les données recueillies dans les expériences animales et proposer des limites d'exposition spécifiques à chaque longueur d'onde. Des études de dosimétrie effectuées chez l'humain ont ainsi permis de proposer une mesure permettant de tenir compte de l'absorption spécifique à chaque longueur d'onde: le débit d'absorption spécifique (DAS) (Gandhi, 1990). En regard des interactions biologiques thermiques, le débit d'énergie absorbée peut être considéré comme une mesure de la dose d'énergie thermique transmise au corps ou à l'objet exposé. Même si le DAS est difficilement mesurable chez l'humain, il peut être estimé par modélisation et on peut aussi déduire les valeurs de densité de puissance ou de champs correspondants au DAS que l'on s'est fixé. Ainsi, les limites d'exposition de densité de puissance ou de champs les plus faibles recommandées pour les radiofréquences se situent dans la gamme de fréquences où l'organisme est le plus sensible (de 30 à 300 MHz), appelée zone de résonance.

L'estimation du niveau de DAS le plus bas pouvant produire un effet chez l'humain ou l'animal [(*LOAEL*) *low-observed adverse effect level*] a fait l'objet d'intenses recherches. Les principaux organismes ayant présenté des limites d'exposition pour la gamme des radiofréquences ont estimé que le *LOAEL* pour le DAS était de 4 W/kg. Cette conclusion a été tout d'abord présentée par l'ANSI en 1982 (ANSI, 1982) et a été reconfirmée récemment par l'IRPA (1991) et l'IEEE (1992). L'IEEE a réaffirmé le critère de 4 W/kg sur la base des éléments suivants:

- le seuil de perturbation du comportement des primates non humains est toujours supérieur à un DAS du corps entier de 3,2 à 4 W/kg;
- la production de chaleur dans le corps humain résultant d'une exposition du corps entier de 4 W/kg est comparable à celle résultant d'une activité physique modérée (comme le nettoyage d'une maison ou la conduite d'un camion). Elle s'intègre dans les mécanismes normaux de thermorégulation.

L'IEEE (1992) comme l'IRPA (1991) appliquent au critère de 4 W/kg un facteur de 10 afin de définir le DAS du corps entier maximal à ne pas dépasser (0,4 W/kg). Ce facteur de 10 est utilisé afin de tenir compte des effets possibles résultant d'une exposition chronique (IRPA, 1991). Cependant, l'IEEE (1992), qui a reconfirmé ce facteur de sécurité de 10, a mis en évidence que plusieurs hypothèses conservatrices sont déjà incluses dans la définition du 4 W/kg. Ainsi, en pratique, le facteur de sécurité par rapport au véritable *LOAEL* serait, le plus souvent, beaucoup plus important que 10. Les arguments présentés par l'IEEE sont les suivants:

- l'effet choisi pour la définition du *LOAEL* (atteinte comportementale) est un effet considéré comme non dangereux (*not a defined hazard*), car réversible et limité. Il a été estimé cependant que des expositions chroniques à ce niveau pourraient entraîner un risque pour la santé;
- l'extrapolation de l'animal à l'homme est très conservatrice, car la thermorégulation de l'humain est généralement très supérieure à celle de l'animal;
- la sélection dans les estimations de dose d'un champ polarisé est le pire scénario compte tenu que le DAS est toujours plus faible pour les autres polarisations;
- les valeurs de DAS proposées tiennent compte de toutes les tailles possibles de l'humain, incluant les enfants.

De plus, l'IEEE (1992) mentionne que la chaleur transmise par le DAS de 0,4 W/kg est similaire à celle résultant d'une exposition au soleil ou à des variations habituelles de la température ambiante.

Les valeurs maximales de DAS préconisées pour les expositions limitées à une partie du corps sont moins bien justifiées. Les études de dosimétrie effectuées après la présentation des recommandations précédentes de l'ANSI (1982) ont démontré que l'induction de chaleur générée dans certaines parties du corps pouvait être très élevée même en respectant le DAS du corps entier de 0,4 W/kg. Les valeurs proposées, soit 20 W/kg pour les extrémités et de 8 à 10 W/kg pour les autres

parties du corps permettent d'éviter une augmentation de la chaleur locale qui entraînerait des effets néfastes localement. Le choix de la durée pendant laquelle la moyenne de l'exposition est calculée, est basé sur le temps requis pour provoquer un réchauffement des tissus (IEEE, 1995).

Les niveaux de courant électrique induit lors de l'exposition directe ou indirecte (de contact) aux champs vise la prévention des brûlures et de chocs (pour le courant de contact) dans certaines parties sensibles de l'organisme humain (IEEE, 1992). En particulier, la limite de courant induit total de 200 mA a pour but d'éviter un réchauffement excessif dans les poignets ou les chevilles (IRPA, 1991).

4.4 Limites des recommandations

Malgré toutes les explications données par les organismes ayant proposé des recommandations d'exposition maximale pour la gamme des radiofréquences, certains points méritent d'être soulignés en vue de comprendre les limites des recommandations actuelles.

4.4.1 Estimation de la dose reçue

Les limites d'exposition proposées sont basées sur l'estimation de la dose d'énergie reçue par l'organisme humain qui est représentée par le DAS. Cependant, certaines limites importantes dans l'estimation des DAS proposés peuvent être notées :

- la plupart des études ayant évalué les effets des radiofréquences ont été effectuées chez les animaux et l'extrapolation du DAS interspèces est très complexe (Cleary, 1990a);
- la plupart des études expérimentales ont été effectuées en utilisant un nombre limité de fréquences (principalement entre 900 MHz et 10 GHz). L'extrapolation interféquences bien que théoriquement faisable n'est pas sans problèmes (Cleary, 1990a);

- l'absorption d'énergie n'étant pas uniforme dans le corps humain, et étant déterminée par de multiples facteurs incluant la source d'exposition, il est difficile d'estimer la quantité d'énergie transmise à certaines zones de l'organisme humain. Des points dont l'absorption d'énergie est supérieure à d'autres points peuvent être présents même si les niveaux moyens d'exposition restent dans les limites acceptables;

- les expositions utilisées en laboratoire sont habituellement des expositions assez homogènes et généralement continues. Les expositions à multifréquence, les expositions avec champs pulsés ou modulés ont été peu étudiées.

Le concept de DAS fut un progrès majeur pour évaluer une dose d'énergie thermique. Il n'est cependant valide qu'en autant que l'interaction principale entre les champs électromagnétiques et le corps humain soit liée aux effets thermiques. Or, plusieurs études réalisées en laboratoire démontrent que les champs de la gamme des radiofréquences produisent des effets à des intensités ne pouvant produire aucun effet thermique (Cleary, 1990a, 1990b).

L'IRPA (1991) et l'IEEE (1992) reconnaissent que les radiofréquences peuvent produire des effets non thermiques, mais qu'il n'est pas possible actuellement d'utiliser les données disponibles sur ce sujet pour proposer d'autres limites d'exposition. Les deux organismes sont cependant conscients que les recherches effectuées sur ce sujet pourront amener des éléments pouvant modifier leur position.

4.4.2 Détermination du LOAEL

Tous les organismes ayant proposé des limites d'exposition font consensus sur l'estimation du LOAEL de 4 W/kg. Cependant, plusieurs auteurs ont fait état de divers effets pouvant être observés avec des niveaux de DAS inférieurs à 4 W/kg (Cleary, 1990a). Le tableau 26 résume les résultats des études effectuées chez l'animal avec différents niveaux de DAS. Ces résultats confirment que certains effets biologiques peuvent apparaître à partir de 1 W/kg (Stuchly, 1987).

L'IRPA et l'IEEE ont réaffirmé que le niveau de 4 W/kg pouvait être considéré comme le *LOAEL* chez l'humain basé sur l'effet transitoire et limité sur le comportement. Leur position est fondée sur une analyse poussée de la littérature qui s'est concentrée sur les études répondant à des critères très stricts de qualité. En particulier, les études prises en compte devaient fournir de nombreux détails pour l'estimation du DAS et leurs résultats devaient avoir été reproduits dans différents laboratoires.

4.4.3 Effets résultant d'une exposition chronique

Le *LOAEL* retenu a été établi sur la base d'effets biologiques résultant de l'absorption d'énergie (effets thermiques) sur de courtes durées (inférieures à 1 h dans de nombreuses études *in vitro*). L'IEEE (1992) et l'IRPA (1991) reconnaissent l'absence de données quant aux effets résultant d'une exposition chronique. Ils affirment cependant que le facteur de sécurité appliqué devrait permettre de prévenir tout effet résultant d'une exposition chronique. Cette affirmation doit être nuancée compte tenu du manque de connaissance quant aux

mécanismes des effets résultant d'une exposition chronique. Ainsi, bien que cela demande d'être reconfirmé, une étude a démontré un effet de promotion des tumeurs de la peau induites chimiquement chez des souris exposées 2 h par jour à des champs de 2,45 GHz avec un DAS de 4 à 5 W/kg (Szmigielski, 1988, cité par WHO, 1993 et NRPB, 1991).

Compte tenu de l'importance de ce risque qui justifie que de grands programmes de recherche sur le sujet soient mis en oeuvre, il semble que la prudence pourrait justifier l'utilisation de facteurs de sécurité supplémentaires. Cet aspect est implicitement reconnu par l'IRPA (1991) qui affirme que, compte tenu des données limitées sur les seuils d'exposition sécuritaires pour tous les effets biologiques, les expositions non nécessaires devraient être réduites au minimum (traduction libre, IRPA, 1991, p.76).

4.5 RÉSUMÉ

L'effet thermique des radiofréquences est connu depuis longtemps et largement utilisé en médecine et dans divers procédés industriels. L'utilisation des débits d'absorption spécifique (DAS) représente un

Tableau 26: Effets biologiques observés au niveau des divers systèmes organiques en fonction du niveau de DAS

SYSTÈME ORGANIQUE	ÉTENDUE DU DAS (W/Kg)	DAS MOYEN (W/Kg)
Comportement	0,4-7	2,5
Système nerveux central	0,0001-12,5	1,8
Hématologie/immunité	0,4-11,8	4,3
Hormones	1,0-5,0	4,8
Potentialisation médicamenteuse	0,2-1,0	0,6
Mutations/aberrations chromosomiques	0,05-5,0	2,5
Neurotransmetteurs	6,0	6,0
Fertilité	5,6	5,6
Biochimie	1,6-4,0	2,8
Système cardiovasculaire	3,0-8,0	5,8

Réf.: (Cleary, 1990a), adapté de Elder J.A., Catill D.F., *Biological Effects of Radiofrequency Radiation*, Report No. EPA-6018-83-026F, 1984.

progrès pour estimer une dose d'énergie thermique de façon standardisée. Un large consensus parmi les organismes proposant des recommandations s'est établi pour estimer que le plus bas niveau de DAS ayant un effet chez l'humain est de 4 W/kg. Ce critère est basé sur l'observation de troubles transitoires du comportement chez des primates et l'absence d'élévation anormale de la température. Les recommandations d'exposition maximale proposées sous forme de densité de puissance ont été établies en considérant un transfert d'énergie équivalant à un DAS du corps entier de 0,4 W/kg. Ces expositions sont supposées ne pas entraîner de risque d'atteinte à la santé, même après une exposition chronique.

De nombreuses incertitudes constatées dans l'établissement de ces recommandations incitent à la vigilance dans l'interprétation des niveaux considérés actuellement comme acceptables. En effet,

seul l'effet thermique, résultant d'une exposition aiguë (< 1 h), est pris en compte lors de l'établissement de ces recommandations. D'autres effets semblent possibles par des mécanismes d'action d'origine non thermiques. Plusieurs auteurs invitent ainsi à la prudence en minimisant les expositions inutiles. De plus, de nombreux programmes de recherche sont actuellement en cours afin d'étudier les différents mécanismes possibles d'interaction des radiofréquences avec le corps humain.

L'énergie absorbée par l'humain (dose interne) pour un même niveau de densité de puissance (dose externe) varie selon la longueur d'onde. L'énergie absorbée est au maximum dans la gamme des 30 à 300 MHz. Le tableau 27 résume les différentes recommandations pour cette gamme de très hautes fréquences.

Tableau 27: Limites d'exposition pour les travailleurs concernant les très hautes fréquences (THF), 30 – 300 MHz selon divers organismes

ORGANISME	CHAMPS NON PERTURBÉS (rms)		DENSITÉ DE PUISSANCE (W/m ²)
	ÉLECTRIQUE (V/m)	MAGNÉTIQUE (A/m)	
IRPA	61	0,16	10
Santé Canada	60	0,163	10
IEEE	61,4	0,163*	10
ACGIH	61,4	0,163*	10

* Limité pour la gamme de 100 à 300 MHz.

RÉFÉRENCES

ACGIH (1994-1995). Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1994.

ANSI (1982). American National Standards Institute. American National Standard C95.1, Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields, 300 kHz to 100 GHz. New York, Institute of Electrical and Electronic Engineers Inc.

Bernhardt J.H. Non-Ionizing Radiation Safety: Radiofrequency Radiation, Electric and Magnetic Fields. Phys. Med. Biol., vol. 37, n° 4, pp. 807-844, 1992.

Bernhardt J.H. Bioeffects of Radiofrequency Fields. Non-Ionizing Radiation, Proceedings, 2nd International Workshop, édité par Wayne Greene, Vancouver, 1992.

Cleary S.F. (1990a). Biological Effects of Radio-Frequency Electromagnetic Fields. Biological Effects and Medical Applications of Electromagnetic Energy, édité par O.M.P. Gandhi, Prentice Hall, New Jersey, 1990, 10: 255.

Cleary S.F. (1990b). Cellular Effects of Radiofrequency Electromagnetic Fields. Biological Effects and Medical Applications of Electromagnetic Energy, O.M.P. Gandhi, Ed., Prentice Hall, 1990, chap. 4, pp. 340-356.

Cleveland Jr., R.F. Radiofrequency Radiation in the Environment: Sources, Exposures Standards and Related Issues. Biological Effects of Electric and Magnetic Fields, Sources and Mechanisms, Carpenter D.O., Ayrapetyans S. Ed., Academic Press, 1994, chap. 2, 53-81.

Commission des communautés européennes (CCE). Proposition de directives du conseil concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques. COM (1992) 560 Final - SYN 449, Bruxelles, 1992.

Elder J.A., Czerski P.A., Stuchly M.A., Mild K.H., Sheppard A.R. Les radiofréquences. La protection contre les rayonnements non ionisants, chap. 4. Suess, M.J., Benwell-Morison, D.A, Ed., WHO, Série européenne, n° 25, Copenhague, 1991.

Gandhi O.M.P. ANSI Radiofrequency Safety Guide: its Rationale, some Problems, and Suggested Improvement. Biological Effects and Medical Applications of Electromagnetic Energy. Gandhi O.M.P. Ed., Prentice Hall, 1990, 3: 29-46.

Health and Welfare Canada (HWC). Limits of Exposure to Radiofrequency at Frequency from 10 kHz to 300 GHz. Security Code 6, DHM-RT-160, 1991.

IEEE (1992). IEEE Standard for Safety Levels with respect to Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. IEEE C95.1-1991, 27 avril 1992.

IRPA. Guidelines on Limits of Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 100 kHz to 300 GHz. IRPA Guidelines on Protection Against Non-Ionizing Radiation. Duchêne A.S., Lakey J.R.A., Repacholi M.H. Ed., Pergamon Press, 1991, chap. 5, pp. 72-82.

Lin J.C. ANSI/IEEE Exposure Standards for Radiofrequency Fields. Radiofrequency Standards, Klavenberg B.J. et al., Plenum Press, New York, 1994, pp. 31-33.

Repacholi M.H. Radiofrequency Field Exposure Standards: Current Limits and Relevant Bioeffects. Biological Effects and Medical Applications of Electromagnetic Energy. O.M.P. Gandhi, Ed., Prentice Hall 1990, 2: pp. 10-27.

Saunders R.D., Kowalczyk C.I., Sienkiewicz Z.J. Biological Effects of Exposure to Non-Ionising Electromagnetic Fields and Radiation: III. Radiofrequency and Microwave Radiation. National Radiological Protection Board, NRPB-240, 1991.

Stuchly M.A. Proposed Revision of the Canadian Recommendations on Radiofrequency-Exposure Protection. Health Physics, 1987, 53: pp. 649-665.

Szmigielski S., Szydrinski A., Pietraszek A. et Bielec M. Acceleration of Cancer Development Mice by Long-Term Exposition to 2450-MHz Microwave Fields. Berteaud A.J. et Servantie B. Ed. URSI International Symposium Proceedings, Ondes électromagnétiques et biologie, Paris, pp. 165-169, 1980.

Szmigielski S., Szydrinski A., Pietraszedk A., Bielec M., Janiak M. et Wreinbel J.K. Accelerated Development of Spontaneous and Benzo-Pyrene-Induced Skin Cancer in Mice Exposed to 2450-MHz Microwave Radiation. Bioelectromagnetics, 3: pp. 179-191, 1982.

WHO. Electromagnetic Fields (300 Hz to 300 GHz). Environmental Health Criteria 137, Genève, 1993.

Chapitre 5

Le rayonnement ultraviolet

Table des matières

	page
5. LE RAYONNEMENT ULTRAVIOLET	5.5
5.1 Description des paramètres	5.5
5.2 Description des normes et recommandations actuelles	5.5
5.2.1 Recommandations internationales	5.5
5.2.1.1 Association internationale de radioprotection (IRPA)	5.5
5.2.1.2 Organisation mondiale de la santé (OMS)	5.7
5.2.2 Recommandations au Canada	5.8
5.2.3 Recommandations aux États-Unis	5.8
5.2.3.1 American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)	5.8
5.3 Base des recommandations	5.8
5.4 Limites des recommandations	5.9
5.5 Résumé	5.10
RÉFÉRENCES	5.11
CONCLUSION	5.13
ABRÉVIATIONS	5.19
LEXIQUE	5.21

5. LE RAYONNEMENT ULTRAVIOLET

L'IRSST a récemment préparé un document traitant de la mesure et de l'exposition au rayonnement ultraviolet (Laliberté, IRSST, 1994). Ce document couvre l'ensemble des informations pertinentes relatives à la nature des radiations aux ultraviolets, ses effets biologiques ainsi que les limites d'exposition proposées. Nous référons donc le lecteur à ce document pour une information plus détaillée sur le sujet. Nous reprenons ici l'essentiel de l'information relative aux critères établis et complétons avec une évaluation des bases de ces recommandations.

5.1 Description des paramètres

Les rayonnements ultraviolets (UV) font partie des rayonnements non ionisants, mais présente certaines particularités puisque l'énergie véhiculée par ce type de rayonnement est importante. Les rayons UV se situent dans le spectre électromagnétique, entre les rayons X mous et les rayonnements visibles. Les longueurs d'onde des UV varient entre 100 à 400 nanomètres (nm). L'énergie photonique correspondant à la longueur d'ondes de 100 nm est d'environ 12,4 électrons-volts (eV). C'est à partir de cette énergie qu'une ionisation importante apparaît dans des matériaux biologiquement exposés (Faber, 1991). On peut donc dire que les UV se situent à la frontière des rayonnements ionisants et non ionisants.

La gamme des UV se subdivise généralement en trois bandes :

- UV-A: 315-400 nm
- UV-B: 280-315 nm
- UV-C: 100-280 nm

Les UV-A produisent une fluorescence avec certaines substances. Ils sont parfois appelés lumière noire, UV longs ou UV proches. Les UV-B, appelés UV moyens ou rayons bronzants, couvrent une grande partie des UV solaires biologiquement actifs. Les UV-C sont émis par des lampes germicides et des arcs à souder. Les UV-C sont aussi émis

par la lumière du soleil, mais n'atteignent pas la surface de la Terre. Les UV-C sont également appelés UV courts ou lointains, ou encore rayons germicides (OMS, 1980; Faber, 1991).

Les UV de longueur d'onde inférieure à 180 nm sont peu actifs d'un point de vue biologique vu qu'ils sont absorbés par l'air (IRPA, 1991). Les effets les plus importants pour l'humain concernent généralement les UV ayant des longueurs d'onde inférieures, allant de 180 à 315 nm, communément appelées UV actiniques (IRPA, 1991).

En regard des effets biologiques, les principaux paramètres à considérer sont la composition spectrale de la source, l'éclairement énergétique (*irradiance*) mesuré en watt par mètre carré (W/m^2) et l'exposition énergétique (*radiant exposure*) mesurée en joule par mètre carré (J/m^2).

L'énergie photonique des UV ne pénètre pas le corps, mais se dépose en surface. Ainsi, les organes critiques pour l'exposition aux rayons UV sont les yeux et la peau et les limites proposées concernent l'exposition de ces deux organes. Pour le cas des ondes avec multiples fréquences (*broadband*), le calcul de l'éclairement énergétique efficace permet de pondérer l'effet de diverses longueurs d'onde en fonction du pic d'efficacité spectrale (270 nm).

5.2 Description des normes et recommandations actuelles

5.2.1 Recommandations internationales

5.2.1.1 Association internationale de radioprotection (IRPA)

L'Association internationale de radioprotection (IRPA) a émis des recommandations pour les travailleurs et le public sur l'exposition aux rayons ultraviolets de 180 à 400 nm. Les niveaux acceptables visent à protéger la population contre les effets d'une exposition aiguë aux UV sur la peau (érythème et brûlure) et les yeux (photokératoconjunctivite). Les recommandations devraient réduire également les effets résultant d'une

exposition chronique (IRPA, 1991). L'IRPA spécifie que les limites des recommandations proposées peuvent ne pas être suffisantes pour des personnes ayant une photosensibilité cutanée marquée (individu à la peau peu pigmentée) ou exposées à des agents photosensibilisants tels que certains cosmétiques, aliments, médicaments ou produits chimiques.

Pour l'oeil non protégé, l'IRPA recommande, dans le spectre des rayons UV-A (315-400 nm), que l'exposition n'excède pas 10 kJ/m² pour une période de 8 heures ou moins. Les recommandations d'exposition de la peau pour une durée totale de 8 heures, en fonction de la longueur d'onde, sont présentées au tableau 28. Des valeurs d'éclairement

Tableau 28: Recommandations de l'IRPA pour l'exposition au rayonnement UV en fonction des longueurs d'onde

LONGUEURS D'ONDE (nm)	LIMITES D'EXPOSITION (J/m ²)	LONGUEURS D'ONDE (nm)	LIMITES D'EXPOSITION (J/m ²)
180	2 500	310	2 000
190	1 600	313	5 000
200	1 000	315	1,0 × 10 ⁴
205	590	316	1,3 × 10 ⁴
210	400	317	1,5 × 10 ⁴
215	320	318	1,9 × 10 ⁴
220	250	319	2,5 × 10 ⁴
225	200	320	2,9 × 10 ⁴
230	160	322	4,5 × 10 ⁴
235	130	323	5,6 × 10 ⁴
240	100	325	6,0 × 10 ⁴
245	83	328	6,8 × 10 ⁴
250	70	330	7,3 × 10 ⁴
254	60	333	8,1 × 10 ⁴
255	58	335	8,8 × 10 ⁴
260	46	340	1,1 × 10 ⁵
265	37	345	1,3 × 10 ⁵
270	30	350	1,5 × 10 ⁵
275	31	355	1,9 × 10 ⁵
280	34	360	2,3 × 10 ⁵
285	39	365	2,7 × 10 ⁵
290	47	370	3,2 × 10 ⁵
295	56	375	3,9 × 10 ⁵
297	65	380	4,7 × 10 ⁵
300	100	385	5,7 × 10 ⁵
303	250	390	6,8 × 10 ⁵
305	500	395	8,3 × 10 ⁵
308	1 200	400	1,0 × 10 ⁶

SOURCE: IRPA, 1991

Tableau 29: Durée permise d'exposition aux UV en fonction de l'éclairement énergétique efficace

DURÉE D'EXPOSITION (par jour)	ÉCLAIREMENT ÉNERGÉTIQUE EFFICACE (W/m ²)
8 h	0,001
4 h	0,002
2 h	0,004
1 h	0,008
30 min	0,017
15 min	0,033
10 min	0,05
5 min	0,1
1 min	0,5
30 sec	1,0
10 sec	3,0
1 sec	30
0,5 sec	60
0,1 sec	300

SOURCE: IRPA, 1992

énergétique efficace normalisées pour une source monochromatique de 270 nm peuvent aussi être calculées à l'aide du coefficient d'efficacité spectrale relative donné pour chaque longueur d'onde.

La recommandation maximale d'exposition à 270 nm de longueur d'onde se situant à 30 J/m² pour 8 heures, des durées permises d'exposition en secondes peuvent également être calculées. Elles visent la prévention du risque pour la peau et les yeux non protégés. Elles sont obtenues en divisant la recommandation de 30 J/m² par la valeur de l'éclairement énergétique efficace en watt/m² (voir tableau 29).

L'IRPA précise que les connaissances sur les effets liés à une exposition chronique sont limitées et qu'il y a nécessité de réviser régulièrement ces recommandations. Notons que l'IRPA fait plusieurs recommandations pour favoriser la protection des travailleurs par l'utilisation d'appareils de protection personnelle.

5.2.1.2 Organisation mondiale de la santé (OMS)

L'OMS dans son document intitulé *Critère d'hygiène de l'environnement 14: Rayonnement ultraviolet* (1980) fait deux types de recommandations. La première concerne les UV d'origine solaire, la deuxième les UV artificiels pour le milieu de travail.

Les recommandations émises par l'OMS, pour l'exposition aux UV artificiels allant de 200 à 315 nm, ont en fait été reprises par l'IRPA. Il s'agit donc des mêmes recommandations que celles présentées à la section 5.2.1.1. Les recommandations proposées pour la gamme de 315 à 400 nm sont de 10 W/m² pour 1 000 secondes (environ 16 minutes) ou 10 kJ/m² pour des durées inférieures.

5.2.2 Recommandations au Canada

Il n'existe pas à notre connaissance de recommandation canadienne relativement à l'exposition aux UV.

5.2.3 Recommandations aux États-Unis

5.2.3.1 American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)

Les recommandations de l'ACGIH concernant les UV couvrent le spectre de 180 à 400 nm et représentent les conditions auxquelles les travailleurs peuvent être exposés de façon répétée sans effet néfaste. Celles-ci sont similaires à celles proposées par l'IRPA à l'exception des valeurs recommandées pour l'éclairage énergétique pour l'oeil. L'ACGIH recommande dans la bande des 320-400 nm une limite de 10 kJ/m² pour une exposition inférieure à 1 000 secondes (~16 minutes) et 10 W/m² pour des expositions plus longues. La recommandation de l'IRPA est plus restrictive (région spectacle de 315-400 nm) avec une même limite, soit 10 kJ/m², mais pour une durée d'exposition inférieure à 8 heures. L'ACGIH a étendu ces recommandations en 1991 au spectre situé entre 180 et 200 nm.

Seuls les effets aigus ont été pris en considération pour établir ces recommandations. L'ACGIH reconnaît que ces limites ne protègent pas les sujets photosensibles, les personnes aphakiques (sans cristallin), ou les personnes exposées à des agents photosensibilisants.

5.3 Base des recommandations

Les recommandations des différents organismes concernant les limites d'exposition aux rayons ultraviolets ont été établies pour les travailleurs. Toutefois, ils peuvent également, avec certaines précautions, s'appliquer à la population générale.

Pour les effets sur la peau, les limites acceptables d'exposition reposent sur la dose minimale capa-

ble d'induire un érythème (DME). Le seuil pour induire un érythème varie avec la longueur d'onde, l'exposition énergétique, le type de peau et la durée d'exposition. L'érythème est une réponse photochimique de la peau qui résulte d'une surexposition aux rayons ultraviolets, principalement pour des longueurs d'onde entre 180 et 315 nm (UV-C et UV-B). Les études ont démontré que l'intensité maximale de l'érythème cutané survient avec des longueurs entre 290 et 300 nm. La dose minimale pour induire un érythème sur une peau pâle et non bronzée varie entre 6 et 30 mJ/cm² (Everett et al., 1965; Freeman et al., 1966; Parrish et al., 1982). Ainsi, les limites d'exposition proposées ont pour ce type de peau un facteur de sécurité variant de 6,5 à 1,3 (IRPA, 1991). Ces facteurs sont moindres pour les individus photosensibles, mais augmentés par le bronzage. L'exposition aux rayons UV-A (315-400 nm) produit également un érythème, mais la dose d'irradiation nécessaire est beaucoup plus élevée (> 10 J/cm²). Il est à noter que les rayons UV-A combinés aux UV-B augmentent la réponse de la peau à l'érythème. Ce phénomène de synergie est appelé photo-augmentation.

En ce qui concerne les recommandations pour évaluer les effets au niveau de l'oeil, celles-ci sont basées sur la dose minimale pour induire une photokératite. Les rayons ultraviolets, surtout dans la région des UV-C et UV-B (220-310 nm), sont fortement absorbés par la cornée et la conjonctive de l'oeil. La sensibilité maximale de l'oeil à développer une photokératite survient avec des longueurs d'onde de 270 nm. La dose d'irradiation nécessaire pour produire un érythème au niveau de l'oeil se situe entre 4 et 14 mJ/cm² (Pitts et al., 1971). Les valeurs d'exposition maximale recommandées ont en fait un facteur de sécurité variant de 4,6 à 1,3 (IRPA, 1991). Ces recommandations ne s'appliquent pas aux individus qui ont subi une ablation du cristallin. On a également démontré de façon expérimentale, que des cataractes peuvent se produire chez le lapin et le singe par suite d'une exposition aux rayons ultraviolets (295-320 nm). Le seuil énergétique pour induire des opacités au cristallin se situait entre 0,15 et 12,6 J/cm² (Pitts et al., 1977). Les différents organismes qui émettent des recommandations sur l'exposition aux rayons ultraviolets s'accordent pour dire que les limites d'exposition pour l'oeil doivent être

considérées comme des valeurs maximales à ne pas dépasser (Sloney, 1972), alors que pour la peau, il s'agit plutôt de niveau d'action pour évaluer le risque (Després, 1978; Gezondheidsraad, 1978; Mayer et al., 1979; Sloney et al., 1980).

5.4 Limites des recommandations

Les recommandations formulées par les différents organismes visent principalement à protéger les travailleurs du risque de développer une photo-
kératite ou un érythème de la peau, ce qui revient à ne considérer que les effets résultant d'une exposition aiguë au rayonnement ultraviolet. Les niveaux acceptables d'exposition définis par ces mêmes organismes ne sont donc pas basés sur la prévention des effets résultant d'une exposition chronique aux UV tels que les cancers cutanés (épithéliomas et mélanomes), le photovieillissement de la peau et l'immunosuppression (Faber, 1991). Cela est d'autant plus vrai que le spectre d'action des rayons UV pour la cancérogénèse est assez analogue à celui de l'érythème (Faber, 1991).

Comme l'intensité de l'érythème de la peau est proportionnel à la dose d'UV reçue (IARC, 1992), il est donc possible d'évaluer les risques liés à une exposition chronique du point de vue des doses minimales pour induire un érythème (DME) (Faber, 1991). La DME est définie comme la plus faible intensité de rayonnement capable de pro-

duire un érythème cutané 24 heures après l'exposition (IARC, 1992). Le tableau 30 présente, pour un ensemble d'activités, la dose annuelle reçue en rayonnement ultraviolet exprimée en DME.

L'exposition cumulative aux UV sur toute une vie est un facteur de risque bien documenté qui est associé aux cancers de la peau, en particulier les épithéliomas (basocellulaires et spinocellulaires) (IARC, 1992). La dose cumulative reçue en UV est la somme de toutes les expositions qui incluent le travail, les activités de loisirs, les vacances et la pratique du bronzage artificiel. Il est clair que des recommandations basées presque exclusivement sur l'exposition aux sources artificielles d'UV en milieu de travail ne peuvent assurer la protection de la santé des travailleurs en regard des effets à long terme résultant de l'exposition aux UV d'origine solaire ou d'autres sources d'émission. Le travail en plein air illustre bien les limites des normes de l'ACGIH, de l'IRPA et de l'OMS. Une personne qui travaille à l'extérieur reçoit en moyenne trois fois plus de rayons UV-B par année qu'un travailleur dans les édifices à bureau (Diffey, 1987). De plus, l'intensité du rayonnement (éclairage énergétique en W/m^2) émis par le soleil pour les longueurs d'onde situées entre 300 et 325 nm augmente rapidement et dépasse les limites d'exposition définies par l'ACGIH pour une période de 8 heures. En conséquence, il est important de tenir compte de ce rayonnement naturel dans l'interprétation des limites d'exposition aux UV artificiels.

Tableau 30: Dose annuelle d'exposition aux UV d'origine solaire et artificielle exprimée en DME

TYPE D'ACTIVITÉ	DME
Exposition reliée aux loisirs (excluant les vacances)	20-100
Vacances à l'extérieur (2 semaines)	30-60
Travailleurs dans les édifices à bureaux	40-160
Travailleurs de plein air	250
Sources artificielles d'UV en milieu de travail selon la recommandation de l'ACGIH (8 heures):	
– 270 nm ($30 J/m^2$)	36
– 365 nm ($2,7 \times 10^5 d/m^2$)	324
Lit de bronzage (2 DME/session)	30-300

Lorsque les recommandations de l'ACGIH, de l'IRPA ou de l'OMS sont converties en dose minimale pour induire un érythème (DME) et réévaluées sur une base annuelle, on constate que les limites d'exposition ne semblent pas très strictes pour les longueurs d'onde supérieures à 315 nm qui correspondent à la région spectrale des rayons UV-A (Magnus, 1976; Parrish, 1982). Les connaissances des effets biologiques des hautes doses de UV-A sur la peau et l'oeil sont limitées. Cependant, on reconnaît de plus en plus d'effets spécifiques aux UV-A qui comprennent le photovieillissement de la peau (JAMA, 1989), la potentialisation des effets cancérogènes des rayons UV-B sur la peau (Passchier et al. 1987) ainsi que l'affaiblissement du système immunitaire (Rivers et al., 1989; McKenzie et al. 1994).

En plus de ne pas considérer les effets possibles résultant d'une exposition à long terme, on doit aussi rappeler que les recommandations proposées par l'IRPA, l'OMS et l'ACGIH ne s'appliquent ni à des personnes photosensibles naturellement ou par suite d'une exposition personnelle à un photosensibilisant, ni à des personnes sans cristallin.

5.5 Résumé

Les différents organismes ayant proposé des recommandations d'exposition pour le spectre des UV concordent pour tenir compte de l'exposition aiguë et de ses effets délétères sur la peau (érythème) et les yeux (photokératite). Les effets résultant d'une exposition chronique (cancer, photovieillissement, immunosuppression), bien que reconnus, ne peuvent être pris en considération actuellement à cause d'un manque de données sur une relation possible entre la dose et les effets. La prise en compte des effets sur l'oeil et la peau permet de considérer la dose d'énergie reçue par ces organes selon le type de longueur d'onde. Les recommandations proposées visent la prévention de ces effets aigus, mais elles n'apparaissent pas sécuritaires pour les personnes photosensibles et les personnes n'ayant pas de cristallin. La prévention des effets résultant d'une exposition chronique devrait tenir compte des multiples expositions aux UV dont l'exposition au soleil. Il est probable que de futures recommandations devront englober les risques associés à l'exposition chronique.

RÉFÉRENCES

- ACGIH. Documentation on the TLV, 1992, pp. 55-64.
- ACGIH. 1994-1995 Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. ACGIH, Cincinnati OH, 119 p.
- Anonymous. Harmful Effects of Ultraviolet Radiation. JAMA, 1989, 262(3):380-384.
- Carrière P.É. Rayonnements non ionisants. Hygiène du travail, Les Éditions Le Griffon d'argile inc., Sainte-Foy, Québec, chap. 8, 1985, pp. 307-366.
- Després S. Effets biologiques des infrarouges et des ultraviolets. Radioprotection 1978, 13(1): pp. 11-21.
- Diffey B.L. Analysis of the Risk of Skin Cancer from Sunlight and Solaria in Subjects Living in Northern Europe. Photodermatology, 1987, vol. 4, pp. 118-126.
- Everett M.A., Olsen R.L., Sayer R.M. Ultraviolet Erythema. Arch Dermatol, 1965, vol. 92, pp. 713-729.
- Faber M. Les ultraviolets. La protection contre les rayonnements non ionisants. 2^e éd. Organisation mondiale de la santé, Publications régionales, Série européenne n° 25, 1991, chap. 1, pp. 17-58.
- Freeman R.G., Owens D.N., Knox J.M., Hudson H.T. Relative Energy Requirements for an Erythematous Response of Skin to Monochromatic Wavelengths of Ultraviolet Present in the Solar Spectrum. J Invest Dermatol, 1966, vol. 47, pp. 586-592.
- Gezondheidsraad (Health Council of the Netherlands). Recommendations Concerning Acceptable Levels of Electromagnetic Radiation in the Wave Length Range from 100 nm to 1 mm (Micrometre Radiation). Ministry of Health and Environmental Protection, Postbox 439-2260 AK Leidschendam, The Netherlands, Report 65E; mars 1978.
- IARC. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Solar and Ultraviolet Radiation (volume 55). IARC, Lyon, France, 1992, 47:73-86.
- IRPA. Guidelines on Limits of Exposure to UV Radiation of Wavelength Between 180 and 400 nm Incoherent Optical Radiation. IRPA Guidelines on Protection Against Non-Ionizing Radiation. Duchène, Lakey, Repacholi, 1991, 3. pp. 42-52.
- Jacob, H. Vocabulaire des matières dangereuses utilisées au travail. Bulletin de terminologie 215. Bureau de la traduction. Direction de la terminologie et des services linguistiques, 1995, 1 039 p.
- Magnus L.A. Dermatological Photobiology. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1976.
- Mayer M.A., Salsi M.S. Rayonnement ultraviolet, visible et infrarouge: mesure et évaluation des risques. Institut national de recherche et de sécurité. Paris, France, n° 1199-96-79, n° 96, 1979.
- McKenzie R.C., Sauder D.N. Ultraviolet radiation: Effects on the Immune System. Annales CRMCC 1994, 27(7): 20-26.
- WHO. Rayonnement ultraviolet. Critère d'hygiène de l'environnement 14, Organisation mondiale de la santé, Genève, 1980, 118 p.
- Parrish J.A., Jaenick K.F., Anderson R.R. Erythema and Melanogenesis Action Spectra of Normal Human skin. Photochemistry and Photobiology 1982, 36: 187-191.
- Passchier N.F., Bosnjakovic B.F.M. Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations. Amsterdam, The Netherlands: Exerpta Medica International Congress Series, 1987, p. 744.
- Pitts D.G., Collen A.P., Hacker P.D. Ocular Ultraviolet Effects from 295 nm to 400 nm in the Rabbit Eye. National Institute for Occupational Safety and Health. Cincinnati, OH, Dhew (NIOSH) 1977, Publication n° 77-175.

Pitts D.G., Tredici T.J. The effects of Ultraviolet on the eye. American Industrial Hygiene Association Journal 1971, vol. 32, n° 4, pp. 235-246.

Rhains M. Rayonnement UV et les cancers cutanés: éléments de réflexion sur la situation au Québec. Centre de santé publique de Québec, CHUL, mai 1995.

Rivers J.K., Norris P.G., Murphy G.M., Chu A.C., Midgley G., Morris, J. et al. UVA Sunbeds: Tanning, Photoprotection, Acute Adverse Effects and Immunological Changes. British Journal of Dermatology, 1989, vol. 120, pp. 767-777.

Sliney D.H., Wolbarsht M.L. Safety with Lasers and Other Optical Sources. A Comprehensive Handbook, New York, Plenum Press J, 1980.

Sliney D.H. The Merits of an Envelope Action Spectrum for Ultraviolet Exposure Criteria. American Industrial Hygiene Association Journal, 1972, vol. 33, pp. 644-653.

Sliney D.H. Ultraviolet Studies. Non-Ionizing radiation, W. Green Ed. IRPA 1992, pp. 268-288.

Conclusion

CONCLUSION

Le domaine des radiations non ionisantes est très vaste. En dépit des contraintes imposées pour la réalisation de ce document, nous pensons avoir rempli notre mandat qui était de faire un bilan des normes et recommandations en regard des champs électromagnétiques pour les fréquences allant de 0 à 300 GHz ainsi que pour les rayons UV.

Force est de constater que, malgré les quantités d'énergie très différentes véhiculées par les CEM selon les diverses longueurs d'onde, plusieurs éléments communs à tous ces rayonnements ont été mis en évidence :

- la quasi-totalité des recommandations d'exposition proposées sont basées sur la connaissance des effets résultant d'une exposition de courte durée;
- l'absence de prise en compte de données sur les effets résultant d'une exposition chronique est liée au manque de connaissances en regard des mécanismes en cause dans de tels effets;
- les facteurs de sécurité appliqués aux niveaux d'exposition sans effet, observés lors d'expositions de courte durée, semblent faire consensus parmi les organisations officielles proposant des recommandations d'exposition;
- la protection apportée par ces facteurs de sécurité en regard des effets possibles d'une exposition chronique est incertaine;
- plusieurs auteurs et certains organismes ou associations mettent en évidence les incertitudes liées aux connaissances actuelles et recommandent une certaine prudence afin de limiter les expositions chroniques;
- tous les organismes qui proposent des recommandations sont conscients de la nécessité d'être vigilants afin de suivre la littérature scientifique dans le but d'adapter les recommandations actuelles en fonction de nouvelles connaissances.

Malgré toute la minutie que nous avons apportée pour effectuer ce travail, nous sommes conscients que le produit final reste un document général qui introduit le lecteur à un domaine complexe en le démystifiant et le vulgarisant. De nombreux pans de la littérature auraient pu être beaucoup plus détaillés. En fait, chaque gamme de fréquences aurait pu faire l'objet d'un rapport séparé. La littérature épidémiologique aurait pu être approfondie, de même que les études et directives concernant des individus particulièrement sensibles aux effets de ces champs.

Outre ces limites, nous espérons que ce rapport aura permis au lecteur de s'initier au domaine des radiations non ionisantes et particulièrement aux recommandations d'exposition qui s'y appliquent. Nous espérons aussi qu'il lui permettra de porter un jugement sur la valeur de ces recommandations et qu'il l'incitera à suivre régulièrement l'évaluation des connaissances dans ce domaine.

Annexes

Abréviations

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists	LOAEL	Low Observed Adverse Effect Level
AIHA	American Industrial Hygiene Association	MF	Moyennes fréquences
ANSI	American National Standards Institute	MO	Micro-ondes
ARN	Acide ribonucléique	MPT	Moyenne pondérée par le temps
CCE	Commission des communautés européennes	NHMRC	National Health and Medical Research Council
CENELEC	Comité européen de normalisation électrotechnique	NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
DME	Dose minimale capable d'induire un érythème	NOAEL	No-Observed Adverse Effect Level
DOE	U.S. Department of Energy	NRPB	National Radiological Protection Board
EHF	Extrêmement hautes fréquences	OMS	Organisation mondiale de la santé
EMF/HSD	EMF Health and Safety Digest	SHF	Super hautes fréquences
FEB	Fréquences extrêmement basses	THF	Très hautes fréquences
FTB	Fréquences très basses	TLV	Threshold limit value
FV	Fréquences vocales	TWA	Time-weighted average
HF	Hautes fréquences	UHF	Ultra hautes fréquences
HWC	Health Welfare Canada	US-NESC	U.S. National Electrical Safety Code
IARC	International Agency for Research on Cancer	VLE	Valeurs limites d'exposition
ICNIRP	International Commission on Non-ionizing Radiation Protection/ Commission internationale de protection contre les radiations non ionisantes	WHO	World Health Organization
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers		
INIRC	International Non-Ionizing Radiation Committee		
IRPA	Association internationale de radioprotection/International Radio Protection Association		
IRSST	Institut de recherche en santé et en sécurité du travail		

LEXIQUE

champ électrique	Forces que les charges électriques fixes exercent sur d'autres charges plus ou moins proches. Le champ électrique résulte de la différence de potentiel entre le conducteur et le milieu environnant.
champ éloigné (antenne)	Région où la distribution angulaire du champ est essentiellement indépendante de la distance de l'antenne.
champ magnétique	Forces qu'une charge électrique en déplacement exerce sur d'autres charges électriques. Le champ magnétique s'exprime en ampère par mètre (A/m). Le plus souvent, il est présenté sous forme de densité du flux magnétique. Il s'exprime alors en gauss (G) ou en tesla (T). Un T équivaut à 10 000 G.
champ proche (antenne)	Région située entre le champ d'induction et le champ éloigné dans laquelle les champs de rayonnement dominant et où la distribution angulaire du champ dépend de la distance de l'antenne.
courant alternatif	Courant qui alterne ou change de polarité à une fréquence donnée. Le courant est positif pendant un demi-cycle et négatif pendant la deuxième moitié du cycle.
courant continu	Courant électrique dont la polarité ne change pas et qui garde une intensité constante.
courant de contact	Courant circulant entre un objet conducteur (métallique) isolé et la terre dans un circuit électrique ayant une impédance équivalente, à l'impédance du corps humain à des fréquences variant de 0,0001 Hz à 100 MHz.
effet thermique	Effet se produisant dans un organisme vivant, essentiellement sous l'action d'un échauffement local ou d'une hausse de température de l'ensemble de l'organisme.
exposition de courte durée	Exposition unique de durée comprise entre quelques secondes et 24 heures ou une série d'expositions de quelques heures par jour plusieurs fois par semaine.
exposition prolongée	Pour un animal, exposition subie pendant une partie importante de son existence; il peut donc correspondre à une durée variable, de quelques semaines à un grand nombre d'années.
hertz (Hz)	Unité de mesure de la fréquence, c'est-à-dire le nombre d'oscillations ou de cycles d'un phénomène par seconde (1 hertz représente l'oscillation ou 1 cycle par seconde).
longueur d'onde	Distance, dans la direction de la propagation d'une onde périodique, entre deux points successifs où l'oscillation a la même phase.

micro-ondes	Ondes qui se situent approximativement dans la gamme de fréquences 300 MHz-300 GHz.
onde	Modification de l'état physique d'un milieu se propageant à la suite d'une perturbation locale.
onde électromagnétique	Onde caractérisée par des variations des champs électrique et magnétique.
onde modulée	Onde définie respectivement comme pulsée, modulée en amplitude, en fréquence ou en phase, lorsqu'elle est modifiée par des impulsions ou en variant son amplitude, sa fréquence ou sa phase.
population générale	Toute personne qui n'est pas un travailleur susceptible d'être exposé à des CEM.
radiation non ionisante	Radiations et champs électromagnétiques qui n'ont normalement pas suffisamment d'énergie pour produire l'ionisation de la matière. Ces radiations ont une énergie par photon inférieure à 12 électrons-volts, une longueur d'onde inférieure à 100 nanomètres et une fréquence inférieure à 300 térahertz.