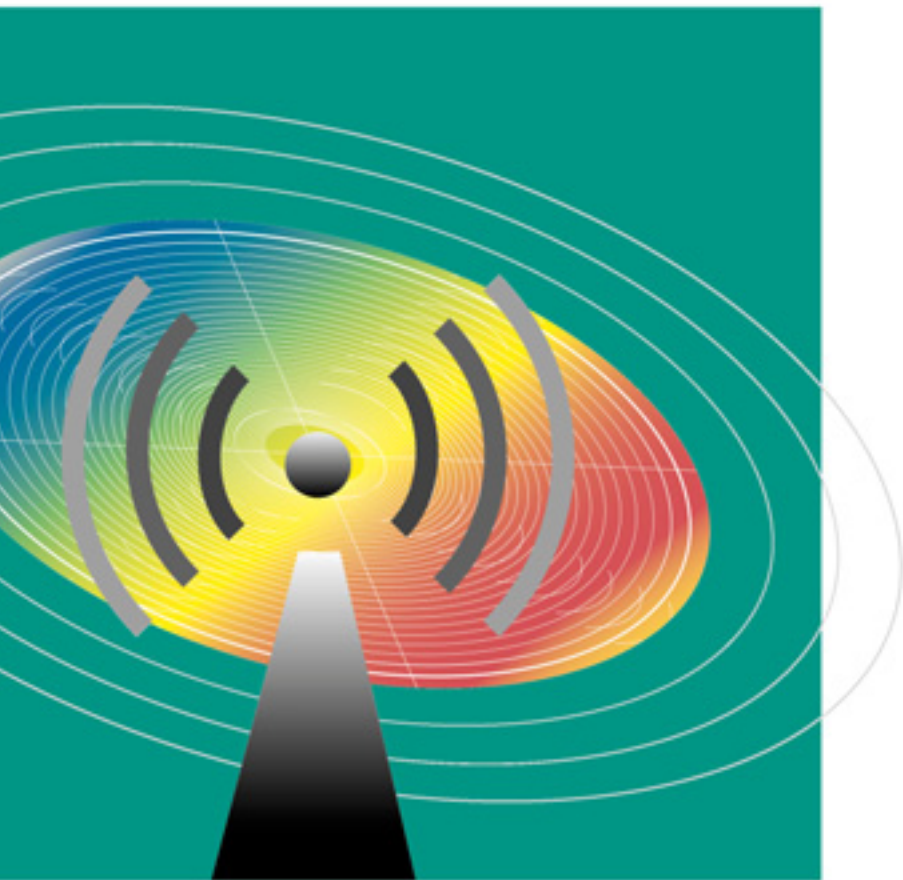




**Champs électriques
Champs magnétiques
Ondes électromagnétiques**
Guide à l'usage du médecin du travail
et du préventeur

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

Dans le domaine de la prévention des risques professionnels, l'INRS est un organisme scientifique et technique qui travaille, au plan institutionnel, avec la CNAMTS, les CARSAT-CRAM-CGSS et plus ponctuellement pour les services de l'État ainsi que pour tout autre organisme s'occupant de prévention des risques professionnels.

Il développe un ensemble de savoir-faire pluridisciplinaires qu'il met à la disposition de tous ceux qui, en entreprise, sont chargés de la prévention : chef d'entreprise, médecin du travail, CHSCT, salariés. Face à la complexité des problèmes, l'Institut dispose de compétences scientifiques, techniques et médicales couvrant une très grande variété de disciplines, toutes au service de la maîtrise des risques professionnels. Ainsi, l'INRS élabore et diffuse des documents intéressants l'hygiène et la sécurité du travail : publications (périodiques ou non), affiches, audiovisuels, site Internet... Les publications de l'INRS sont distribuées par les CARSAT. Pour les obtenir, adressez-vous au service prévention de la Caisse régionale ou de la Caisse générale de votre circonscription, dont l'adresse est mentionnée en fin de brochure.

L'INRS est une association sans but lucratif (loi 1901) constituée sous l'égide de la CNAMTS et soumise au contrôle financier de l'État. Géré par un conseil d'administration constitué à parité d'un collège représentant les employeurs et d'un collège représentant les salariés, il est présidé alternativement par un représentant de chacun des deux collèges. Son financement est assuré en quasi-totalité par le Fonds national de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

Les Caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (CARSAT), les Caisses régionales d'assurance maladie (CRAM) et Caisses générales de sécurité sociale (CGSS)

Les Caisses d'assurance retraite et de la santé au travail, les Caisses régionales d'assurance maladie et les Caisses générales de sécurité sociale disposent, pour participer à la diminution des risques professionnels dans leur région, d'un service prévention composé d'ingénieurs-conseils et de contrôleurs de sécurité. Spécifiquement formés aux disciplines de la prévention des risques professionnels et s'appuyant sur l'expérience quotidienne de l'entreprise, ils sont en mesure de conseiller et, sous certaines conditions, de soutenir les acteurs de l'entreprise (direction, médecin du travail, CHSCT, etc.) dans la mise en œuvre des démarches et outils de prévention les mieux adaptés à chaque situation. Ils assurent la mise à disposition de tous les documents édités par l'INRS.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'INRS, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite.

Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction, par un art ou un procédé quelconque (article L. 122-4 du code de la propriété intellectuelle).

La violation des droits d'auteur constitue une contrefaçon punie d'un emprisonnement de trois ans et d'une amende de 300 000 euros (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).

Champs électriques
Champs magnétiques
Ondes électromagnétiques
Guide à l'usage du médecin du travail
et du préventeur

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	9
AVERTISSEMENT	11
1. GÉNÉRALITÉS	13
1.1. Caractérisation de l'onde électromagnétique (OEM)	14
1.2. Classification des champs et ondes électromagnétiques	16
1.2.1. Spectre électromagnétique	16
1.2.2. Champs et ondes radioélectromagnétiques	17
1.2.3. Fréquences industrielles, scientifiques et médicales (ISM)	18
1.3. Mode de propagation d'une OEM	18
1.4. Émissions continues et pulsées	20
1.4.1. Émission continue	20
1.4.2. Émission pulsée	21
1.4.3. Modulation de l'émission	21
1.5. Éléments généraux de métrologie	22
1.6. Grandeurs usuelles	23
1.6.1. Intensité de champ électrique	23
1.6.2. Intensité de champ magnétique	23
1.6.3. Densité de flux magnétique ou induction magnétique	23
1.6.4. Flux énergétique ou puissance radiante	24
1.6.5. Intensité énergétique ou intensité radiante	24
1.6.6. Densité de puissance surfacique	24
1.6.7. Densité de puissance équivalente	24
1.6.8. Densité de courant induit	25
1.6.9. Débit d'absorption spécifique	25
1.6.10. Décibel	25
1.7. Normalisation de sécurité des OEM	26
1.7.1. Normes ANSI	26
1.7.2. Recommandations ICNIRP	26
1.7.3. Guide ACGIH	27
1.7.4. CENELEC TC 211	27
1.7.5. Projet de directive européenne	27

2. CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES STATIQUES	29
2.1. Définitions et caractéristiques	30
2.1.1. Champ électrique statique	30
2.1.2. Champ magnétique statique	30
2.2. Secteurs d'activités concernés	31
2.2.1. Champs électriques statiques	31
2.2.2. Champs magnétiques statiques	31
2.3. Interactions avec les systèmes biologiques	32
2.3.1. Champs électriques statiques	32
2.3.2. Champs magnétiques statiques	33
2.4. Effets physiologiques	34
2.4.1. Champs électriques statiques	34
2.4.1.1. Recherches expérimentales sur l'animal	34
2.4.1.2. Études effectuées sur l'homme	35
2.4.2. Champs magnétiques statiques	35
2.4.2.1. Études effectuées chez l'animal	35
2.4.2.2. Études effectuées chez l'homme	36
2.4.2.2.1. Expositions de courte durée à de fortes intensités de champ	36
2.4.2.2.2. Expositions de longue durée	37
2.5. Limites d'exposition	38
2.5.1. Champs électriques statiques	38
2.5.2. Champs magnétiques statiques	38
2.5.3. Éléments de métrologie	39
2.6. Médecine du travail	40
2.6.1. Champs électriques statiques	40
2.6.2. Champs magnétiques statiques	40
2.6.2.1. Salariés ne présentant aucune pathologie particulière	41
2.6.2.2. Porteurs d'un implant passif ferromagnétique	41
2.6.2.3. Porteurs d'un implant actif	41
2.6.2.4. Femmes enceintes	41
2.6.3. Recueil et analyse des informations : « vigilance industrielle »	42
2.7. Bibliographie	42
3. CHAMPS ET RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES ELF	47
3.1. Définitions et caractéristiques	48

3.1.1. Champ électrique ELF	48
3.1.2. Champ magnétique ELF	49
3.2. Secteurs d'activités concernés	50
3.2.1. Usages domestiques	50
3.2.2. Domaine professionnel	51
3.3. Interactions avec les systèmes biologiques	52
3.3.1. Action sur les cellules de l'immunité	52
3.3.2. Action sur le métabolisme cellulaire	52
3.3.3. Action sur la synthèse des protéines	52
3.3.4. Action sur la membrane cellulaire et les flux calciques	52
3.4. Effets physiologiques	53
3.4.1. Études sur l'animal	53
3.4.1.1. Effets neurologiques, neuroendocriniens et neuropsychologiques	53
3.4.1.2. Effets sur la reproduction	55
3.4.1.3. Effets sur la carcinogénèse	55
3.4.1.4. Autres effets	55
3.4.2. Études sur l'homme	55
3.4.2.1. Champs et courants induits, seuil de perception	55
3.4.2.2. Modifications neurologiques, psychologiques et neuroendocriniennes	56
3.4.2.3. Autres effets	56
3.4.2.4. Enquêtes épidémiologiques	57
3.5. Limites d'exposition	58
3.5.1. Champs électriques ELF	59
3.5.2. Champs magnétiques ELF	60
3.5.3. Courant de contact	61
3.5.4. Éléments de métrologie	61
3.6. Médecine du travail	62
3.6.1. Salariés et risque carcinologique	62
3.6.2. Porteurs d'implants	63
3.6.3. Femmes enceintes	63
3.6.4. Information des salariés concernés par les ELF de 50/60 Hz	64
3.6.4.1. Concernant l'apparition éventuelle de cancers	64
3.6.4.2. En cas de port d'implants passifs	64
3.6.4.3. En cas de port d'implants actifs	64
3.6.4.4. En cas de grossesse	64
3.6.5. Recueil et analyse des informations : « vigilance industrielle »	64
3.7. Bibliographie	65

4. ONDES RADIOÉLECTROMAGNÉTIQUES	69
4.1. Définition et caractéristiques	70
4.2. Secteurs d'activités concernés	71
4.2.1. Télécommunications	71
4.2.2. Électrothermie par effet diélectrique	71
4.2.2.1. Travail du bois	71
4.2.2.2. Industries textile, papetière, des caoutchoucs et des plastiques	72
4.2.2.3. Bâtiment et travaux publics	72
4.2.2.4. Industrie agro-alimentaire	72
4.2.2.5. Secteurs médical et paramédical	72
4.2.3. Électrothermie par induction	72
4.2.3.1. Industrie sidérurgique et travail des métaux	72
4.2.3.2. Industrie électronique	72
4.2.3.3. Secteurs scientifique et médical	73
4.3. Interactions avec les systèmes biologiques	73
4.3.1. Bases physiques des interactions	73
4.3.1.1. Origine biophysique de l'absorption des OEM	74
4.3.1.2. Profondeur de pénétration des OEM	74
4.3.1.3. Influence des interfaces biologiques	74
4.3.1.4. Influence de la configuration géométrique de la cible	75
4.3.1.5. Le débit d'absorption spécifique (ou massique) : DAS	75
4.3.2. Effets thermogènes	75
4.3.2.1. Effet thermogène loco-régional	75
4.3.2.2. Action sur le cristallin	76
4.3.3. Effets spécifiques ou athermiques	77
4.3.3.1. Effets sur l'ADN et la synthèse protéique	77
4.3.3.2. Effets sur le système immunitaire	77
4.3.3.3. Effets sur le plan carcinologique	77
4.3.3.4. Problème particulier du métabolisme du Ca^{++} - Effets fenêtres	77
4.4.- Effets physiologiques	78
4.4.1. Études effectuées sur l'animal	78
4.4.1.1. Effets thermiques	78
4.4.1.1.1. Modifications neurologiques	79
4.4.1.1.2. Modifications des fonctions reproductrices et impact sur la descendance	79
4.4.1.1.3. Modifications hématologiques	79
4.4.1.1.4. Apparition de cataractes	80
4.4.1.2. Effets spécifiques	80
4.4.1.2.1. Modifications neurologiques et neuro-endocriniennes	80
4.4.1.2.2. Action sur le comportement	82
4.4.1.2.3. Action sur les systèmes immunitaire et hématopoïétique	82
4.4.1.2.4. Modifications des fonctions reproductrices et impact sur la descendance	83
4.4.1.2.5. Effet carcinogène	83
4.4.1.2.6. Problème particulier de la sensibilité aux médicaments	83

4.4.1.2.7. Synthèse des effets spécifiques des OEM	83
4.4.2. Effets sur l'homme	84
4.4.2.1. Pathologies liées aux RF et HF	84
4.4.2.1.1. Exposition aiguë	84
4.4.2.1.2. Expositions répétées ou chroniques	85
4.4.2.2. Effet particulier des HF	86
4.4.2.2.1. Effet sur l'acuité auditive	86
4.4.2.2.2. Réactions physiologiques et psychologiques	86
4.5. Limites d'exposition	87
4.5.1. Valeurs limites fondamentales	87
4.5.2. Valeurs limites dérivées	87
4.5.3. Cas particuliers	89
4.5.3.1. Sources pulsées	89
4.5.3.2. Exposition à plusieurs sources de fréquences différentes	90
4.5.3.3. Sources de faibles puissances	91
4.5.3.4. Recommandations pratiques pour les HF	91
4.5.3.5. Limite d'application des seuils d'exposition recommandés	92
4.5.3.6. Les fours à micro-ondes	92
4.5.4. Éléments de métrologie des sources RF et HF	93
4.5.4.1. Récepteurs isotropiques large bande (30 MHz - 18 GHz)	94
4.5.4.2. Récepteurs sélectifs	94
4.6. Médecine du travail	94
4.6.1. Exposition aiguë aux RF et HF	94
4.6.2. Expositions répétées ou chroniques	95
4.6.3. Surveillance médicale	95
4.6.3.1. Cas général	95
4.6.3.2. Contre-indications particulières à l'exposition aux RF et HF	96
4.6.3.2.1. Porteurs d'implants passifs	96
4.6.3.2.2. Porteurs d'implants actifs	96
4.6.3.2.3. Femmes enceintes	97
4.6.4. Information du personnel	97
4.6.5. Recueil et analyse des informations : « vigilance industrielle »	98
4.7. Bibliographie	98
5. RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE RMN	103
5.1. Principe de fonctionnement	104
5.1.1. Champ magnétique statique	104
5.1.2. Champ électromagnétique radiofréquence	105
5.1.3. Champ magnétique variable	105
5.2. Niveaux d'exposition	105
5.3. Effets physiologiques	106
5.3.1. Champs magnétiques statiques	106

5.3.2. Champs magnétiques variables	106
5.3.2.1. Magnétosphosphènes	106
5.3.2.2. Paresthésies	106
5.3.2.3. Troubles du rythme	106
5.3.2.4. Modifications des plaquettes	106
5.3.3. Champs électromagnétiques. Radiofréquences	107
5.3.3.1. Modification de la chaleur tissulaire locale	107
5.3.3.2. Modification de la réactivité à certains médicaments	107
5.3.3.3. Effets sur le transport du Ca^{++}	107
5.3.3.4. Modification de la perméabilité de la barrière hématoencéphalique	107
5.4. Limites d'exposition et mesures de prévention	107
5.5. Médecine du travail	109
5.5.1. Considérations générales	109
5.5.2. Surveillance médicale	109
5.5.3. Information du personnel	110
5.6. Bibliographie	110
6. ANNEXES	113
6.1. Champs statiques et ELF : données métrologiques OMS	115
6.2. Rayonnements RF et HF : campagnes de mesurages N/ESS	121
6.3. Effets sur la santé des radiotéléphones cellulaires (Documents pour le médecin du travail, n° 73, 1998)	125
6.4. Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électromagnétiques (avril 1998)	132
7. LEXIQUES	
7.1. Glossaire des termes biologiques et médicaux	136
7.2. Glossaire des termes techniques	139

AVANT-PROPOS

L'INRS et les CRAM sont régulièrement confrontés à des demandes concernant la mise en œuvre dans de nombreux secteurs d'activités des champs et rayonnements électromagnétiques non ionisants.

La plupart des questions soulevées relèvent de deux catégories :

- relevés métrologiques, pour lesquels l'assistance voire l'intervention in situ de leurs services techniques sont directement sollicitées ;
- risques éventuels pour le personnel.

Au plan strictement médical, l'incertitude porte notamment sur la conduite à tenir par le médecin du travail chargé de la surveillance des salariés, tout particulièrement dans les PME où une mutation, même temporaire, n'est pas envisageable. L'absence de références françaises réglementaires et normatives spécifiques contribue encore à augmenter la difficulté de sa mission.

Ainsi, l'INRS ne possédant pas d'équipe suffisamment spécialisée dans le domaine des effets biologiques ou pathologiques dus aux champs et rayonnements électromagnétiques, a confié à Monsieur le Professeur MIRO⁽¹⁾, dans le cadre d'une convention, une étude ayant pour objet une synthèse de la bibliographie mondiale, couvrant l'ensemble des gammes de fréquences, et incluant les champs électriques et magnétiques statiques. Cette étude, réactualisée notamment à partir d'une base de données américaine (EMF Data Base), a fait le point des connaissances les plus récentes dans le domaine et des insuffisances les plus notoires.

A partir du résultat de cette investigation, il a été tenté de dégager des lignes de conduite générales préconisées aux médecins du travail confrontés aux diverses situations possibles (incident, accident, expositions répétées ou chroniques) en matière de prévention technique et médicale.

L'étude ainsi menée par le Professeur L. MIRO et les docteurs P. DESCREUX⁽²⁾ et R. de SEZE⁽³⁾ a servi de base de travail pour la réalisation de ce guide. Un groupe de rédaction a été constitué par l'INRS à seul effet d'introduire des modifications de forme et des données complémentaires tirées des publications existantes de l'INRS ainsi que de son expérience dans le domaine. Messieurs G. HEE⁽⁴⁾ et P. MEREAU⁽⁵⁾, respectivement ingénieur et médecin au siège de l'INRS à Paris, ont assuré ce travail faisant appel à des compétences pluridisciplinaires avec le concours du service Electronique et sécurité des systèmes du Centre de recherche et de formation INRS de Nancy, ainsi que de Monsieur LOUIT⁽⁶⁾.

Ce guide n'a pas d'autre objectif que d'apporter des réponses à caractère général à la plupart des questions les plus couramment posées aux médecins du travail et aux préventeurs. Il devrait être complété à l'avenir par un réseau d'informations susceptible d'apporter des réponses personnalisées aux questions à caractère plus spécifique.

(1) Docteur en médecine, docteur ès-Sciences, professeur de biophysique médicale, chef de service, CHU Carêmeau, Nîmes.

(2) Docteur en médecine, diplômé de médecine du travail, service de biophysique médicale, CHU Carêmeau, Nîmes.

(3) Docteur en médecine, docteur ès-Sciences, assistant hospitalo-universitaire, service de biophysique médicale, CHU Carêmeau, Nîmes.

(4) Ingénieur INSA, ingénieur IFE, ingénieur des hôpitaux, service risques physiques et mécaniques, INRS, Paris.

(5) Docteur en médecine, diplômé de médecine du travail, chargé de mission auprès de la direction générale, INRS, Paris.

(6) Ingénieur École polytechnique, conseiller scientifique à la Direction des Relations du travail du ministère du Travail, du Dialogue social et de la Participation.

Les références aux recommandations de limitation de l'exposition de l'ACGIH et des ENV 50166-1 et 50166-2 ne sont plus d'actualité et sont donc fournies pour information seulement.

Aujourd'hui, ce sont les recommandations de limitation de l'exposition aux champs électromagnétiques publiées en 1998 par l'ICNIRP qui font référence.

Notamment, elles sont prises en compte dans le projet de directive européenne en cours d'élaboration.

Ces recommandations de l'ICNIRP ont été traduites et publiées par l'INRS dans la ND 2143-182-01.

Des extraits de ce document sont cités à l'annexe 6.4.

En ce qui concerne les champs magnétiques statiques, ce sont les recommandations de limitation de l'exposition aux champs magnétiques statiques publiées en 1993 par l'ICNIRP qui font référence.

Notamment, elles sont prises en compte dans le projet de directive européenne en cours d'élaboration.

Ces recommandations de l'ICNIRP ont été traduites et publiées par l'INRS dans la ND 2184-190-03.

septembre 2003

AVERTISSEMENT

Structure de la brochure

Afin de faciliter la consultation de la brochure, il a été établi à dessein un plan prédéterminé qui reprend les mêmes rubriques avec quelques variantes suivant les thèmes traités.

Références bibliographiques

A la fin de chaque chapitre figurent les principales références faisant l'objet d'un consensus de la part de la communauté scientifique, dont sont tirés les arguments développés dans le texte.

Glossaires

Deux glossaires placés en fin de brochure explicitent, l'un les termes biologiques et médicaux, l'autre les expressions techniques, rencontrés au fil du texte.

Toutefois certains termes médicaux, même usuels pour le praticien, peuvent y figurer dans la mesure où des préventeurs non médecins pourront faire usage de ce guide.

RMN

La Résonance Magnétique Nucléaire constitue une application scientifique et médicale importante de la théorie des champs et rayonnements électromagnétiques. Un chapitre spécial lui est consacré en fin de brochure.

Rayonnements optiques

Les rayonnements électromagnétiques optiques incohérents ainsi que les lasers ne sont pas traités.

1

GÉNÉRALITÉS

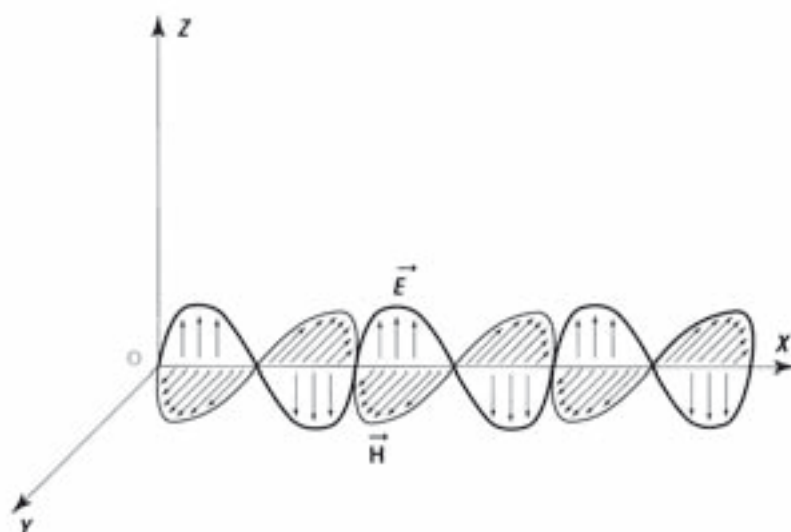


1.1. CARACTÉRISATION DE L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE (OEM)

Une onde électromagnétique correspond à un transfert énergétique sous forme d'un champ électrique couplé à un champ magnétique.

Ces deux champs se propagent de façon ondulatoire, perpendiculairement l'un à l'autre dans un plan lui-même perpendiculaire à la direction de propagation.

Figure 1
Propagation d'une onde



$\vec{E}$: champ électrique variable de l'onde électromagnétique suivant l'axe OZ ;
 $\vec{H}$: champ magnétique variable de l'onde électromagnétique suivant l'axe OY ;
Axe OX : direction de propagation de l'onde électromagnétique.

Une onde électromagnétique est caractérisée par sa longueur d'onde λ ou sa fréquence f .

La longueur d'onde est la distance qui sépare les deux points correspondants d'oscillations qui se suivent. Elle caractérise en particulier la distance entre deux nœuds ou deux ventres d'une onde. L'unité de longueur d'onde est le mètre (m).

La fréquence définit le nombre d'oscillations en un point donné au cours d'une seconde. L'unité de fréquence est le hertz (Hz).

La durée d'une oscillation est la période T exprimée en secondes (s).

La vitesse de propagation de l'OEM ne dépend que de la nature du milieu qu'elle traverse.

Dans le vide cette vitesse est égale à la vitesse de la lumière c , soit $2,98 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Dans un milieu d'indice de réfraction n , la vitesse est égale à :

$$v = \frac{c}{n} = \frac{c}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon}}$$

où

μ : perméabilité du milieu ;

ϵ : permittivité diélectrique du milieu ;

n : indice de réfraction du milieu.

Ces paramètres sont reliés entre eux par les formules :

$$f = \frac{1}{T} \text{ et } \lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}$$

A toute onde électromagnétique est associée une particule de masse pratiquement nulle ou photon dont l'énergie est reliée à la longueur d'onde par la relation :

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \text{ (en joules)}$$

où h est la constante de Planck = $6,62 \cdot 10^{-34}$ joule seconde (J.s).

Cette expression peut être donnée en eV sachant que :

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ joule.}$$

On peut donc définir une onde électromagnétique par sa fréquence, sa longueur d'onde ou son énergie photonique.

Du fait de son caractère constant, un champ électrique $\vec{E}$ statique peut exister en l'absence d'un champ magnétique $\vec{H}$. Un condensateur en constitue un exemple. A l'inverse, un aimant permanent crée un champ $\vec{H}$ sans qu'il y ait de champ $\vec{E}$. Lorsque ces champs varient avec le temps, $\vec{H}$ ne peut pas exister sans $\vec{E}$ et réciproquement. De nombreuses informations sont disponibles à partir de la théorie des champs statiques mais c'est seulement quand les champs sont variables avec le temps que la théorie des champs et rayonnements électromagnétiques prend toute sa dimension.

Cette dernière est régie par diverses lois fondamentales de l'électricité regroupées dans un système d'équations dénommé « équations de Maxwell », pour la compréhension desquelles il y a lieu de se reporter à des ouvrages scientifiques spécialisés.

1.2. CLASSIFICATION DES CHAMPS ET ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

1.2.1. Spectre électromagnétique

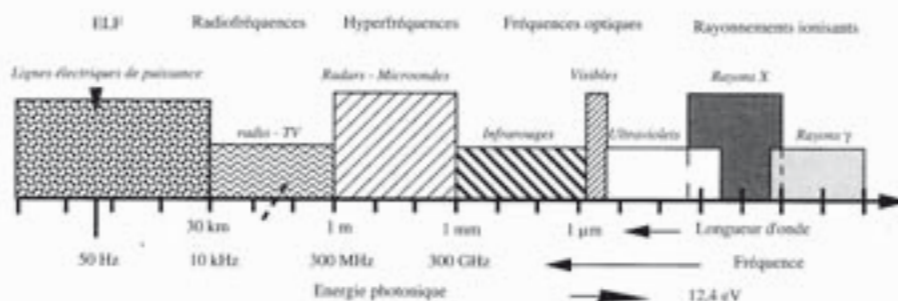
Tableau 1
Spectre des champs et rayonnements électromagnétiques

Nature des champs et rayonnements	Désignation	λ (m)*	f (Hz)*	E (eV)*
Champs statiques	Champs électriques et magnétiques	∞	0	0
RNI (Rayonnements non ionisants)	Champs électromagnétiques ELF	∞ à $3 \cdot 10^4$	> 0 à 10^4	≈ 0
	Ondes radio électromagnétiques	$3 \cdot 10^4$ à 10^{-3}	10^4 à $3 \cdot 10^{11}$	$< 1,24 \cdot 10^{-3}$
	Infrarouges	10^{-3} à $8 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{11}$ à $3,75 \cdot 10^{14}$	$1,24 \cdot 10^{-3}$ à 1,55
	Visibles	$8 \cdot 10^{-7}$ à $4 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{14}$ à $7,5 \cdot 10^{14}$	1,55 à 3,1
	Ultraviolets	$4 \cdot 10^{-7}$ à 10^{-7}	$7,5 \cdot 10^{14}$ à $3 \cdot 10^{15}$	3,1 à 12,4
RI (Rayonnements ionisants)	Rayons X	10^{-7} à 10^{-14}	$3 \cdot 10^{15}$ à $3 \cdot 10^{22}$	12,4 à $1,24 \cdot 10^8$
	Rayons γ	10^{-11} à 10^{-13}	$3 \cdot 10^{19}$ à $3 \cdot 10^{21}$	$1,24 \cdot 10^5$ à $1,24 \cdot 10^7$

* Les limites indiquées sont celles des conventions les plus courantes. La frontière entre les champs électromagnétiques ELF (cf. tableau 2) et les ondes radioélectromagnétiques est celle qui a été adoptée par le CENELEC TC 111 en mai 1994.

Ainsi on a situé les rayonnements non ionisants (RNI) comme des rayonnements électromagnétiques dont l'énergie photonique est trop faible pour provoquer l'ionisation d'une molécule biologique. Après de nombreuses études, cette frontière énergétique a été fixée à 12,4 eV, ce qui correspond à une fréquence de $3 \cdot 10^{15}$ Hz et à une longueur d'onde de $1 \cdot 10^{-7}$ m, soit 0,1 μ m.

Figure 2
Spectre des OEM



1.2.2. Champs ELF et ondes radioélectromagnétiques

Tableau 2
Champs ELF et ondes radioélectromagnétiques

Gamme du spectre	Sigles*	Longueurs d'onde	Fréquences
Extrêmes basses fréquences	ELF	> 30 km	> 0 Hz à 10 kHz
Radiofréquences	VLF	10 km à 30 km	10 kHz à 30 kHz
	LF	1 à 10 km	30 kHz à 300 kHz
	MF	100 m à 1 000 m	300 kHz à 3 MHz
	HF	10 à 100 m	3 MHz à 30 MHz
	VHF	1 à 10 m	30 MHz à 300 MHz
Hyperfréquences	UHF	1 dm à 1 m	300 MHz à 3 GHz
	SHF	1 cm à 1 dm	3 GHz à 30 GHz
	EHF	1 mm à 1 cm	30 GHz à 300 GHz

* Les sigles usuels sont anglo-saxons. En particulier, HF désignant dans ce tableau les « High Frequencies » des radiofréquences ne doit pas être confondu avec les HF, abréviation utilisée dans la suite du texte pour désigner les rayonnements hyperfréquences.

1.2.3. Fréquences industrielles, scientifiques et médicales (ISM)

Sur le plan international, il a été attribué des fréquences particulières pour les applications industrielles, scientifiques et médicales. Elles figurent au tableau 3.

Tableau 3
Bandes de fréquences ISM

6,78 MHz $\pm$ 1,5 kHz ^a	433,92 MHz $\pm$ 20 MHz ^{a, b}	24,125 GHz $\pm$ 125 MHz
13,56 MHz $\pm$ 6,78 kHz	915 MHz $\pm$ 13 MHz	61,0 GHz $\pm$ 250 MHz ^a
27,12 MHz $\pm$ 160 kHz	2,45 GHz $\pm$ 50 MHz	122,5 GHz $\pm$ 0,5 GHz ^a
40,68 MHz $\pm$ 20 kHz	5,80 GHz $\pm$ 75 MHz	245 GHz $\pm$ 1 GHz ^a

a : Usage soumis à autorisation spéciale. b : Usage autorisé dans certains pays seulement.
(Données BIT Genève, n° 57 série sécurité, hygiène et médecine du travail).

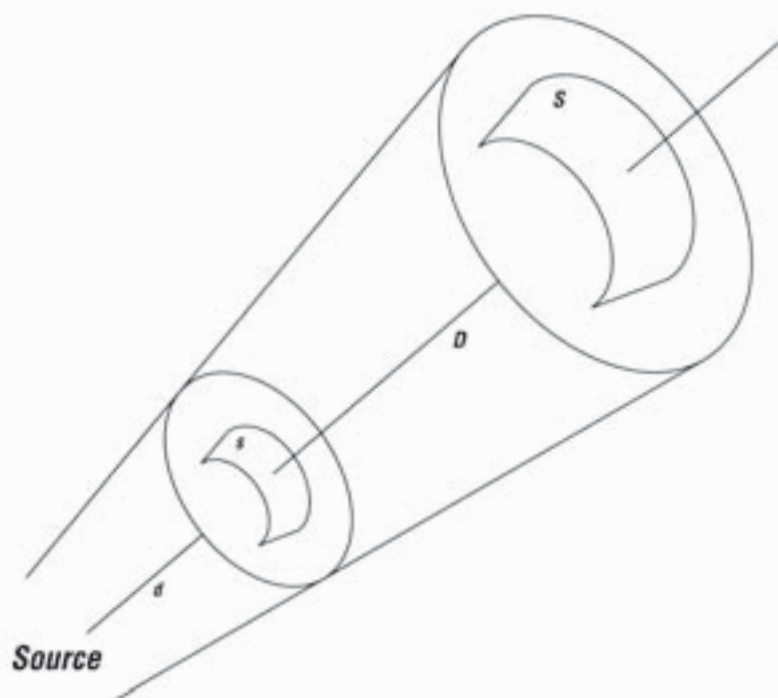
1.3. MODE DE PROPAGATION D'UNE OEM

Lorsque la source est ponctuelle ou sphérique, l'OEM se propage de la même façon dans toutes les directions de l'espace. On dit que cette propagation est isotrope.

Lorsque la source est directionnelle, la propagation de l'OEM est fonction de la direction imposée par les caractéristiques physiques de l'antenne comme indiqué dans la figure 3.

En espace libre, l'OEM se propage de façon rectiligne. Sa propagation dans l'espace se traduit par une répartition de l'énergie sur une surface de plus en plus grande. Cette surface croît comme le carré de l'éloignement d par rapport à la source. La densité de puissance surfacique ou éclairement énergétique est donc inversement proportionnelle à d^2 .

Figure 3
Émission d'une onde électromagnétique



Lorsque l'OEM entre en contact avec la matière, il peut se produire en fonction du rapport entre longueur d'onde et taille de l'objet rencontré par le rayonnement et des caractéristiques physiques des milieux traversés et de l'objet, plusieurs types d'interaction :

- réflexion et réfraction lorsque les deux milieux sont séparés par une surface dont les dimensions sont très grandes et les irrégularités très petites par rapport à la longueur d'onde ;
- diffraction lorsque les irrégularités de surface sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde ou si les dimensions de la surface de séparation sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde ;
- diffusion lorsque l'onde rencontre sur son trajet un nombre important d'obstacles dont les dimensions sont du même ordre de grandeur ou plus petites que la longueur d'onde ;
- absorption lorsqu'il y a perte énergétique sous quelque forme que ce soit (thermique ou autre dans le milieu traversé).

Près de l'émetteur, c'est-à-dire à une distance de l'ordre de 2 à 3 longueurs d'onde, on se trouve dans la zone dite proche ou de Fresnel. L'onde n'est pas formée, ce qui entraîne des difficultés sur le plan métrologique.

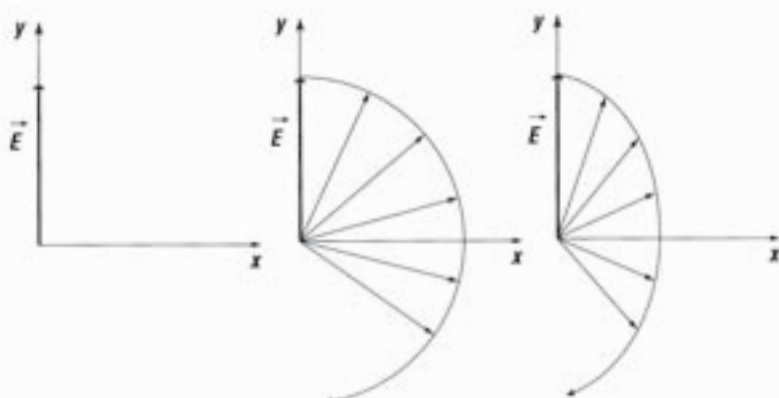
Loin de l'émetteur, c'est-à-dire à une distance égale ou supérieure à 10 longueurs d'onde, on se trouve dans la zone dite lointaine ou de Fraunhofer.

L'onde peut être alors considérée comme plane et la métrologie est ainsi simplifiée.

On appelle polarisation de l'onde l'orientation des champs électriques ou magnétiques par rapport à la direction de propagation. Elle est dite :

- rectiligne, lorsque les champs gardent une direction constante ;
- circulaire, lorsqu'ils tournent autour de l'axe de propagation avec une intensité constante dans toutes les orientations ;
- elliptique, lorsqu'ils tournent autour de l'axe de propagation mais avec une intensité plus importante dans une orientation que dans une autre.

Figure 4
Polarisation d'une onde électromagnétique



1.4. ÉMISSIONS CONTINUES ET PULSÉES

1.4.1. Émission continue

Le rayonnement est émis de façon ininterrompue avec une puissance constante P .

Dans ces conditions l'énergie délivrée pendant le temps d'utilisation est égale à :

$$E = P \cdot t$$

où :

E est l'énergie exprimée en joules,
 P la puissance exprimée en watts,
 t le temps d'exposition exprimé en secondes.

1.4.2. Émission pulsée

Le rayonnement est émis par impulsions de durée τ .

Ces impulsions sont rarement isolées et le plus souvent émises de façon itérative avec une certaine fréquence de répétition f_r exprimée en hertz.

Dans ces conditions, il faut distinguer :

- la puissance crête P_c qui est la puissance maximale d'une impulsion. L'énergie délivrée par impulsion est alors égale à :

$$E = P_c \cdot \tau$$

- la puissance moyenne P_m qui représente la puissance délivrée moyennée dans le temps et qui est égale à :

$$P_m = P_c \cdot \tau \cdot f_r$$

Dans ce cas l'énergie délivrée pendant le temps d'exposition t est égale à :

$$E = P_m \cdot t$$

On appelle « taux de remplissage » ou « facteur de forme » de l'émission le produit de la durée τ des impulsions par la fréquence de répétition des impulsions f_r , soit : $\tau \cdot f_r$.

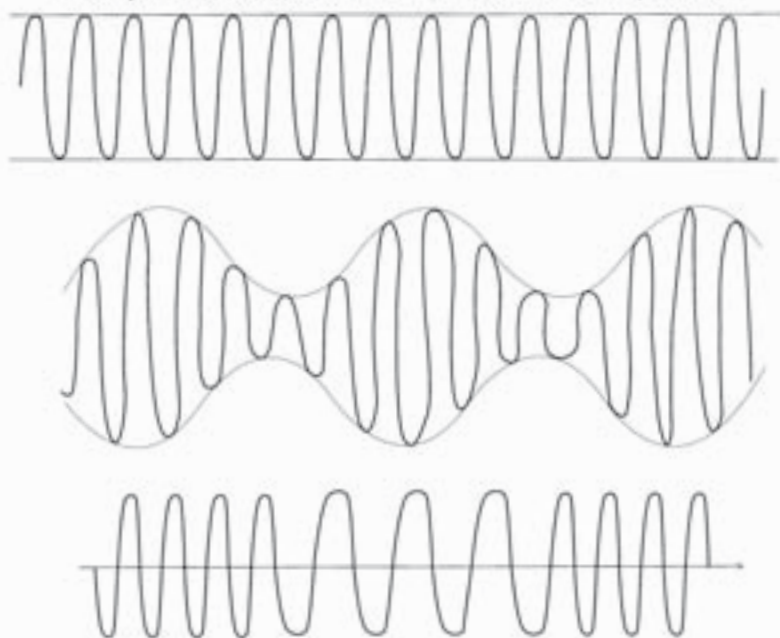
1.4.3. Modulation de l'émission

L'émission, qu'elle soit continue ou impulsionnelle, peut être modulée de façon à ce qu'un seul de ses paramètres physiques varie dans le temps. On distingue principalement deux types de modulations :

- la modulation d'amplitude, où la puissance d'émission varie dans le temps en fonction de la fréquence fixée du signal à transmettre ;
- la modulation de fréquence, où la fréquence de l'émission oscille dans une certaine bande fréquentielle en fonction de l'amplitude du signal à transmettre.

Lorsque la modulation est sinusoïdale, elle possède une fréquence propre qui peut se situer dans la gamme des ELF, VLF, ou LF ; on doit tenir compte de cette notion pour l'étude des effets biologiques des OEM.

Figure 5
Exemples de modulations d'amplitudes et de fréquences



1.5. ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX DE MÉTROLOGIE

Afin de pouvoir étudier et quantifier les effets biologiques des OEM, il est indispensable de maîtriser parfaitement leur métrologie, c'est-à-dire les grandeurs et unités physiques qui caractérisent leur émission et leur interaction avec la matière.

Pour interagir avec la matière qu'il traverse, un rayonnement doit obligatoirement être absorbé par celle-ci. Il est impératif, pour pouvoir déterminer avec précision l'interaction, d'avoir accès à la notion de la quantité d'énergie rayonnée absorbée et aux paramètres spatio-temporels de cette absorption. Cela est vrai en ce qui concerne la matière vivante. Il ne faut jamais confondre le niveau d'exposition et la dose absorbée qui est à l'origine des effets biologiques.

Le niveau d'exposition dépend essentiellement :

- des paramètres d'émission de la source, ponctuelle ou étendue, de l'angle solide dans lequel elle émet, de l'énergie émise et de son débit ;
- de la surface de matière interceptée par le rayonnement ;
- de la durée d'exposition.

Il est calculé en $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ pour les OEM.

La dose absorbée dépend :

- du niveau d'exposition ;
- du coefficient d'absorption du tissu traversé, celui-ci étant lié à la fréquence du rayonnement et aux paramètres physiques du tissu en relation avec les processus de transferts énergétiques mis en œuvre dans le phénomène d'absorption ;
- de la durée d'exposition.

D'une façon générale, elle s'exprime en joules par kilogramme de matière traversée. Si cette dose absorbée est relativement facile à calculer, voire à mesurer pour les rayonnements ionisants, elle n'est appréciée que de façon approximative et principalement par le calcul en ce qui concerne les rayonnements non ionisants.

1.6. GRANDEURS USUELLES

Elles permettent de caractériser une source émissive, l'exposition d'une cible ou l'énergie absorbée. Ce sont les suivantes.

1.6.1. Intensité de champ électrique

Une bonne illustration consiste à considérer deux plaques parallèles chargées électriquement dont la distance est exprimée en mètres et la différence de potentiel en volts. Dans ce cas, elles génèrent perpendiculairement un champ de vecteurs électriques parallèles $\vec{E}$, dont le module E est l'intensité de champ électrique en volts par mètre ($V \cdot m^{-1}$).

1.6.2. Intensité de champ magnétique

Un conducteur électrique, par exemple, siège d'un courant électrique exprimé en ampères développe tangentiellement à la circonférence d'une surface circulaire perpendiculaire dont le diamètre est donné en mètres, un champ de vecteurs magnétiques $\vec{H}$, dont le module H est l'intensité de champ magnétique en ampères par mètre ($A \cdot m^{-1}$).

1.6.3. Densité de flux magnétique ou induction magnétique

Un champ de vecteurs magnétiques $\vec{H}$ parallèles de module H exerce perpendiculairement à travers une coupe plane S d'un milieu de perméabilité μ

un flux magnétique dont la densité s'exprime en teslas (T). La relation reliant l'induction magnétique B et l'intensité de champ magnétique H est la suivante :

$$B = \mu \cdot H$$

Dans le vide : $\mu = \mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ (henry par mètre).

1.6.4. Flux énergétique ou puissance radiante

Un faisceau bien défini de rayonnements transporte par seconde une énergie bien déterminée, ou puissance radiante, dénommée flux énergétique P. Il est exprimé en watts (W).

1.6.5. Intensité énergétique ou intensité radiante

C'est le quotient I du flux énergétique P d'une source ponctuelle dans une direction donnée par l'angle solide W dans lequel est émis le rayonnement :

$$I = P / \Omega$$

Elle est exprimée en watts par stéradian ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$)

1.6.6. Densité de puissance surfacique

C'est le rapport S du flux énergétique P émis par la source dans toutes les directions par la surface s :

$$S = P / s$$

Elle s'exprime en watts par mètre carré ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

C'est aussi le module du vecteur de Poynting. Ce vecteur, situé dans la direction de propagation, est déterminé par le produit vectoriel de $\vec{E}$ et de $\vec{H}$:

$$\vec{S} = \vec{E} \wedge \vec{H}$$

1.6.7. Densité de puissance équivalente

P_{eq} est fonction des intensités de champs électriques et magnétiques selon l'expression suivante applicable pour des fréquences supérieures à 10 MHz :

$$P_{eq} \geq \frac{5}{6} \left(\frac{E^2}{120 \cdot \pi} \right) + \frac{1}{6} (120 \pi \cdot H^2)$$

Comme pour la densité de puissance surfacique, elle est donnée en watts par mètre carré ($W \cdot m^{-2}$).

1.6.8. Densité de courant induit

Le corps humain soumis à des champs électromagnétiques est le siège de courants induits J traversant une unité de surface de tissus. Cette densité de courant induit s'exprime en ampères par mètre carré ($A \cdot m^{-2}$). Il est admis que, pour un rayonnement électromagnétique dont la fréquence est inférieure à 10 kHz, cette grandeur est la valeur fondamentale à partir de laquelle sont établies les valeurs limites de base ; on en tire les valeurs limites dérivées exprimées en intensité de champ électrique, intensité de champ magnétique et induction magnétique.

1.6.9. Débit d'absorption spécifique

La dose absorbée par les tissus biologiques par unité de temps entraîne une accumulation d'énergie qui s'exprime en watts par kilogramme de tissu ($W \cdot kg^{-1}$). Il est admis que, pour un rayonnement électromagnétique dont la fréquence est supérieure à 10 kHz, ce débit d'absorption spécifique, dénommé **DAS**, est la grandeur fondamentale. À partir de celle-ci sont établies les valeurs limites de base desquelles on tire les valeurs limites dérivées exprimées en intensité de champ électrique, intensité de champ magnétique et induction magnétique. En anglais, cette grandeur se dénomme le « specific absorption rate » (**SAR**).

1.6.10. Décibel

Certaines grandeurs, telles l'intensité de champ électrique, l'intensité de champ magnétique et la densité de flux magnétique peuvent être représentées par leur niveau et exprimées en décibels. Le niveau de cette grandeur, habituellement utilisée en acoustique, est le logarithme décimal du rapport d'un résultat de mesurage sur une valeur considérée conventionnellement comme initiale. Cela facilite la transcription de valeurs relativement éloignées les unes des autres et l'évaluation d'écarts. À titre d'exemple, le niveau de l'intensité de champ magnétique H , grandeur exprimée en $A \cdot m^{-1}$, peut être notée L_H . Il correspond à la relation définie de la façon suivante :

$$L_H = 10 \log \frac{H^2}{H_0^2} = 20 \log \frac{H}{H_0} \text{ donc } \frac{H}{H_0} = 10^{\frac{L_H}{20}}$$

On peut ainsi vérifier avec $H_0 = 1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, l'unité d'intensité de champ magnétique servant ici de valeur de référence, que :
pour $L_H = 108 \text{ dB}$, on obtient $H = 10^{108/20} = 10^{5,4} = 251 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$

1.7. NORMALISATION DE SÉCURITÉ DES OEM

Deux prénormes européennes expérimentales ont été adoptées par les normalisateurs du CENELEC TC 111. Dans l'attente de normes définitives, les textes pertinents récents ou servant de référence depuis un certain nombre d'années sont énumérés dans les sous-paragrophes suivants.

1.7.1. Normes ANSI

Ces textes de l'« American National Standard Institute » élaborés en collaboration avec l'**IEEE** « Institute of Electrical and Electronics Engineers » servent de référence dans les pays industrialisés. Il y a lieu de citer plus particulièrement la norme **IEEE C 95.1-1991** « Safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields 3 kHz to 300 GHz ».

1.7.2. Recommandations ICNIRP

L'**ICNIRP** « International commission on non ionizing radiation protection » (anciennement **IRPA/INIRC**), en relation avec la division santé-environnement de l'**OMS** « Organisation mondiale de la santé », a conçu et édité un certain nombre de recommandations concernant :

- les limites d'exposition pour les rayonnements ultraviolets ;
- les limites d'exposition pour les rayonnements lasers ;
- les limites d'exposition pour les radiofréquences de 100 kHz à 300 GHz ;
- les limites d'exposition pour les champs électromagnétiques de 50-60 Hz ;
- les limites d'exposition pour les champs magnétiques statiques ;
- l'exposition des malades aux appareils d'imagerie RMN.

Les quatre premières recommandations sont réunies dans une brochure publié chez Pergamon Press en 1991 :

« **IRPA guidelines on protection against non ionizing radiation** ».

Les deux dernières ont été publiées dans « Health Physics » en 1991 (61, 6, 923-928) et en 1994 (66, 1, 100-106).

1.7.3. Guide ACGIH

Avant la publication des recommandations de l'IRPA/INIRC, il était d'usage de consulter le guide **ACGIH** « American conference of governmental industrial hygienists » concernant les valeurs limites pour les substances chimiques, les agents physiques et les seuils d'exposition biologique. Ce document est remis à jour annuellement et sert encore de référence pour les gammes de fréquences non traitées par l'ICNIRP.

1.7.4. CENELEC TC 211

Les travaux récents des sous-comités **211A** et **211B** se sont concrétisés, en novembre 1994, par l'adoption de deux prénormes européennes :

- a) **ENV 50166-1** : Exposition humaine aux champs électromagnétiques de basses fréquences (0 Hz à 10 kHz) ;
- b) **ENV 50166-2** : Exposition humaine aux champs électromagnétiques de hautes fréquences (10 kHz à 300 GHz).

Ces textes ont été publiés en anglais en janvier 1995, et l'INRS a proposé la version française dont les indices de classement UTE (Union technique de l'électricité) sont C 18-600 et C 18-610*. Il y a lieu de prendre ces normes expérimentales en considération, ne serait-ce que pour en évaluer les difficultés éventuelles d'application.

1.7.5. Projet de directive européenne

Une proposition **CUE** modifiée de « **directive du Conseil concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques** » a été publiée au Journal officiel des Communautés européennes le 19 août 1994 (n° 94/C 230/03). Ce texte réglementaire une fois adopté en l'état ou encore modifié tiendra probablement compte des travaux du **CENELEC TC 211****.

* Il convient de remplacer, dans la suite du texte, les ENV devenues caduques depuis le 31/12/99 par les indices de classement en France NFC 18-600 et 18-610.

** Une recommandation du Conseil des communautés européennes de juillet 1999 ne concerne que l'exposition du public aux champs électromagnétiques.

2

CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES STATIQUES



2.1. DÉFINITIONS ET CARACTÉRISTIQUES

Ce sont des champs dont l'intensité reste toujours la même dans le temps. On ne leur attribue ainsi ni longueur d'onde, ni fréquence propre.

2.1.1. Champ électrique statique

Il est produit par tous les objets chargés électriquement, que cette charge soit naturelle (champ électrique atmosphérique) ou créée par l'homme (appareillage domestique ou professionnel). Il est mesuré en volts par mètre ($V \cdot m^{-1}$) et peut s'élever en milieu professionnel jusqu'à quelques dizaines de $kV \cdot m^{-1}$.

2.1.2. Champ magnétique statique

Il est produit par les aimants permanents ou tous les courants électriques continus naturels ou artificiels. Il est mesuré en ampères par mètre ($A \cdot m^{-1}$) dans le système international SI et en Oersted (Oe) dans l'ancien système CGS (révolu, mais pouvant encore être rencontré dans la littérature). L'intensité du champ est proportionnelle à l'intensité du courant électrique circulant dans un conducteur et inversement proportionnelle à la distance entre le point de mesure et ce conducteur suivant la formule :

$$H = \frac{i}{2 \pi r}$$

où : H est l'intensité de champ magnétique ($A \cdot m^{-1}$),
 i l'intensité du courant électrique (A),
 r la distance entre le point de mesure et le conducteur (m).

On peut aussi caractériser la densité de flux magnétique ou induction magnétique B à partir de la valeur de l'intensité de champ magnétique :

$$B = \mu \frac{i}{2 \pi r} = \mu H$$

où : B s'exprime en tesla (T) selon le système international SI et en Gauss (G) dans l'ancien système CGS,
 μ la perméabilité magnétique du milieu ;
dans le vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1} = 1,257 \cdot 10^{-6} H \cdot m^{-1}$ (henrys par mètre).

Tableau 4
Correspondance des unités SI et CGS

	T	G	A · m ⁻¹	Oe
T	1	10 ⁴	7,96 · 10 ³	10 ⁴
G	10 ⁻⁴	1	79,6	1
A · m ⁻¹	1,257 · 10 ⁻⁶	1,257 · 10 ⁻²	1	1,257 · 10 ⁻²
Oe	10 ⁻⁴	1	79,6	1

2.2. SECTEURS D'ACTIVITÉS CONCERNÉS

2.2.1. Champs électriques statiques

Ce type de champ est, pour une large part, d'origine naturelle. En cas d'orage, il est compris entre 100 V · m⁻¹ et 10 kV · m⁻¹ et plafonne en période de beau temps à 150 V · m⁻¹.

Dans les locaux professionnels de type classique, le champ électrique qui varie de 1 à quelques dizaines de V · m⁻¹ est généralement produit par des appareillages alimentés en Haute Tension (HT), tels les appareils et objets qui se chargent électrostatiquement et les consoles de visualisation par exemple.

Dans le secteur industriel, la distribution et l'utilisation du courant électrique continu sont à l'origine de champs électriques dont l'intensité peut atteindre des valeurs importantes suivant la tension utilisée.

2.2.2. Champs magnétiques statiques

Comme pour les champs électriques statiques, les champs magnétiques peuvent avoir une origine naturelle : le champ magnétique terrestre. En ce qui concerne les sources artificielles, l'usage en est encore limité mais ne fait que croître dans divers secteurs d'activités :

- Dans l'industrie de l'aluminium, l'utilisation de courants électriques continus de très forte intensité, par exemple au niveau des cuves d'électrolyse, crée des champs magnétiques très importants.
- L'industrie de fabrication des aimants, qu'ils soient permanents, résistifs ou supraconducteurs est, surtout dans le dernier cas, source de champs magnétiques.

- Dans le domaine scientifique, les expositions peuvent être beaucoup plus importantes à proximité des accélérateurs de particules, des systèmes de lévitation magnétique et des appareils d'imagerie et surtout de spectroscopie RMN où les champs peuvent atteindre 12 à 15 T, voire dépasser ces valeurs.

2.3. INTERACTIONS AVEC LES SYSTÈMES BIOLOGIQUES

2.3.1. Champs électriques statiques

Lorsqu'un corps ou un objet conducteur est situé dans un champ électrique, il se produit une migration des charges à la périphérie de ce corps (effet de peau) tendant à équilibrer les forces électrostatiques du champ incident.

La répartition des charges ainsi que leur signe dépendent :

- de la forme de l'objet : la concentration des charges étant d'autant plus grande que l'objet ou une de ses parties a un diamètre faible (doigt ou poil par exemple) ;
- des lignes de force du champ électrique qui dépendent de la situation de l'objet dans le champ. Si le corps est isolé de la terre (Figure 6a), les charges sont positives et négatives et leur répartition dépend de sa position dans le champ et par rapport à la terre. Si le corps est « à la terre » (Figure 6b), toutes les charges de surface sont négatives en continuité avec les charges terrestres.

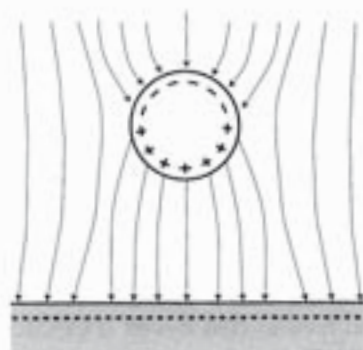


Figure 6a

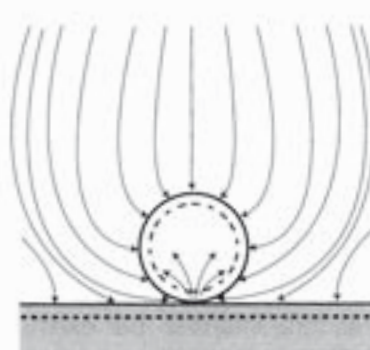


Figure 6b

Déformation des lignes de force d'un champ électrique par un corps conducteur et migration des charges à l'intérieur de ce corps

Lorsque le champ électrique atteint une certaine valeur, il entraîne une ionisation de l'air qui le rend conducteur. Ce phénomène entraîne un courant de décharge entre le corps isolé et un autre corps dont le potentiel est différent ou la terre. L'intensité de ce courant dépend de nombreux facteurs tels la forme et les dimensions de l'objet (effet de pointe) ainsi que des conditions atmosphériques. Habituellement ces courants de décharge surviennent pour des intensités de champ électrique de l'ordre de 500 à 1 200 kV/m. Leur perception par l'homme varie suivant les sujets.

2.3.2. Champs magnétiques statiques

La matière vivante est relativement transparente aux champs magnétiques qui n'interagissent qu'avec les charges électriques en mouvement et les matériaux ferromagnétiques, paramagnétiques ou diamagnétiques. Trois mécanismes ont été décrits :

Interaction avec les courants ioniques

Les champs magnétiques statiques, grâce aux forces de Lorentz agissant sur les charges électriques en mouvement, provoquent la création de champs électriques et de courants induits. Ainsi, au niveau de la crosse aortique, le champ électrique créé peut atteindre 7 à 16 mV · T⁻¹. Cependant sur le plan physiologique, cette interaction est extrêmement faible pour les champs magnétiques auxquels l'homme peut être soumis.

Effets magnéto-mécaniques

Dans un champ magnétique statique, les assemblages moléculaires à haut niveau d'anisotropie magnétique subissent une force qui les fait tourner jusqu'à ce qu'elles atteignent un niveau d'énergie minimal. Ainsi des modifications de la structure des enzymes et des vitesses de réactions métaboliques ont été évoquées ; cependant les calculs montrent que, jusqu'à 10 T, les effets sont négligeables à la température du corps. De même, pour certaines molécules telles que l'ADN, on a pu montrer qu'en solution, seules 1 % d'entre elles s'orientent dans un champ de 13 T.

En revanche, certaines structures (tels le segment externe des bâtonnets rétiens, des virus filamenteux, les hématies falciformes désoxygénées) sont réorientées à 100 % par des champs inférieurs à 1 T in vitro. Des études ont donc été réalisées chez des singes pour vérifier l'action des champs magnétiques sur la vision : jusqu'à 1,5 T aucune influence significative sur les phénomènes de phototransduction visuelle n'a pu être notée, cela étant vraisemblablement dû à la structure du tissu rétinien qui empêche les bâtonnets de répondre à la force développée par le champ magnétique.

Un autre effet magnéto-mécanique est lié aux gradients de champs spatiaux. Ceux-ci sont à l'origine de phénomènes de translation de substances ferro et paramagnétiques. Ainsi tout objet contenant ces substances est attiré par les champs magnétiques et peut se déplacer sur des distances importantes fonction de l'intensité du champ.

Interactions électroniques

Plusieurs types de réactions chimiques organiques sont influencés par les champs magnétiques statiques de l'ordre du mT du fait de leur action sur les états électroniques de spin des réactions intermédiaires. Ainsi il peut être obtenu une modification de la durée de vie de certains états intermédiaires entraînant des changements de la structure hyperfine de certaines molécules et par conséquent des réactions chimiques correspondantes. Ces effets, bien établis *in vitro* pour des réactions de chimie organique, n'ont pu être retrouvés de façon indiscutable au niveau des réactions métaboliques. De nombreuses études sont en cours dans ce domaine.

Indépendamment de ces études, des résultats contradictoires ont été retrouvés à propos des métabolismes cellulaires et tissulaires. Nombre des effets concernant la croissance cellulaire décrits vers les années 1960 n'ont pu être reproduits par la suite à des intensités de champs identiques, voire plus grandes.

Concernant la mutagenèse, des études portant sur des cultures de lymphocytes humains, de cellules ovariennes de hamster, de salmonelles, n'ont pas pu mettre en évidence une quelconque modification du taux des aberrations chromosomiques, des échanges entre chromatides sœurs, des transformations oncogéniques ou de toute autre mutation.

2.4. EFFETS PHYSIOLOGIQUES

2.4.1. Champs électriques statiques

Il existe peu d'expérimentations portant sur l'action biologique des champs électriques statiques.

2.4.1.1. Recherches expérimentales sur l'animal

- Si certaines modifications de la composition protéique du sérum ont été rapportées chez des rats soumis à des champs électriques de 2 à 20 kV · m⁻¹ du 22^e au 52^e jour de leur existence, celles-ci ne sont ni univoques, ni fiables. Par ailleurs chez des souris exposées pendant 5 000 heures à un champ électrique de 340 V · m⁻¹, aucune modification hématologique n'a pu être retrouvée.
- De même, il a été décrit chez des souris un accroissement de leur production d'anticorps si elles étaient soumises à un champ électrique de 2,4 kV · m⁻¹ et une diminution si on les plaçait dans un champ inférieur au champ électrique ambiant. Cependant, cet effet n'a pas été confirmé par d'autres expériences.

- Certains auteurs ont rapporté des modifications de l'EEG chez des rats soumis à des champs électriques de $10 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, mais les réponses varient selon les animaux. Cette dernière constatation ne permet aucune conclusion.
- Une autre étude portant sur des neurotransmetteurs dans diverses parties du cerveau de rats soumis à des champs électriques de $3 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ n'a apporté aucun résultat probant.

2.4.1.2. Études effectuées sur l'homme

Les champs électriques statiques induisent au niveau de la peau des personnes exposées l'apparition de charges électriques perceptibles surtout au niveau des poils et des cheveux. Une étude sur des volontaires a montré que le seuil de perception se situe à environ $20 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ et celui de sensations désagréables vers $25 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$. Dans les pays nordiques, il a été décrit un syndrome de sensibilité particulière aux champs électriques pouvant entraîner des signes généraux à type de rash cutané.

Une étude portant sur des travailleurs de l'ancienne URSS du textile fait état d'une augmentation de 6 % de syndromes hypertensifs par rapport à une population témoin et de 30 % de syndromes neurovégétatifs. Elle semble mettre en évidence une réduction de la résistance de la peau et un accroissement de la perspiration. Cependant il existe au moins dans cette étude deux facteurs confondants, l'humidité et la température.

Tout compte fait, peu d'études sur l'action des champs électriques statiques sur l'homme ont été effectuées. Cependant des volontaires ont été exposés à des champs électriques de $600 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ pendant 3 à 6 semaines sans aucune modification du rythme circadien appréciée par la température centrale et l'activité.

2.4.2. Champs magnétiques statiques

2.4.2.1. Études effectuées chez l'animal

Seuls quelques résultats ont pu être mis en évidence :

Sur le plan cardio-vasculaire

Pour des champs magnétiques supérieurs à 0,1 tesla (T), on a pu mettre en évidence chez des petits mammifères des modifications de l'ECG (accroissement de l'amplitude de l'onde T) qui sont réversibles jusqu'à 2 T. L'exposition de petits mammifères à des champs magnétiques de 1,5 T entraîne l'apparition d'un potentiel électrique, provenant d'un effet magnéto-hydrodynamique au niveau de la crosse de l'aorte. Celui-ci vient se surimposer à l'onde T de l'ECG, entraînant ainsi une apparente augmentation d'amplitude de cette onde.

Par ailleurs, des perturbations temporaires de l'ECG ont été décrites chez des singes soumis à des champs magnétiques de 4 à 7 T.

En revanche, sur le plan clinique aucune modification du rythme cardiaque ou de la pression artérielle n'a été retrouvée.

Sur le plan neurologique

Aucune modification de la conduction nerveuse ni des potentiels évoqués visuels n'a pu être mise en évidence. Des modifications de l'activité cérébrale ont été décrites mais demeurent contestées.

Sur le plan comportemental

Les effets de l'exposition de mammifères à des champs magnétiques statiques sur l'activité spontanée sur les rythmes circadiens, sur les réflexes conditionnés et sur les tests de vigilance, varient selon les équipes.

Sur le plan génétique

Il n'est pas noté de mutations dominantes létales chez la souris soumise pendant 28 jours à 1 T. Quant à l'apparition d'aberrations chromosomiques ou de modifications de l'index mitotique, les résultats varient avec les expérimentations.

Aucune action probante sur la reproduction et le développement fœtal de l'exposition aux champs magnétiques statiques n'a été démontrée.

Sur le plan carcinogénétique

Aucun effet inducteur ou promoteur n'a pu être prouvé ; il en est de même de l'influence des champs magnétiques statiques sur la croissance tumorale.

En ce qui concerne d'autres variations hématologiques ou immunologiques, ainsi qu'une élévation thermique modérée parfois retrouvées chez les animaux soumis à des champs magnétiques statiques, aucune n'a été clairement démontrée. On peut en effet s'interroger sur la part du mode de contention et du stress susceptibles d'influencer les résultats.

2.4.2.2. Études effectuées chez l'homme

Si on élimine volontairement toutes les publications faisant état de succès thérapeutiques obtenus grâce à l'application de champs magnétiques statiques du fait qu'elles ne présentent pas de garanties suffisantes, il n'existe que peu d'études s'intéressant aux effets de ces champs sur l'homme :

2.4.2.2.1. Expositions de courte durée à de fortes intensités de champ

Sur le plan cardio-vasculaire

- pour des champs magnétiques supérieurs à 0,1 T, on peut noter un accroissement de l'onde T et dans tous les cas, au-delà de 1 T, on retrouve une augmentation apparente de l'onde T de l'ECG liée à l'addition du potentiel cardiaque et du potentiel provenant du flux sanguin soumis au champ magnétique ;
- chez des volontaires sains soumis à des champs magnétiques de 1,5 T, le rythme cardiaque, la pression artérielle, la température centrale restent inchangés. Pour des champs magnétiques de l'ordre de 2 T, une aug-

mentation de 17 % du rythme cardiaque est retrouvée pendant l'exposition dans une étude alors qu'une autre ne relève aucune incidence clinique. En revanche, chez des sujets présentant des troubles du rythme, la survenue de perturbations cardio-vasculaires plus importantes est possible ;

- pour les champs magnétiques dépassant 5 T (par exemple en spectroscopie ou spectrométrie RMN), des perturbations cardio-vasculaires du type troubles du rythme peuvent survenir même chez les sujets sains ;
- enfin, des études portant sur la modification de la perfusion tissulaire des membres soumis à des champs magnétiques atteignant 1 T n'ont pas pu mettre en évidence l'action de ces champs.

Sur le plan neurologique

- une étude de la vitesse de conduction et de l'excitabilité nerveuse a été effectuée chez des volontaires dont l'avant-bras ou la jambe étaient soumis à un champ magnétique de 1 T. La vitesse de conduction n'a pas été modifiée mais en revanche, l'excitabilité nerveuse a été significativement augmentée dans tous les cas ;
- l'application d'un champ magnétique de 0,35 T sur la région temporale semble entraîner des modifications réversibles du potentiel évoqué auditif ;
- des perturbations de l'EEG ont été rapportées par certaines équipes après exposition de volontaires à des champs magnétiques de 200 mT, mais elles sont variables suivant les sujets ;
- en ce qui concerne le système neuro-végétatif, il a été décrit chez des travailleurs exposés à des champs magnétiques de 4 T des vertiges, des nausées, des phosphènes survenant lors de mouvements de la tête. Dans ce cas, il s'agit en fait de l'action des variations de l'induction magnétique B provoquées au niveau cérébral par ces mouvements. Tous ces signes disparaissent si la personne revient à une station immobile.

Sur le plan comportemental

Des volontaires soumis pendant 1 heure à des champs magnétiques de 0,15 T n'ont présenté aucune modification dans la réponse à des tests psychologiques, cognitifs ou mnésiques. En revanche, un certain nombre de personnes soumises à des champs magnétiques de 10 T se sont plaintes de sensations de malaise.

2.4.2.2.2. Expositions de longue durée

Il existe peu de données sur l'effet d'une exposition chronique de l'homme à des champs magnétiques statiques, tout au plus peut-on noter une étude de 1970 qui semblerait indiquer qu'un champ magnétique de 0,15 mT n'entraîne pas de modification du rythme circadien chez l'homme.

En conclusion, il ne semble pas qu'un champ magnétique statique et homogène inférieur à 2 T puisse entraîner de réactions physiologiques notables chez l'homme. Cependant il faut se rappeler que la notion même de champ statique est purement physique. En effet, pour une personne se déplaçant ou pivotant dans ce champ, l'organisme est soumis à une modulation aléatoire du champ en relation avec ses mouvements, ce qui limite l'intérêt pratique des études biologiques en champ réellement statique.

2.5. LIMITES D'EXPOSITION

2.5.1. Champs électriques statiques

Il n'existe pas en France ni sur le plan international de réglementation régissant l'exposition professionnelle aux champs électriques statiques.

La référence actuelle s'inspire de la prénorme **ENV 50166-1**. Ainsi le niveau de champ électrique statique dans l'air au voisinage de conducteurs électriques ou à proximité de la surface de pièces conductrices est pris en compte dans l'évaluation de la valeur limite d'exposition notée E_{VLE} , sachant que les arcs de décharge et les courants de contact en constituent des manifestations spectaculaires. On admet que la valeur limite d'exposition professionnelle quotidienne est :

$$E_{VLE} = 14 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$$

Si le temps d'exposition est limité pendant la journée de travail, cette VLE peut être dépassée pour atteindre au maximum $42 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ pour un temps d'exposition de 2 h 40 mn suivant l'inéquation $t < 112/E$. Cette valeur limite d'exposition est basée sur le niveau des courants électriques à la surface du corps et induits en profondeur, niveau en-dessous duquel il n'y a pas d'effet nocif pour la santé. Il est habituel d'admettre que les porteurs d'implants cardiaques ne doivent pas être soumis à un champ électrique dont l'intensité est supérieure à $1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$.

Les champs électriques d'intensité supérieure à une valeur de l'ordre de $5 \text{ à } 7 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ peuvent provoquer une augmentation des risques du fait des réactions humaines subites de retrait associées aux arcs de décharge et courants au contact de pièces conductrices non reliées à la terre. À ces risques complémentaires, il faut associer les dangers d'incendie et d'explosion résultant de la présence de matériaux combustibles qui peuvent s'enflammer sous l'effet d'arcs ou d'étincelles engendrés par des appareils électriques non protégés. Il convient d'apporter un soin particulier à l'élimination des objets non reliés à la terre ; il faut les relier à la terre ou utiliser des gants pour leur préhension. Des consignes d'utilisation des matériels de sécurité (combinaison de travail, gants et autres protections isolantes, etc.) sont nécessaires en cas d'intervention humaine dans des champs électriques dont l'intensité dépasse $15 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$.

2.5.2. Champs magnétiques statiques

Il n'existe pas en France de réglementation régissant l'exposition professionnelle aux champs magnétiques statiques.

De même que pour les champs électriques statiques, la prénorme **ENV 50166-1** constitue la référence actuelle. Sur le plan pratique, on peut

donc s'y référer dans l'attente d'une réglementation officielle en cours d'élaboration au niveau européen. La valeur limite d'exposition professionnelle quotidienne « corps entier », notée B_{VLE} , est :

$$B_{VLE} = 200 \text{ mT}$$

Si le temps d'exposition est limité pendant la journée de travail, cette VLE « corps entier » peut être dépassée pour atteindre au maximum 2 T. En ce qui concerne l'exposition des extrémités du corps humain, les membres en particulier, la VLE peut atteindre un maximum de 5 T.

Ces valeurs sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5
*Valeurs limites d'exposition professionnelle
aux champs magnétiques statiques*

Exposition professionnelle quotidienne	200 mT
Valeur plafond pour l'ensemble du corps	2 T
Valeur plafond pour les extrémités	5 T

Les personnes porteuses d'implants actifs ou d'implants passifs ferromagnétiques susceptibles de se déplacer, ne sont pas protégées efficacement par les limites fixées ci-dessus. En effet, le fonctionnement de certains appareillages peut être affecté par des valeurs de champ inférieures à quelques mT.

Au-delà de 3 mT, des précautions doivent être prises contre les dangers présentés par les objets métalliques volants (attirés par aimantation).

2.5.3. Éléments de métrologie

La mesure des champs électriques statiques peut s'effectuer à l'aide d'une sonde capacitive composée de deux demi-sphères isolées reliées au système de mesure. L'utilisation d'amplificateurs est nécessaire. L'appareillage peut être utilisé en mesure de champ ambiant à condition que l'opérateur se tienne suffisamment éloigné de l'appareil. La précision de la mesure est au mieux de l'ordre de 10 % (soit 1 dB : § 1.6.10.).

La mesure des champs magnétiques statiques est réalisée à l'aide de sondes à effet Hall ou avec une simple bobine au travers de laquelle on mesure le flux par évaluation de l'intensité induite dans les spires.

Malgré l'apparente simplicité des mesurages, ils ne peuvent être effectués que par du personnel technique formé et spécialisé.

Il doit être établi un balisage autour de la zone de champ de façon à signaler l'aire où une exposition du personnel est possible. Un pictogramme

réglementaire de signalisation doit être apposé conformément à l'arrêté ministériel du 4 novembre 1993 « Signalisation de sécurité et de santé sur les lieux de travail ».



Dessin noir sur fond jaune

2.6. MÉDECINE DU TRAVAIL

2.6.1. Champs électriques statiques

L'affectation durable du personnel à des postes de travail soumis à des champs électriques statiques intenses est rare. De plus, dans les chapitres précédents, il a été vu que leurs actions sur l'homme paraissent limitées. En particulier, le seuil de perception estimé à $20 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ reste en dessous de la valeur limite d'exposition préconisée par le CENELEC TC 211 ($42 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$) et constitue un indicateur sensible d'un éventuel danger pouvant prévenir toute exposition d'une durée significative. Il y a également lieu de constater que le degré hygrométrique de l'air ambiant et la présence de dispositifs de mise à la terre des matériels limitent considérablement l'action de tels champs à une distance relativement faible des parties accessibles des matériels.

L'absence de précédents en ce qui concerne la prise de décisions d'inaptitude professionnelle de salariés concernés autorise le médecin du travail à n'adopter, pour l'instant, qu'une position de veille en matière de suivi du personnel et des recherches scientifiques dans le domaine.

2.6.2. Champs magnétiques statiques

L'affectation d'un travailleur à un poste exposé à des champs magnétiques statiques d'intensité élevée ne peut être prononcée que s'il y a eu évaluation de l'ordre de grandeur de l'intensité effective du champ magnétique au poste de travail. Le médecin du travail aura donc intérêt à s'informer, auprès des services techniques compétents de l'entreprise, de l'impact résultant de l'implantation de sources émettrices (valeurs et répartition spatiale des champs, par exemple).

2.6.2.1. Salariés ne présentant aucune pathologie particulière

Le médecin du travail peut utilement se référer aux limites d'exposition recommandées par le CENELEC TC 211 en dessous desquelles aucune nuisance n'a pu être mise en évidence. Vu le peu d'informations disponibles et la faiblesse des modifications tangibles cliniques et biologiques observées, il paraît actuellement prématuré d'en déduire des contre-indications professionnelles. Le médecin du travail, tout en assurant le suivi médical de la santé des salariés, s'efforcera de se tenir régulièrement informé de l'avancée des recherches en cours dans ce domaine.

2.6.2.2. Porteurs d'un implant passif ferromagnétique

Il convient de distinguer deux catégories de matériels :

- matériels dont les déplacements dans les tissus mous sous l'effet du champ peuvent conduire à une situation grave (clip vasculaire, agrafes intra-cérébrales et digestives, prothèses ferromagnétiques odontologiques mobiles). Les déplacements de tels éléments étant liés à l'intensité du champ magnétique statique, il y a lieu de vérifier que celui-ci ne peut entraîner un tel phénomène. Dans le cas contraire, toute personne porteuse d'un matériel sensible doit être éloignée impérativement de la zone d'action du champ. Il y a donc, pour elle, une inaptitude absolue à ce poste de travail ;
- matériels de volume important (plaque d'ostéosynthèse, prothèse de contention osseuse) qui ne peuvent se déplacer car maintenus par des tissus résistants. Dans ces conditions, il n'existe aucun danger potentiel et il n'y a pas lieu de prononcer d'inaptitude.

2.6.2.3. Porteurs d'un implant actif

Pour les stimulateurs cardiaques, les prothèses auditives, les pompes à médicaments,... il convient de tenir compte de l'interaction possible entre le champ magnétique statique et les circuits électriques, voire électroniques, de l'appareillage. Il s'agit là de s'interroger sur la compatibilité électromagnétique du matériel. Vu la difficulté actuelle de connaître le seuil d'intensité de champ (de l'ordre de quelques mT, cf. § 2.5.2.) pour lequel un appareil donné peut voir son fonctionnement modifié, il est souhaitable de prononcer l'inaptitude au poste de travail en cas de première affectation.

Dans le cas contraire, c'est à dire pour le personnel en place venant de subir une implantation, il y a lieu, avant de se prononcer, de faire procéder à une étude de poste plus poussée et d'éventuellement faire appel à une consultation spécialisée en pathologies professionnelles.

2.6.2.4. Femmes enceintes

L'existence de malformations congénitales spontanées, qu'on ne peut discerner d'éventuelles malformations acquises, entraîne un contexte psychologique particulier lié à la grossesse. Il semble donc préférable, dans le cadre d'une politique de prudence et dans l'attente d'une meilleure connaissance scientifique, de conseiller de les écarter des postes de travail exposés. Actuellement, on ne peut que constater :

- les très faibles connaissances scientifiques disponibles relatives aux effets des champs magnétiques statiques sur le développement foetal ;
- l'absence presque totale de renseignements concernant l'influence des gradients de champs temporels et spatiaux sur les organismes en voie de développement, alors que plusieurs expérimentations semblent avoir montré, en particulier au niveau de la multiplication cellulaire, leur efficacité biologique.

2.6.3. Recueil et analyse des informations : « vigilance industrielle »

Il convient de rappeler l'importance de la participation du médecin du travail aux systèmes de recueil et de traitement des observations d'accidents ou troubles liés aux champs statiques, ou de manifestations cliniques pouvant leur être imputées, pour orienter les recherches et améliorer les connaissances en ce domaine.

2.7. BIBLIOGRAPHIE

ACGIH. - Threshold limite values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices, 1993-1994.

Atkins P. - « Magnetic field effects ». *Chem. Br.*, 12, 214, 1976.

Bailey W.H. and Charry J.M. - « Behavioral monitoring of rats during exposure to air ions and DC electric fields ». *Bioelectromagnetics*, 7, 329, 1986.

Barnothy M.F. - « Haematological changes in mice ». In *Biological Effects of Magnetic Fields* (Barnothy M.F., ed), Volume 1. New York, *Plenum Press*, p. 109, 1964.

Barnothy M.F. and Sumegi I. - « Effect of the magnetic field on internal organs and the endocrine system of mice ». In *Biological Effects of Magnetic Fields* (Barnothy M.F., ed), Volume 2. New York, *Plenum Press*, p. 103, 1969.

Beischer D.E. - « Vectocardiogram and aortic blood flow of squirrel monkeys (*Samiri sciureus*) in a strong superconductive electromagnet ». In

Biological Effects of Magnetic Fields (Barnothy M.F., ed), Volume 2. New York, *Plenum Press*, p. 241, 1969.

Beischer D.E. and Knepton J.C. Jr. - « Influence of strong magnetic fields on the electrocardiogram of squirrel monkeys (*Samiri sciureus*) ». *Aerosp. Med.*, 35, 939, 1964.

Beischer D.E. and Knepton J.C. Jr. - « The electroencephalogram of the squirrel monkey (*Samiri sciureus*) in a very low magnetic field ». Pensacola, Florida, NASA/Naval Aerospace Research Laboratory, NASA Order N° R-39, 1966.

Besson J.A.O., Foreman E.I., Eastwood L.M., Smith F.W. and Ashcroft G.W. - « Cognitive evaluation following NMR imaging of the brain ». *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, 47, 314, 1984.

Brown F.A. Jr. and Scow K.M. - « Magnetic induction of a circadian cycle in hamsters ». *J. Interdiscipl. Cycle Res.*, 9, 137, 1978.

CENELEC ENV 50166-1.
(Classement UTE : C 18-600)

– « Exposition humaine aux champs électromagnétiques Basses fréquences (0 Hz à 10 kHz) ».

Chagneux R., Chagneux N. and Chalazonitis N. – « Decrease in magnetic anisotropy of external segments of the retinal rods after total photolysis ». *Biophys. J.*, 18, 125, 1977.

Chalazonitis N., Chagneux R. and Arvanitaki A. – « Rotation des segments externes des photorécepteurs dans un champ magnétique constant ». *C. R. Acad. Sci. (Paris) Ser D*, 271, 130, 1970.

Dowse H.B. and Palmer J.D. – « Entrainment of circadian activity rhythms in mice by electrostatic fields ». *Nature*, 222, 564, 1969.

Eberle P. and May C. – « SCE-frequencies following exposure to homogeneous high strength magnetic fields ». *Sister-chromatid-exchange test, Workshop Gesellschaft für Umwelt-Mutationsforschung*, 1980, 2, 1982.

Edelman A., Teulon J. and Puchalska I.B. – « Influence of the magnetic fields on frog sciatic nerve ». *Biochem. Biophys. Res. Comms.*, 91, 118, 1979.

Fam W.Z. – « Prolonged exposure of mice to 340 kV m⁻¹ electrostatic field ». *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, BME-28, 453, 1981.

Friedman H. and Carey R.J. – « Biomagnetic stressor effects in primates ». *Physiol. Behav.*, 9, 171, 1972.

Gaffrey C.T. and Tenforde T.S. – « Bioelectric properties of frog sciatic nerves during exposure to stationary fields ». *Radiat. Environ. Biophys.*, 22, 61, 1983.

Gaffrey C.T. and Tenforde T.S. – « Changes in the electrocardiograms of rats and dogs exposed to DC magnetic fields ». Berkeley, University of California, Lawrence Berkeley Laboratories, LBL-9085, 1979.

Gaffrey C.T. and Tenforde T.S. – « Alterations in the rat electrocardiogram induced by stationary magnetic

fields ». *Bioelectromagnetics*, 1, 357, 1981.

Gaffrey C.T., Tenforde T.S. and Dean E.E. – « Alterations in the electrocardiograms of baboons exposed to DC magnetic fields ». *Bioelectromagnetics*, 1, 209, 1980.

Gagny C. – « Immunité des stimulateurs cardiaques aux perturbations électromagnétiques. La situation ». INRS, DMT (à paraître).

Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields, document ICNIRP, Health physics, janvier 1994, 66,1, 100-106.

Haberdtz W. – « Enzyme activity in high magnetic fields ». *Nature*, 213, 72, 1967.

Hée G., Barbara J.J., Gros P. – « Valeurs limites d'exposition en ambiance de travail ». INRS, *Cahiers de notes documentaires*, 148, ND 1886, 1992.

Hong C.Z. and Shellock F.G. – « Short-term exposure to a 1,5 tesla static magnetic field does not affect somato-sensory evoked potentials in man ». *Magn. Reson. Imag.* (to be published).

« Signalisation de sécurité et de santé sur les lieux de travail ». INRS, *Cahiers de notes documentaires*, 153, ND 1947, 1993.

Jehenson P., Duboc D., Lavergne T., Guize L., Guerin F., Degeorges M. and Syrota A. – « Change in human cardiac rhythm induced by a 2 T static magnetic field ». *Radiology*, 166, 227, 1988.

Klitzing von L. – « Static magnetic fields influence the evoked potential of man ». In *Biophysical Effects of Steady Magnetic Fields, Proceedings Workshop, Les Houches, France, February-March 1986* (G. Maret, J. Kiepenheuer, and N. Boccara, eds). London, Springer-Verlag, p. 122, 1986.

Klitzing von L. – « Static magnetic fields increase the power intensity of EEG of man ». *Brain Res.*, 438, 201, 1989.

Konermann G. and Monig H. –

- « Studies on the influence of static magnetic fields on prenatal development of mice ». *Radiology*, 26, 490, 1986.
- Kowalczyk C.I., Sienkiewicz Z.J., Saunders R.D. — « Biological effects of exposure to non ionizing electromagnetic fields and radiation, 1. Static electric and magnetic fields ». Document NRPB-R238, juillet 1991.
- Liberman E.A., Vaintsvaig M.N. and Tsofina L.M. — « The effect of a constant magnetic field on the excitation threshold of isolated frog nerve ». *Biofizika*, 4, 505, 1959.
- Lott J.R. and McCain H.B. — « Some effects of continuous and pulsating electric fields on brain wave activity in rats ». *Int. J. Biometeor.*, 17, 221, 1973.
- Lott J.R. and Hines G. — « Effects of short term exposure to an external electric field on rat brain activity ». In *Dosimetry, Radionuclides and Technology, Sessions E Proceedings 7th ICRR* (J.J. Broerse, G.W. Barendsen, H.B. Kal and A.J. van der Kogel, eds), Amsterdam, July 1983. Netherlands, Martinus Nijhoff, Abstract E8-08, 1983.
- Mastryukova V.M. and Rudneva S.V. — « Effect of a strong magnetostatic field on proliferation of duodenal cells in mice ». *Biol. Bull. Acad. Sci. USSR*, 5, 371, 1978.
- McLauchlan K.A. — « The effects of magnetic fields on chemical reactions ». *Sci. Prog. (Oxford)*, 67, 509, 1981.
- Mileva M., Bulanova M. and Ivanov B. — « Permanent magnetic field (PMF) exposure *in vitro* to the genetic structures of somatic cells ». *Mutat. Res.*, 147, 309, 1985.
- Nakagawa M. and Matsuda Y. — « A strong static-magnetic field alters operant responding by rats ». *Bioelectromagnetics*, 9, 25, 1988.
- Olcese J., Reuss S. and Vollrath L. — « Evidence for the involvement of the visual system in mediating magnetic field effects on pineal melatonin synthesis in the rat ». *Brain res.*, 333, 382, 1985.
- Roberts A.M. — « Effect of electric fields on mice ». *Nature*, 223, 639, 1969.
- OMS. — « Magnetic fields ». *Environmental health criteria*, 69, 1987.
- Rosen A.D. and Lubowsky J. — « Magnetic field influence on central nervous system function ». *Expl. Neurol.*, 95, 679, 1987.
- Rudolph K., Wirz-Justice A., Krauchi K. and Feer H. — « Static magnetic fields decrease nocturnal pineal cAMP in the rat ». *Brain Res.*, 446, 159, 1988.
- Saunders R.D. and Cass A. — « Magnetic field interactions with living systems ». Chilton, NRPB-M96, 1983.
- Schwartz J.L. — « Influence of a constant magnetic field on nervous tissues : I. Nerve conduction velocity studies ». *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, BME-25, 467, 1978.
- Shellock F.G., Schaefer D.J. and Gordon C.J. — « Effect of a 1.5 T static magnetic field on body temperature of man ». *Magn. Reson. Med.*, 3, 644, 1986.
- Shellock F.G. and Crues J.V. — « Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical MR imaging at 1.5 T ». *Radiology*, 163, 259, 1987.
- Shellock F.G., Schaefer D.J. and Crues S.V. — « Exposure to a 1.5 T static magnetic field does not alter body and skin temperatures in man ». *Magn. Reson.*, 11, 371, 1989.
- Smirnova N.P. — « Behaviour of rats in "open field" following the action of magnetic field ». *Zh. Vyssh. Nervoi. Deyat. Im. I P Pavlova*, 32, 72, 1982.
- Stojan L., Sperber D., Dransfield K. and Sommer W. — « Magnetic-field-induced changes in the human auditory evoked potentials ». *Naturwissenschaften*, 75, 622, 1988.
- Tenforde T.S. — « Thermoregulation in rodents exposed to high-intensity stationary magnetic fields ». *Bioelectromagnetics*, 7, 341, 1986.
- Tenforde T.S. and Budinger T.F. — « Biological effects and physical

safety aspects of NMR imaging and in vivo spectroscopy ». In *NMR in Medicine : Instrumentation and Clinical Applications* (S.R. Thomas and R.L. Dixon, eds). New York, American Association of Physicists in Medicine Monograph N° 14, p. 493, 1986.

Tenforde T.S. and Shrifrine M. – « Assessment of the immune responsiveness of mice exposed to a 1,5 tesla stationary magnetic field ». *Bioelectromagnetics*, 5, 443, 1984.

Tenforde T.S., Gaffey C.T., Moyer B.R. and Budinger T.F. – « Cardiovascular alterations in Macaca monkeys exposed to stationary magnetic fields : Experimental observations and theoretical analysis ». *Bioelectromagnetics*, 4, 1, 1983.

Welker H.A., Semm P., Willig R.P., Comments J.C., Wilkschko W. and Vollrath L. – « Effects of an artificial

magnetic field on serotonin N-acetyltransferase activity and melatonin content of the rat pineal gland ». *Exp. Brain Res.*, 50, 426, 1983.

Wever R. – « The effects of electric fields on circadian rhythmicity in men ». *Life Sci. Space Res.*, 8, 177, 1970.

Wikswo R.L. and Barach J.P. – « An estimate of the steady magnetic field strength required to influence nerve conduction ». *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, BME-27, 722, 1980.

Wunsch-Binder F. – « The influence of static and magnetic fields on skin temperature and blood flow in man ». In *Biophysical Effects on Steady Magnetic Fields, Proceedings Workshop, Les Houches, France, February-March 1986* (G. Maret, J. Kiepenheuer and N. Boccard, eds). London, Springer-Verlag, p. 125, 1986.

3

CHAMPS ET RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES ELF



3.1. DÉFINITIONS ET CARACTÉRISTIQUES

Parmi les champs et rayonnements électromagnétiques auxquels sont soumises journellement la plupart des personnes vivant dans le monde industrialisé, ceux d'extrêmement basses fréquences qu'on dénomme ELF (Extremely Low Frequency) sont à l'origine d'expositions habituelles. Leurs fréquences sont comprises conventionnellement entre 0 Hz et 10 kHz, soit des longueurs d'ondes s'étalant de 30 km à l'infini.

Lors des orages, on peut observer une augmentation importante de l'émission électromagnétique dans une large bande de fréquences dont la limite supérieure peut atteindre 3 kHz.

C'est l'électricité industrielle et domestique, son transport et son utilisation qui sont essentiellement la cause de ces expositions. En Europe sa fréquence est de 50 Hz (60 Hz aux Etats-Unis d'Amérique) et sa longueur d'onde théorique est de 6 000 km. De ce fait, la mesure des champs est toujours effectuée en zone dite de « champ proche » où il n'existe aucune relation simple entre la valeur du champ électrique et celle du champ magnétique. Ces deux types de champs doivent donc être considérés séparément.

3.1.1. Champ électrique ELF

Il est lié à l'existence d'une distribution de charges électriques avec une intensité de champ fonction de la tension et de la configuration de la source. Il est perturbé par la présence d'objets conducteurs tels que la végétation ou les bâtiments.

Pour le corps humain, il se crée à sa surface une distorsion des champs qui est d'autant plus importante que la résistance électrique du corps par rapport à la terre est faible. Cette distorsion est maximale au niveau de la tête. De plus, l'exposition dépend de la position du corps par rapport au champ électrique et aussi de ses mouvements dans le champ. Cela explique qu'à la périphérie de la tête d'un homme debout parallèlement à la direction du champ électrique, l'intensité peut atteindre $180 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ alors que la valeur moyenne de cette intensité à une certaine distance est de $10 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$. Ce champ électrique induit également dans le corps humain des courants dont la direction est globalement dans l'axe du corps et dont l'intensité varie selon leur circulation dans les différentes parties de ce corps (Figure 7a).

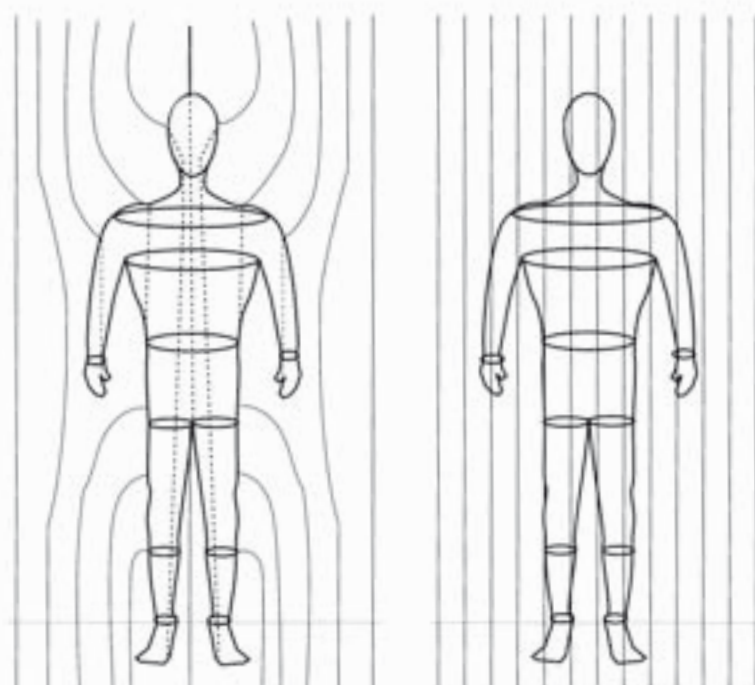


Figure 7a
Champ électrique

Figure 7b
Champ magnétique

*Courants induits dans le corps humain soumis
à des champs électromagnétiques ELF*

3.1.2. Champ magnétique ELF

Il est généré par le déplacement de charges électriques ou courant et son intensité est fonction de l'intensité du courant et de la distance du point de mesure par rapport à la source. Il est exprimé en ampères par mètre ($A \cdot m^{-1}$). Il peut traverser sans distorsion notable les murs, la terre ou la végétation.

Il induit dans le corps humain des courants qui sont perpendiculaires au champ magnétique et qui se déplacent de façon circulaire (Figure 7b).

Il est à noter, que pour les animaux, ces courants induits dépendent aussi de leur taille. Cela entraîne des difficultés d'extrapolation des résultats à l'homme.

3.2. SECTEURS D'ACTIVITÉS CONCERNÉS

En Europe, les ELF de 50 Hz sont principalement mises en oeuvre dans :

- les alternateurs ;
- les lignes de transport de l'électricité ;
- les transformateurs ;
- les moteurs électriques ;
- les équipements de soudage en ELF ;
- les processus industriels inductifs en ELF.

3.2.1. Usages domestiques

Les populations sont, à des degrés divers, continuellement exposées aux ELF.

A 50 Hz, les champs électriques et magnétiques naturels sont extrêmement faibles et de l'ordre de $1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ et 10 pT ($1 \text{ pT} = 1 \text{ picotesla} = 10^{-12} \text{ T}$).

Au regard de ces dernières valeurs, les champs créés par le courant électrique et les appareils électroménagers sont nettement plus élevés :

- A 50/60 Hz, le tableau 6 donne le niveau d'exposition existant à 30 cm de quelques appareils. Il convient à ce propos de remarquer la place particulière qu'occupe la couverture chauffante électrique dont les intensités de champ électrique et d'induction magnétique peuvent atteindre respectivement $250 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ et $25 \text{ } \mu\text{T}$.

Les champs émanant des lignes de distribution d'électricité sont fonction de la tension de ligne. Il faut cependant remarquer que les murs des résidences produisent un effet de bouclier contre le champ électrique et que c'est le câblage électrique de l'intérieur de la maison qui est responsable en majeure partie du champ y existant. Le champ magnétique, au contraire, passe librement à travers les murs. Ainsi, une campagne de mesures effectuée au Québec a montré qu'à l'intérieur des maisons, l'intensité de champ électrique se situe en moyenne à $31,6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, avec un maximum à $250 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, et l'induction magnétique à $0,16 \text{ } \mu\text{T}$, avec un maximum à $1,08 \text{ } \mu\text{T}$.

- Les plaques de cuisson par induction peuvent développer une densité de flux magnétique qui peut atteindre $130 \text{ } \mu\text{T}$ au niveau de la tête et $2300 \text{ } \mu\text{T}$ au niveau des mains. La répartition de ce champ dépend autant des caractéristiques de l'appareil que de la forme de la casserole utilisée et de sa position par rapport au centre de la plaque. Cependant, il convient de remarquer que ces matériels qui utilisent des champs magnétiques d'une fréquence comprise entre 25 et 50 kHz auraient dû figurer logiquement au chapitre suivant (Ondes radioélectromagnétiques RF et HF). Toutefois le mode d'action des champs magnétiques qu'ils mettent en oeuvre s'apparente davantage à celui des ELF, ce qui justifie de les évoquer ici.

Tableau 6
Niveaux moyens d'émission à 30 cm des appareils
électrodomestiques courants

Type d'appareil	Champ électrique (V · m ⁻¹)	Champ magnétique (μT)
Fer à repasser	60	0,06 à 0,7
Sèche-cheveux	40	0,01 à 7
Rasoir électrique	40	0,08 à 9
Robot domestique	50	0,6 à 10
Réfrigérateur	60	0,01 à 0,25
Télévision couleur	30	0,04 à 2
Couverture chauffante	200 à 250	15 à 25
Plaques à induction	1 à 3	130 à 2 300

- Quant aux sèche-cheveux, ils peuvent provoquer une induction magnétique atteignant 1 à 2 mT à 3 cm de la tête (distance minimale d'utilisation).
- A proximité des écrans de visualisation et plus particulièrement des téléviseurs, il y a émission de champs et rayonnements électromagnétiques dans différentes gammes de fréquences. Dans celle des ELF, on note des intensités de champ électrique de l'ordre de plusieurs volts par mètre, dues aux bobines de déviation trame et ligne et au transformateur d'alimentation.

3.2.2. Domaine professionnel

En milieu professionnel, les niveaux d'émission sont de l'ordre de 1 à 130 mT pour le chauffage par induction dont la fréquence est inférieure à 10 kHz, les presses électriques, les soudeuses, ... et de 0,03 à 1,5 kV · m⁻¹ pour un grand nombre d'installations électriques, en particulier près des transformateurs et des lignes de transport d'énergie électrique.

L'intensité de champ électrique provoquée par ces dernières est fonction de la tension, soit de 4 à 6 kV · m⁻¹ au niveau du sol sous un conducteur de 250 kV alors qu'elle atteint 7 à 10 kV · m⁻¹ sous un conducteur de 400 kV.

Enfin, il convient de noter que l'intensité des champs diminue très rapidement en raison du carré de la distance par rapport à la source.

3.3. INTERACTIONS AVEC LES SYSTÈMES BIOLOGIQUES

3.3.1. Action sur les cellules de l'immunité

Il a été mis en évidence « in vitro » :

- une diminution de la cytotoxicité des lymphocytes T exposés à des champs de 60 Hz, avec établissement d'une relation dose/effet ;
- une diminution de la capacité des lymphocytes T à neutraliser les cellules cancéreuses.

Ces résultats n'ont cependant pas pu être reproduits chez l'animal « in vivo ».

3.3.2. Action sur le métabolisme cellulaire

Certaines expérimentations ont montré que l'exposition à des champs électriques de 60 Hz de faible intensité ($0,7 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$) pouvait entraîner un certain nombre de troubles fonctionnels cellulaires tels que des modifications de la respiration, du flux protoplasmique, ..., alors que d'autres n'ont retrouvé aucune action des champs électriques ou des champs magnétiques. Ces résultats contradictoires ne permettent pas de savoir si le métabolisme et la croissance cellulaire sont ou non sensibles aux champs électriques et magnétiques de faible intensité.

A titre indicatif, et pour des valeurs plus importantes de 10 à $100 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, des rotations et des fusions cellulaires induites par les champs électriques ont été rapportées.

3.3.3. Action sur la synthèse des protéines

Aucune modification de l'ADN n'a été retrouvée sous l'action des ELF. Il en est de même des « enzymes de l'ADN », notamment celles concernant les mécanismes de réparation.

En ce qui concerne l'ARN, une augmentation de sa transcription a pu être observée dans certaines conditions, avec majoration de la biosynthèse des protéines à l'intérieur des cellules, mais cette action n'a pu être retrouvée chez l'animal.

Dans ces conditions, toute action cancérigène directe semble pouvoir être exclue.

3.3.4. Action sur la membrane cellulaire et les flux calciques

Les résultats expérimentaux suggèrent que la membrane cellulaire est la cible principale de l'interaction des champs électromagnétiques avec les

cellules. En particulier, le flux calcique transmembranaire est affecté par l'exposition à certaines ELF.

Certaines cellules, et notamment les cellules du tissu cérébral, soumises à des champs électromagnétiques d'une fréquence de 16 Hz et de ses harmoniques, ont montré une diminution significative du flux des ions Ca^{++} à travers leur membrane cellulaire.

Un effet comparable se retrouve lorsque les cellules sont soumises à un rayonnement d'hyperfréquences modulées en ELF (cf. chapitre 4). Cependant, aucune modification des processus physiologiques censés être dépendants du calcium n'a été retrouvée.

Plusieurs expériences décrivent l'apparition d'un phénomène uniquement pour un niveau d'intensité donnée et/ou pour une fréquence donnée. C'est ce qu'on appelle « **l'effet fenêtre** ». Cet effet ne répond pour l'instant à aucune systématisation et c'est là que réside toute la difficulté pour l'appréciation des modifications effectives et la prévision exacte desdits phénomènes.

En conclusion, de telles études effectuées « in vitro » sont extrêmement intéressantes pour évaluer les interactions fondamentales entre les tissus vivants et les ELF et pour en préciser les mécanismes biologiques. En revanche, l'extrapolation de ces résultats à l'homme est très aléatoire compte tenu du fait que les relations dosimétriques entre les deux systèmes sont encore très mal connues et que les études cellulaires ne prennent pas en compte l'intégration des systèmes physiologiques humains.

3.4. EFFETS PHYSIOLOGIQUES

3.4.1. Etudes sur l'animal

3.4.1.1. Effets neurologiques, neuroendocriniens et neuropsychologiques

- L'étude des **ondes cérébrales** à l'aide de tracés EEG ne montre aucune modification lorsque de petits animaux sont soumis aux ELF. De même, l'étude des potentiels évoqués auditifs et visuels ne révèle aucune variation liée à l'exposition. En revanche, l'étude des potentiels d'action au niveau des jonctions synaptiques montre un accroissement de l'excitabilité neuronale chez les animaux exposés, ce phénomène étant isolé.

- En ce qui concerne **les hormones et les neurotransmetteurs**, l'exposition d'animaux à des ELF a permis de mettre en évidence un certain nombre de modifications métaboliques mais celles-ci sont généralement transitoires et ne semblent pas entraîner de troubles cliniques nets.

- Au niveau de la mélatonine sérique, les observations sont les plus probantes et les plus reproductibles. Cette molécule est impliquée dans l'établissement du rythme circadien (variations circadiennes de différentes hormones, rythme nyctéméral). Chez des rats exposés à des champs électriques ELF d'intensités de 1,5 et 40 kV · m⁻¹, on note une diminution de la production nocturne de mélatonine qui n'intervient qu'après 2 à 3 semaines d'exposition. Après cessation de cette dernière, le retour à la normale s'effectue en quelques jours. Une réponse similaire est obtenue avec une induction magnétique tournante de 40 mT réalisée par rotation d'un aimant.
- Les produits du métabolisme de la sérotonine et de la dopamine semblent diminués dans le liquide céphalo-rachidien de macaques exposés pendant 3 fois 21 jours à un champ électrique d'une intensité de 3 kV · m⁻¹ et une induction magnétique de 10 à 90 mT. Il est apparu qu'une partie seulement de ces produits retrouve des taux normaux un certain temps après l'arrêt de l'exposition.
- Les taux cérébral et sérique de l'acétylcholinestérase sont diminués chez le rat exposé 30 minutes par jour pendant 60 jours à des champs électriques d'une intensité de 15 kV · m⁻¹. Un retour à la normale est obtenu un mois après la fin de l'exposition.
- Certains auteurs ont constaté, chez des rats exposés à des champs électriques dont les intensités sont de 50 V · m⁻¹, 5,3 kV · m⁻¹ et 100 kV · m⁻¹, une augmentation de l'adrénaline sérique. Cependant, après 10 jours d'exposition, les valeurs se normalisent et s'inversent.
- Les hormones glucocorticoïdes ne semblent pas subir de variation lors d'une exposition aiguë. En revanche, l'exposition chronique semble entraîner des modifications mais ces résultats sont contestés.

• **L'étude anatomopathologique** des tissus cérébraux ne montre dans la majorité des études aucune lésion remarquable.

• **Sur le plan comportemental**, le seuil de perception du champ électrique varie selon les différentes races animales (4 à 10 kV · m⁻¹ pour les rats, 25 à 35 kV · m⁻¹ pour les souris, les cochons et les poules). Cependant, il semble que ce seuil soit variable en fonction d'autres facteurs environnementaux, tels l'humidité, de la sensibilité individuelle et de la position de l'animal dans le champ. A de fortes intensités, soit de 15 à 60 kV · m⁻¹, certaines modifications comportementales peuvent être observées mais elles sont transitoires et ne sont pas pathologiques. A de faibles intensités, soit de 7 à 100 V · m⁻¹, aucun effet notable n'est signalé. Chez le singe, il peut se produire une baisse passagère des performances liée au temps d'adaptation.

A la suite de la mise en cause des ELF dans la survenue de troubles du rythme circadien chez l'homme, un certain nombre d'études sur l'animal ont montré, outre la diminution de la production nocturne de mélatonine, que l'exposition des singes à des champs électriques d'intensités de 26 et 39 kV · m⁻¹, associée à une induction magnétique de 100 µT, entraîne des modifications significatives de leurs rythmes circadiens. Des effets similaires se retrouvent chez le rat et la souris soumis à des champs électriques d'une intensité de 35 kV · m⁻¹.

3.4.1.2. Effets sur la reproduction

La majorité des études est en faveur d'une absence de troubles chez les rats exposés, les paramètres suivants ayant été contrôlés :

- les malformations ;
- la taille des portées ;
- la mortalité précoce des descendants ;
- le sex ratio des descendants ;
- le poids de naissance des descendants.

Plusieurs études ont porté sur des embryons de poulet mais n'ont pas donné de résultats statistiquement significatifs du fait de leur grande variabilité en fonction des protocoles d'expérimentation. Ces résultats sont donc à considérer avec précaution et doivent être confirmés par de nouvelles études. A fortiori, l'extrapolation à l'homme n'est pas possible pour l'instant.

3.4.1.3. Effets sur la carcinogénèse

Il semble peu probable que l'exposition aux ELF soit à l'origine d'une initiation des cancers, aucune altération de l'ADN n'ayant jamais été mise en évidence avec ce type de rayonnement. Par contre, il se pourrait que l'exposition aux ELF modifie l'évolution du processus entamé. La question se poserait alors en termes de promotion ou de co-promotion.

Les résultats expérimentaux obtenus sur des tumeurs animales soumises « in vivo » aux ELF sont variables et semblent dépendre des protocoles, de telle sorte qu'il n'est pas possible actuellement de préciser le rôle des ELF dans les processus de carcinogénèse.

Des altérations de la transcription de l'ARN ou l'abaissement du taux nocturne de mélatonine ont pu être évoqués pour supporter l'éventuel effet carcinogène des ELF mais aucune preuve formelle n'a pu être apportée à ce jour.

3.4.1.4. Autres effets

Aucune variation des constantes hématologiques et immunitaires n'a pu être mise en évidence après exposition d'animaux aux ELF. Toutefois, des perturbations modestes et transitoires des paramètres cardio-vasculaires et hémodynamiques (tension artérielle) ont pu être notées.

3.4.2. Etudes sur l'homme

3.4.2.1. Champs et courants induits, seuil de perception

Les ELF induisent dans le corps humain des courants qui varient en fonction des organes et des tissus. Un champ électrique extérieur dont l'intensité est de $1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ induit, en moyenne, des courants de $16 \mu\text{A}$, c'est-à-dire nettement inférieurs aux courants physiologiques. Cependant, il convient de remarquer que les courants induits sont sinusoïdaux contrairement à ces derniers.

Lorsque le champ électrique a une intensité plus élevée, il peut mettre en

vibration les poils permettant ainsi la perception du champ inducteur. Cependant le seuil de perception varie beaucoup suivant les individus : 10 % des sujets ressentent des champs électriques dont l'intensité est inférieure à 10 ou 15 kV · m⁻¹ alors que 5 % seulement perçoivent des champs dont l'intensité est de l'ordre de 3 à 5 kV · m⁻¹. Ce seuil dépend par ailleurs de la position relative des membres, de la tête et du tronc ainsi que de facteurs d'environnement comme l'humidité. Il est en moyenne de 7 kV · m⁻¹ pour les poils et de 23 kV · m⁻¹ pour les cheveux.

Lorsque les courants induits dépassent 1 mA, par effet pointe, la personne exposée peut ressentir une microdécharge au contact d'un objet métallique ou des picotements au niveau des discontinuités des vêtements ou des lunettes. Ces microdécharges peuvent être perçues suivant les individus comme désagréables ou douloureuses. Elles peuvent entraîner un état de « stress » ou de nervosité pouvant influencer sur l'activité. Le seuil de perception se situe pour 10 % des sujets testés entre 0,6 et 1,5 kV · m⁻¹ avec un seuil de réactivité de l'ordre de 2 à 3,5 kV · m⁻¹ dépendant, en particulier, de l'état d'hydratation de la peau.

Au-dessus de 6 à 9 mA, des contractions musculaires involontaires peuvent survenir. Elles peuvent entraîner le « lâcher-prise » d'un objet.

3.4.2.2. Modifications neurologiques, psychologiques et neuroendocriniennes

Dans les pays de l'Est, on a décrit un syndrome clinique associant diverses manifestations subjectives (irritabilité, apathie, asthénie, insomnie, baisse de la libido, troubles digestifs divers, ...) dont la relation de manière certaine avec l'exposition aux ELF est très difficile à déterminer compte tenu de l'absence de spécificité de ce syndrome neuro-végétatif.

Des expositions prolongées à des fréquences de 10 Hz et 60 Hz ont révélé une diminution du pic nocturne de mélatonine mais sans retentissement clinique apparent. Cela pose le problème de la signification, en terme de pathologie, des modifications biologiques ou physiologiques observées.

Les différentes études mettant en jeu les fonctions mentales, telles que la capacité de mémoire, d'attention, de décision, de raisonnement ainsi que les troubles de l'humeur et du sommeil, n'ont pas permis de constater d'effets significatifs par rapport à une population témoin.

Seules ont pu être notées des modifications d'amplitude et de latence de certains potentiels EEG pendant et après exposition à un champ électromagnétique de 9 kV · m⁻¹ et 20 µT exclusivement.

3.4.2.3. Autres effets

Dans les conditions expérimentales précédentes, il a été observé une baisse très légère de la fréquence cardiaque (3 à 5 battements par minute). Cependant, des études concernant l'influence de l'exposition aux ELF sur le débit cardiaque, la tension artérielle ou l'activité électrique du cœur se sont révélées négatives. Il en est de même des études portant sur les constantes hématologiques ou immunitaires. Certains auteurs ont également signalé des manifestations à type de magnétophosphènes.

3.4.2.4. Enquêtes épidémiologiques

De nombreuses enquêtes épidémiologiques ont été effectuées à la recherche d'une corrélation entre l'exposition prolongée aux champs ELF et le développement de certains cancers.

L'exploitation de chacune des enquêtes ne permet d'aboutir à aucune conclusion du fait de la présence de nombreux problèmes méthodologiques. En revanche, l'examen global de l'ensemble des différentes enquêtes semble montrer qu'il existe un léger risque relatif, surtout en ce qui concerne les cancers du cerveau (principalement les gliomes), et, à un moindre niveau, les leucémies myéloïdes. Plusieurs auteurs ont mis en avant une augmentation relative d'autres types de tumeurs (sein, poumon, peau, pharynx) mais ces affirmations doivent encore faire l'objet d'un travail de confirmation par d'autres équipes. En effet, les recherches épidémiologiques posent de nombreux problèmes méthodologiques et il est donc très difficile d'en déduire formellement une relation ELF-cancer.

De nombreuses études n'ont pas fait état de mesurage du niveau d'exposition aux champs électriques et magnétiques au profit d'estimations théoriques. Les études menées en milieu domestique montrent que cette estimation est basée sur l'étude de la distribution des lignes électriques autour et à l'intérieur des maisons, de la position du transformateur, de l'existence du réseau de terre et des divers appareils électroménagers. Lorsque les mesurages ont été effectués, ils ont été limités dans le temps et dans l'espace et ne peuvent, par conséquent, représenter l'exposition réelle d'un sujet pendant une longue période de temps.

En ce qui concerne les études en milieu professionnel, l'exposition aux ELF est relativement élevée pour certains métiers. Cependant, les informations relatives à la véritable exposition sont souvent très approximatives (biais d'information) et introduisent la possibilité d'une mauvaise classification des individus associée à d'autres biais statistiques. Un exemple classique est le biais de sélection induit par des sujets non exposés suite à un reclassement pour des problèmes de santé : « healthy worker effect ». Lorsque des mesures dosimétriques ont été effectuées à un poste de travail, elles ne peuvent pas être extrapolées à des postes de travail plus anciens et, par conséquent, elles ne peuvent pas refléter le niveau de l'exposition chronique.

De nombreuses études n'ont pas pris en compte les autres facteurs qui peuvent contribuer à l'augmentation de l'incidence des cancers et que l'on appelle facteurs confondants (biais de confusion). En ce qui concerne les études résidentielles, il est ainsi nécessaire de prendre en compte la pollution atmosphérique, l'usage du tabac et des produits chimiques tels les herbicides, les examens et traitements médicaux mettant en oeuvre les rayonnements ionisants sans négliger la localisation du domicile, en ville ou à la campagne, l'âge, le niveau social, l'origine ethnique des habitants,...

Pour les études en milieu professionnel, en plus des mêmes facteurs confondants, il doit être pris en compte l'existence éventuelle de fumées de soudage ou de brasage, de produits cancérigènes (solvants, hydrocarbures), ...

Enfin, les études épidémiologiques n'ont pas été capables d'établir une relation dose/réponse en ce qui concerne l'exposition aux ELF. Les scienti-

fiques ne savent pas si les risques humains résulteraient de l'exposition à des puissances moyennes ou à des puissances crêtes, à la fréquence de répétition des impulsions, à leur largeur ou à tout autre paramètre d'émission.

L'Académie nationale de médecine a estimé le 29 juin 1993 que « les effets sur la santé des champs électromagnétiques créés par les lignes de transport et de distribution de l'électricité, s'ils existent, ne représentent qu'un risque très faible à l'échelle de l'individu et ne constituent pas, pour cette raison, un problème de santé prioritaire ». Ces incertitudes n'ont d'ailleurs pas été levées à la suite de l'étude récente menée conjointement par Electricité de France, Hydro-Québec et Ontario Hydro.

En conclusion, l'ensemble des résultats émanant des enquêtes épidémiologiques ne permet pas de conclure et ne peut pas résoudre les questions afférentes à la nature des relations existant entre les expositions aux ELF et la survenue de cancers. Les recherches effectuées dans le domaine professionnel doivent être interprétées avec beaucoup de précaution, certaines étant basées sur un nombre trop faible de cas et la plupart n'ayant pas pris en compte tous les facteurs confondants. De ce fait, il n'est pas évident que l'exposition professionnelle aux ELF puisse être considérée comme promoteur de cancers. Aussi est-il absolument nécessaire de continuer les recherches, tant au niveau des laboratoires que sur le plan épidémiologique, de façon à pouvoir préciser les mécanismes d'action des ELF et les paramètres d'exposition nécessaires à l'évaluation de ce risque.

3.5. LIMITES D'EXPOSITION

Malgré l'existence d'une abondante littérature sur les effets biologiques des ELF, il faut bien reconnaître que les connaissances scientifiques sont insuffisantes pour préciser ces effets et en déduire des normes de protection incontestables. Cette incertitude milite en faveur de la création de zones correctement signalées pour limiter l'accès près des sources importantes d'émission d'ELF.

En France, il n'existe aucune réglementation ou recommandation concernant la protection des travailleurs contre cette nuisance. Indépendamment des recommandations de l'ACGIH et de l'ICNIRP, la prénorme européenne expérimentale ENV 50166-1 constitue la nouvelle référence.

Il y a lieu de noter que cette prénorme ne concerne que les troubles physiopathologiques liés à l'existence de courants induits dans le corps par les champs électromagnétiques et qu'elle ne couvre pas les effets des expositions chroniques ou à long terme, pour lesquels les données expérimentales, épidémiologiques et cliniques sont insuffisantes pour pouvoir établir des normes sérieuses.

3.5.1. Champs électriques ELF

En milieu professionnel, les valeurs limites d'exposition aux champs électriques ELF sont données dans le tableau 7. Les niveaux spécifiés sont des valeurs de champ non perturbé (voir paragraphe 3.7.).

Tableau 7
Valeurs limites d'exposition professionnelle au champ électrique (ENV 50166-1)

Fréquence f en Hz	Champ électrique en kV/m	Temps t en heures
0,1-50	30 ⁽²⁾	$t \leq 80/E$ ⁽¹⁾
50-150	$1\,500/f$ (30 à 50 Hz)	$t \leq 80/E$ ⁽¹⁾
150-1 500	$1\,500/f$	
1 500-10 000	1	

(1) Cette expression fournit les limites de temps total t à l'intérieur d'une période de 8 heures qui peut être passé dans un champ d'une intensité déterminée E (kV/m), sans toutefois dépasser la valeur maximale donnée dans la deuxième colonne.

(2) Ces niveaux peuvent être dépassés sous réserve de la limite de temps de la troisième colonne et de la restriction de base en matière de densité de courant induit dans le cas où le champ a une direction principalement perpendiculaire, plutôt que parallèle, par rapport au corps.

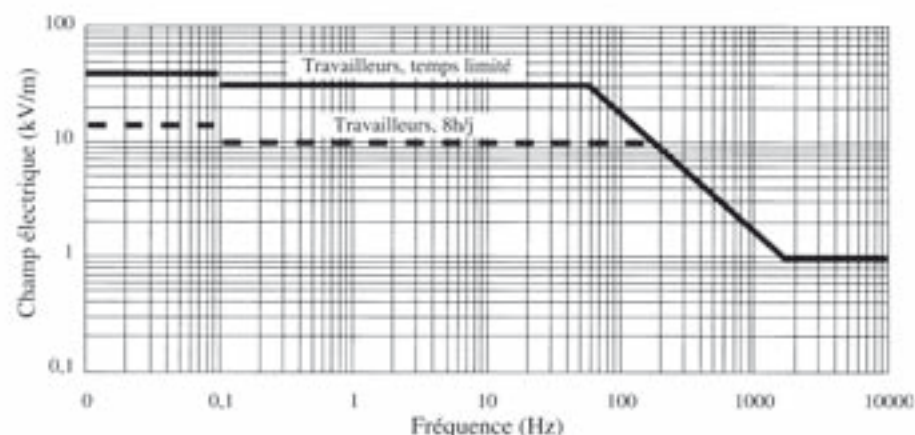


Figure 8
Diagramme des VLE professionnelles au champ électrique

Ces valeurs sont basées sur les niveaux de courants électriques à la surface du corps et induits en profondeur en-dessous desquels il n'y a pas d'effet nocif pour la santé. Des recherches de laboratoire portant sur des prélèvements de tissus biologiques ont mis en évidence des effets à des niveaux inférieurs aux valeurs limites permises. Cependant, il n'existe actuellement aucune démonstration convaincante que des effets nocifs pour la santé surviennent lors de l'exposition professionnelle.

Les champs électriques ELF, dont l'intensité est supérieure à une valeur de l'ordre de $5 \text{ à } 7 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, peuvent provoquer une augmentation des risques du fait des réactions humaines subites associées aux arcs de décharge et courants au contact de pièces conductrices non reliées à la terre. Il faut associer ces risques complémentaires aux dangers d'incendie et d'explosion résultant de la présence de matériaux combustibles qui peuvent s'enflammer sous l'effet d'arcs ou d'étincelles engendrés par des appareils électriques non protégés. Il faut apporter un soin particulier à l'élimination des objets non reliés à la terre, les connecter à la terre ou utiliser des gants isolants pour leur préhension. Des consignes d'utilisation des matériels de sécurité (combinaisons de travail, gants et autres protections isolantes, par exemple) sont nécessaires en cas d'intervention humaine dans les champs électriques dont l'intensité dépasse $15 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$.

Pour les **travailleurs porteurs d'implants cardiaques**, les valeurs limites d'exposition données ci-dessus ne concernent pas les risques d'interférences électromagnétiques sur le fonctionnement des appareils incorporés. On a constaté l'incompatibilité de certains types de stimulateurs à des champs électriques ELF dont l'intensité dépassait $2 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$. De ce fait et en l'absence d'information pertinente émanant des fabricants d'implants cardiaques, il est conseillé de ne pas soumettre les porteurs de « pacemakers » ou de tout autre appareil médical implanté à des champs électriques dont l'intensité dépasse $1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$.

Les mesurages doivent être effectués selon les normes CEI (Commission Electrotechnique Internationale) et IEEE, (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc : mesurage des champs électromagnétiques, 1987).

3.5.2. Champs magnétiques ELF

En milieu professionnel, les valeurs limites d'exposition aux champs magnétiques ELF sont données dans le tableau 8 et la figure 9.

Si les champs magnétiques ne sont pas uniformes, la valeur de champ doit être pondérée dans un volume représentant la tête ou le tronc humain ou, s'il n'est pas possible de déterminer cette moyenne, la valeur au centre de ces volumes doit être retenue.

Tableau 8
Valeurs limites d'exposition professionnelle au champ magnétique (ENV 50166-1)

Fréquence f en Hz	Induction magnétique
0,1-0,23	1,4 T ⁽¹⁾
0,23-1	$320/f$ mT
1-4	$320/f^2$ mT
4-1 500	$80/f$ mT (1,6 mT à 50 Hz)
1 500-10 000	0,053 mT

(1) 0,14 T moyenné dans une période de 8 heures (0,1–1,5 Hz).

Pour les extrémités du corps (les membres en particulier), des niveaux supérieurs sont permis (diagramme en pointillés de la Figure 10) :

3,5 T	de	0,1 à 0,36 Hz
1 250/f mT	de	0,36 à 1 500 Hz (25 mT à 50 Hz)
0,83 mT	de	1 500 à 10 000 Hz.

En ce qui concerne **les salariés porteurs d'implants cardiaques**, la valeur limite d'exposition donnée ci-dessus ne constitue pas une protection contre l'induction magnétique. En l'absence de données précises, il est recommandé de la réduire d'un facteur égal à 10.

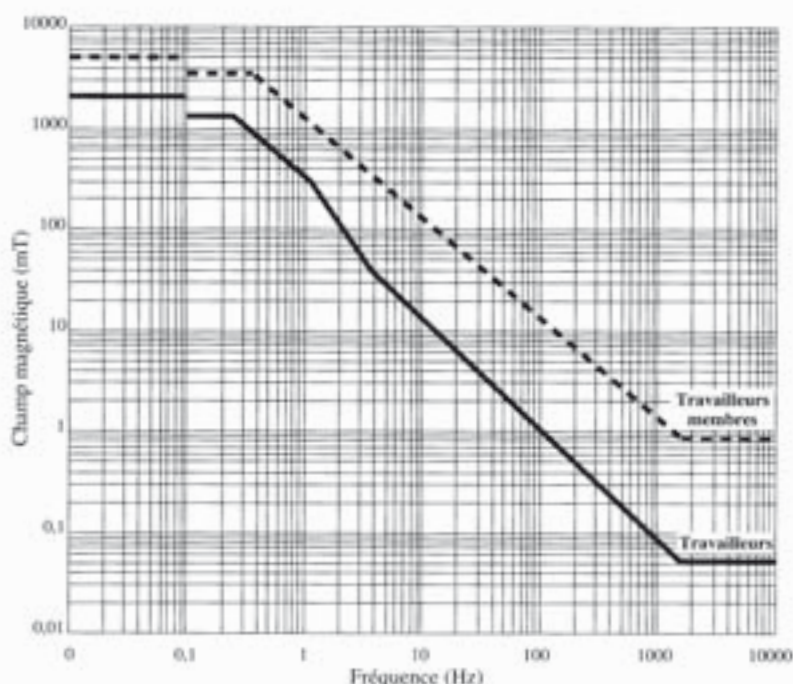


Figure 9
Diagramme des VLE professionnelles au champ magnétique

3.5.3. Courant de contact

Le courant de contact survenant au contact d'objets placés dans un champ alternatif est limité à **3,5 mA**. Le courant est moyenné sur une période de une seconde.

3.5.4. Éléments de métrologie

La mesure des champs électriques de 50 Hz peut s'effectuer à l'aide d'une sonde capacitive composée de deux demi-sphères isolées reliées au sys-

tème de mesure. L'utilisation d'amplificateurs est nécessaire et la sonde doit être de taille suffisante, d'où un appareillage relativement volumineux se prêtant mal aux mesures de champs hétérogènes. Il peut être cependant utilisé en mesure de champ ambiant à condition que l'opérateur se tienne suffisamment éloigné de l'appareil. La précision de la mesure est au mieux de l'ordre de 10 % (soit 1 dB : § 1.6.10.).

La mesure des champs magnétiques s'effectue avec une simple bobine au travers de laquelle on mesure le flux par évaluation du courant induit dans les spires avec une bonne approximation. En cas de champ magnétique hétérogène, la mesure doit être effectuée avec une boucle de 100 cm² de surface.

Depuis peu il existe :

- des appareils de mesure portables permettant de mesurer au niveau des postes de travail avec une approximation satisfaisante les champs électriques et magnétiques y régnant ;
- des dosimètres personnels de la taille d'une calculatrice permettant de mesurer, dans les conditions d'activités courantes, les composantes électriques et magnétiques des champs ELF. L'information stockée par l'appareil est ensuite analysée par un ordinateur.

Ces mesurages ne sont pas aisés car ils s'effectuent en zone de champ proche où il n'existe pas de relation simple entre intensités de champ électrique et magnétique. Il doit donc être réalisé un balisage autour de la zone d'émission de façon à signaler l'aire où une exposition du personnel est possible. Un pictogramme réglementaire de signalisation doit être apposé conformément à l'arrêté ministériel du 4 novembre 1993 « Signalisation de sécurité et de santé sur les lieux de travail ».

3.6. MÉDECINE DU TRAVAIL

Le médecin du travail est souvent sollicité pour des questions relatives à d'éventuelles contre-indications concernant l'exposition professionnelle aux ELF. Sa mission est de tenter au mieux d'y répondre et, dans tous les cas, de dispenser une information circonstanciée.

3.6.1. Salariés et risque carcinologique

Concernant le risque carcinologique, il a été évoqué un effet de co-promotion pour certaines tumeurs. Cependant, les connaissances actuelles ne permettent pas de conclure à une responsabilité déterminée des ELF dans la survenue de ces cancers. De plus, il apparaît dans plusieurs études des biais statistiques liés à d'autres facteurs carcinologiques, professionnels ou non.

L'établissement d'un seuil d'exposition au risque spécifique, notamment pour les personnes aux antécédents de tumeurs cérébrales ou hématologiques, ne semble pas possible actuellement. De plus, les effets à long terme de telles expositions sont encore trop mal connus pour être pris en considération.

Il n'y a donc pas d'arguments suffisants pour prononcer une contre-indication formelle à un emploi à proximité de sources ELF lors d'antécédents de tumeurs.

3.6.2. Porteurs d'implants

En ce qui concerne les prothèses, les implants passifs ne sont soumis à aucune contre-indication.

Pour les implants actifs tels les stimulateurs cardiaques, il existe une possibilité d'interférences pour certaines fréquences ELF. Le risque semble cependant improbable si l'exposition est inférieure à $1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ pour l'intensité de champ électrique et à $120 \text{ } \mu\text{T}$ pour l'induction magnétique, valeurs limites d'exposition conseillées à 50 Hz par l'ACGIH.

Le rôle du médecin du travail consiste, en premier lieu, à s'enquérir de l'exposition réelle du salarié pour savoir si elle est bien au-dessous de ces valeurs.

En second lieu et vu la difficulté actuelle de connaître le seuil d'intensité de champ pour lequel un appareil donné peut voir son fonctionnement modifié, il est souhaitable qu'il prononce l'inaptitude au poste de travail en cas de première affectation. Dans le cas contraire, c'est-à-dire pour le personnel en place venant de subir une implantation, il lui faut, avant de se prononcer, faire procéder à une étude de poste plus poussée et éventuellement faire appel à une consultation spécialisée en pathologies professionnelles.

3.6.3. Femmes enceintes

Les différentes expérimentations et études effectuées n'ont jamais apporté d'éléments en faveur d'une action néfaste des ELF lors de la grossesse, que ce soit pour la mère ou pour l'enfant à naître.

Les suppositions, émises il y a quelques années, d'un risque accru d'avortement spontané, n'ont pas trouvé de justification depuis que des facteurs confondants tels le stress et l'ergonomie du poste de travail (postures, pauses,...) ont été pris en compte.

Il ne semble donc pas y avoir de contre-indication formelle à laisser une femme enceinte à un poste de travail exposé aux ELF. Cependant, l'existence de malformations congénitales spontanées, qu'on ne peut discerner d'éventuelles malformations acquises, entraîne un contexte psychologique particulier lié à la grossesse. Il semble donc préférable, dans le cadre d'une politique de prudence et dans l'attente d'une meilleure connaissance scientifique, de conseiller d'éloigner les femmes enceintes des postes de travail soumis à une exposition importante à des champs ELF. À défaut de valeurs limites fondées sur des effets à long terme et sur la reproduction,

les VLE données au paragraphe 3.5. peuvent constituer provisoirement un élément d'appréciation.

3.6.4. Information des salariés concernés par les ELF de 50/60 Hz

3.6.4.1. Concernant l'apparition éventuelle de cancers

Il convient d'expliquer au salarié que les effets à long terme, au niveau cellulaire ou sur animaux, sont difficilement transposables à l'homme et que les résultats des études épidémiologiques ne sont pas probants. Il faut faire remarquer à ce sujet que les ELF à elles seules ne semblent pas pouvoir provoquer un cancer.

Cependant, compte tenu des incertitudes persistant sur ce sujet, les études se poursuivent et dans l'attente de leurs résultats, on ne peut qu'être très prudent dans le conseil pour la mise en place d'éventuelles mesures de sécurité non adaptées qui pourraient se révéler illusoirs, voire dangereuses.

3.6.4.2. En cas de port d'implants passifs

Le cas échéant, il y a lieu de surveiller toute anomalie locale ou loco-régionale à type de picotements, dysesthésies, voire douleur et d'en déterminer l'origine afin de prendre les mesures adaptées.

3.6.4.3. En cas de port d'implants actifs

Les porteurs d'implants actifs doivent le signaler au médecin du travail. Les interférences possibles des ELF avec l'appareillage et les conséquences que cela peut entraîner leur seront expliquées. Il faut aussi les convaincre de prévenir le médecin du travail le plus rapidement possible en cas de survenue de perturbations dans le fonctionnement de leur implant.

3.6.4.4. En cas de grossesse

Il convient de rassurer les femmes enceintes et d'attirer par ailleurs leur attention sur l'ergonomie de leur poste de travail.

3.6.5. Recueil et analyse des informations : « vigilance industrielle »

Il convient de rappeler l'importance de la participation du médecin du travail aux systèmes de recueil et de traitement des observations d'accidents ou troubles liés aux ELF, ou de manifestations cliniques pouvant leur être imputées, pour orienter les recherches et améliorer les connaissances en ce domaine.

3.7. BIBLIOGRAPHIE

ACGIH. – « Threshold limite values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices », 1993-1994.

Bergqvist U., Knave B. – « Work with visual display units », 2nd. Inter. N.I.R. Workshop. Vancouver, B.C., Canada 1992 in proc. ed. M.W.Greene 445-464.

Bunin G. – « Neuroblastoma and Parental Occupation ». *Amer. J. Epidemiol.*, 131, 776-780, 1990.

CENELEC ENV 50166-1 (classement UTE : C 18-600) « Exposition humaine aux champs électromagnétiques de basses fréquences (0 à 10 Hz) ».

Conseil supérieur d'hygiène publique de France, section évaluation des risques de l'environnement sur la santé, avis relatif aux champs électromagnétiques, séance du 1^{er} juillet 1993.

Delgado J.M.R., Leal J., Montea-gudo J.L., Gracia M.G. – « Embryo-logical changes induced by weak, extremely low frequency electromagnetic fields ». *J. Anat.*, 134, 3, 533-551, 1982.

Demers P.A. – « Occupational exposure to electromagnetic radiation and breast cancer in males ». Fred Hutchinson Cancer Research Center. Seattle, WA (as cited in Transmission / Distribution Health & Safety Report. June/July 1990. p. 21.)

Duchêne A.S., Lakey J.R.A., Repacholi M.H. – « IRPA guidelines on protection against non-ionizing radiation » ch. 8 : Alleged radiations risks from visual display units – A statement, Ed. Pergamon Press 1991, 101-103.

Fulton J.P., Cobbs S. – « Electrical wiring configuration and childhood leukemia in Rhode Island ». *Am. J. Epidemiol.*, 111, 3, 292-296, 1980.

Gagny C. – « Immunité des stimulateurs cardiaques aux perturbations

électromagnétiques. La situation ». INRS, DMT (à paraître).

Garland F.C., Shaw E., Gorham E. – « Incidence of leukemia in occupation with potential electromagnetic field exposure in United States Navy personnel ». *Am. J. Epidemiol.*, 132, 2, 293-303, 1990.

Guenel P., Lellouch J. – « Effets des champs électriques et magnétiques de très basse fréquence sur la santé », analyse de la littérature épidémiologique, les éditions INSERM Analyses et prospective, 1993.

« Guide provisoire pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques et magnétiques aux fréquences de 50/60 Hz », INRS, *Cahiers de notes documentaires*, 149, ND 1987, 1992.

Hée G. – « Rayonnements, champs, courants électriques », 10^e colloque international du comité électricité de l'AISS, INRS, DMT 47 TD 34.

Hée G., Barbara J.J., Gros P. – « Valeurs limites d'exposition en ambiance de travail ». INRS, *Cahiers de notes documentaires*, 148, ND 1886, 1992.

Hée G., Méreau P., Vautrin J.P. – « Ondes courtes, ultra-courtes ou radar – risque et prévention », INRS DMT, 47 TD 35.

ILO. – « Occupational hazards from non-ionizing electromagnetic radiation », Occupational safety and health series, n° 53, 1985.

ILO. – « Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields », a practical guide, Occupational safety and health series n° 69, 1994.

Juutilainen J. – « Incidence of leukemia and brain tumors in Finnish workers exposed to ELF magnetic fields ». *Arch. Occup. Environ. Health*, 62, 289-93, 1990.

Lambrozo J., Le Bis I. – « Champs électromagnétiques et consommateurs », actes du colloque organisé par EDF, Paris, 24 juin 1993.

Leung F.C., Rommereim D.N., Stevens R.G., Anderson L.E. –

- « Effects of electric field on rat mammary tumor development induced by 7,12-dimethylbenz (A)anthracene (DMBA) ». B.E.M.S. 9th annual meeting 21-25 June 1987 (in proc).
- Lin R.S., Dischinger P.C., Conde J., Farrell K.P. — « Occupational exposure to electromagnetic fields and the occurrence of brain tumors. An analysis of possible associations ». *J. Occup. Med.*, 27, 6, 413-419, 1985.
- Loomis D., Savitz D. — « Mortality from brain cancer and leukemia among electrical workers ». *Br. J. Ind. Med.*, 47, 633-638, 1990.
- Mack W., Preston Martin S., Peters J.M. — « Astrocytoma risk related to job exposure to electric and magnetic fields ». *Bioelectromagnetics*, 12, 57-66, 1991.
- Matanoski C.M., Breyse P., Elliott E.A. — « Electromagnetic field exposure and male breast cancer ». *The Lancet*, 23, 737, 1991.
- Meyers A., Clayden R.A. — « Childhood cancer and overhead powerlines : a case-control study ». *Br. J. of Cancer*, 62, 1008-1014, 1990.
- Milham S.J. — « Mortality in workers exposed to electromagnetic fields ». *Environ. Health Perspectives*, 62, 297-300, 1985.
- Milham S.J. — « Increased mortality in amateur radio operators due to lymphatic and hematopoietic malignancies ». *Am. J. Epidemiol.*, 127, 1, 50-54, 1988.
- Ministère de l'industrie, des postes et télécommunications et du commerce extérieur — Ministère des affaires sociales, de la santé et de la ville. — « Champs électromagnétiques et lignes électriques », état de la question et aspects sanitaires, juillet 1994.
- OMS. — « Magnetic fields ». *Environmental health criteria*, 69, 1987.
- Peters J. — « Childhood leukemia risks associated with exposure to electric and magnetic fields ». Presented at EPRI workshop on epidemiology studies related to electric and magnetic fields. Carmel, CA. February 1991.
- Peters J. — « Preliminary findings from childhood leukemia study mixed ». Transmission / Distribution Health & Safety Report. February 28, 1991, p. 1.
- Preston-Martin S., Marck W., Henderson B.E. — « Risk factors for gliomas and meningiomas in males in Los Angeles county ». *Cancer Res.*, 49 (21) 6137-6143, 1989.
- Roucaurol J.C. — « Rapport sur les champs électromagnétiques de très basse fréquence et la santé », Bulletin de l'Académie nationale de médecine, 1993, 177 (6), pp. 1031-1040.
- Schreiber G. — « A retrospective cohort study of electromagnetic fields exposure and cancer mortality ». Eleventh Annual Review of Research on Biological Effects of 50 and 60 Hz electric and magnetic fields. Denver, CO. November 1990. p. A2.
- Savitz D. — « Magnetic field exposure from electric appliances and childhood cancer ». *Am. J. Epidemiol.*, 131, 763-773, 1990.
- Sienkiewicz Z.J., Saunders R.D., Kowalczyk C.I. — « Biological effects of exposure to non ionizing electromagnetic fields and radiation, 2. Extremely low frequency electric and magnetic fields ». Document NRPB — R239, juillet 1991.
- « Signalisation de sécurité et de santé sur les lieux de travail ». INRS, *Cahiers de notes documentaires*, 153, ND 1947, 1993.
- Speers M.A., Dobbins J.G., Miller V.S. — « Occupational exposures and brain cancer mortality : a preliminary study of east Texas residents ». *Am. J. Ind. Med.*, 13, 6, 629-638, 1988.
- Spitz M.R. — « Neuroblastoma and parental occupation : a case control analysis ». *Am. J. Epidemiol.*, 117, 575-589, 1985.
- Thériault G., Goldberg M., Miller A.B. et al. — « Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada and France : 1970-1989 ».

American journal of epidemiology, 1994, 139 (6), pp. 550-572.

Thomas T.L., Stolley P.D., Stemhagen A. and coll. – « Brain tumor mortality risk among men with electrical and electronics jobs: a case control study ». *J. Natl. Cancer Inst.*, 79, 2, 233-238, 1987.

Tomenius L. – « 50 Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm country ». *Bioelectromagnetics*, 7, 191-207, 1986.

Tynes T., Andersen A. – « Electromagnetic fields and male breast cancer ». *The Lancet*, 29, 1596, 1990.

Vaguero D., Olin R. – « Incidence of cancer in the electronic industry using the new swedish cancer environment registry as a screening instrument ». *Br. J. Ind. Med.*, 40, 188-192, 1983.

Vaguero D., Ahlbom A., Olin R. – « Cancer morbidity among workers in the telecommunication industry ». *Br. J. Ind. Med.*, 42, 191-195, 1985.

Verreault R., Weiss N. – « Use of electric blankets and risk of testicular cancer ». *Am. J. Epidemiol.*, 139, 759-762, 1990.

Vyalov A.M. – « Clinico-hygienic and experimental data on effects of magnetic fields under industrial conditions ». In *Influence of Magnetic Fields on Biological objects*. (Ed. Yu

H Kholodov), Springfield, VA., NTIS Report No. JPRS 63038. 163-174, 1974.

Wertheimer N., Leeper C.D. – « Electrical wiring configuration and childhood cancer ». *Am. J. Epidemiol.*, 109, 273-283, 1979.

Wertheimer N. – « Angle of the magnetic field measurements in two existing studies of residential exposure ». In: *Eleventh annual review of research on biological effects of 50 and 60 Hz electric and magnetic fields*. Denver, CO. November 1990, p. A10.

Wilkins J. R. – « Paternal occupational exposure to electromagnetic fields and neuroblastoma in offspring ». *Am. J. Epidemiol.*, 131, 995-1008, 1990.

Williams C. S. – « The effects of exposure misclassification from using home spot measurements and residential wire configuration as surrogate measures of personal exposure to extremely low frequency magnetic fields ». *Eleventh Annual Review of Research on Biological Effects of 50 and 60 Hz Electric and Magnetic Fields*. Denver, CO. November 1990, p. P9.

Youngson J.A., Clayden D.A., Myers A. – « A case control study of adult haematological malignancies in relation to overhead powerlines ». *Br. J. of Cancer*, 63, 977-985, 1991.

4

ONDES RADIOÉLECTROMAGNÉTIQUES



4.1. DÉFINITION ET CARACTÉRISTIQUES

Dans les ondes électromagnétiques (OEM), les rayonnements électromagnétiques radiofréquences (RF) sont compris conventionnellement par le CENELEC TC 111 dans l'intervalle de fréquences de 10 kHz à 300 MHz. Les hyperfréquences (HF) couvrent la gamme comprise entre 300 MHz et 300 GHz.

La plus grande vigilance doit être apportée lors de la lecture de la bibliographie, car dans la littérature anglo-saxonne le terme « radiofrequency » désigne l'ensemble des ondes radioélectriques et comprend donc rayonnements radiofréquences et hyperfréquences. Cela peut conduire à des erreurs d'interprétation de la documentation disponible.

Les ondes radioélectriques se subdivisent comme suit :

Tableau 9
Ondes électromagnétiques

Nature du rayonnement	Désignation conventionnelle	Gamme de fréquences
RF (Radiofréquences)	VLF (Très basses fréquences)	10 kHz à 30 kHz
	LF (Basses fréquences)	30 kHz à 300 kHz
	MF (Moyennes fréquences)	300 kHz à 3 MHz
	HF* (Hautes fréquences)	3 MHz à 30 MHz
	VHF (Très hautes fréquences)	30 MHz à 300 MHz
HF (Hyperfréquences)	UHF (Ultra hautes fréquences)	300 MHz à 3 GHz
	SHF (Supra hautes fréquences)	3 GHz à 30 GHz
	EHF (Extrêmes hautes fréquences)	30 GHz à 300 GHz

* Les sigles usuels sont anglo-saxons. En particulier, HF désignant dans ce tableau les « High Frequencies » des radiofréquences ne doit pas être confondu avec les HF, abréviation utilisée dans la suite du texte pour désigner les rayonnements hyperfréquences.

Il convient de rappeler les autres appellations usuelles des hyperfréquences :

- les micro-ondes,
- les ondes radar,
- les ondes ultra-courtes,
- les ondes décimétriques, centimétriques et millimétriques.

Le soleil et les étoiles émettent des ondes électromagnétiques dont la densité de puissance surfacique est d'environ $10 \text{ pW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($1 \text{ pW} = 1 \text{ picowatt} = 10^{-12} \text{ W}$) dans des fréquences comprises entre 100 kHz et 300 GHz.

En regard de ces champs naturels, l'exposition aux sources artificielles leur est supérieure de plusieurs ordres de grandeur. Elle est surtout extrêmement variable selon le développement du pays, le caractère urbain, industriel ou rural des populations, la profession des individus qui peut entraîner un risque spécifique d'exposition aux OEM.

4.2. SECTEURS D'ACTIVITÉS CONCERNÉS

4.2.1. Télécommunications

C'est une des principales utilisations des OEM, que ce soit la radiodiffusion, la télévision, le radio-téléphone, les câbles hertziens, la télémessure, le radio-balisage ou les radars civils et militaires.

Les fréquences utilisées vont de 10 kHz à 300 GHz et les puissances d'émission de quelques milliwatts à plusieurs gigawatts.

4.2.2. Électrothermie par effet diélectrique

Elle est basée sur le principe que tout matériau diélectrique placé dans un champ électrique se charge électriquement. Si le champ est alternatif, les inversions répétées de charge s'accompagnent de pertes qui se transforment en chaleur.

Pour cette application, les fréquences d'inversion doivent donc être élevées, généralement entre 3 MHz et 3 GHz.

On utilise cette technique dans divers secteurs d'activités.

4.2.2.1. Travail du bois

- Traitement des bois pour le séchage ou le formage des pièces de bois.
- Collage des bois pour la fabrication des contreplaqués, agglomérés et autres panneaux laminés.

4.2.2.2. Industries textile, papetière, des caoutchoucs et des plastiques

- Séchage, découpage et formage des produits textiles et papetiers, des céramiques ou des produits vitreux.
- Durcissage, formage, moulage et vulcanisation des caoutchoucs.
- Formage, découpage, moulage et soudage des matières thermoplastiques.

4.2.2.3. Bâtiment et travaux publics

- Accélération de la prise du béton ou traitement des schistes bitumeux.
- Séchage des carreaux de plâtre.

4.2.2.4. Industrie agro-alimentaire

- Four à micro-ondes domestique ou industriel.
- Appareils de déparasitage des céréales et autres produits agricoles.

4.2.2.5. Secteurs médical et paramédical

- Instruments chirurgicaux tel le bistouri électrique.
- Appareils de diathermie ou d'hyperthermie.
- Matériels de physiothérapie où l'émission est souvent pulsée.

4.2.3. Électrothermie par induction

Elle est basée sur le principe que tout corps conducteur placé dans un champ magnétique variable est le siège d'une tension électrique induite à l'origine d'un courant électrique producteur de chaleur par effet joule.

Elle utilise des fréquences allant de 50 Hz à plusieurs MHz et les puissances produites sont de l'ordre du kW, voire du MW.

4.2.3.1. Industrie sidérurgique et travail des métaux

- Fusion ou affinage métallique dans des fours à canal ou à creuset.
- Purification de certains matériaux tels les semi-conducteurs.
- Recuit et le formage de certains aciers.
- Traitement de surface des métaux pour une trempe superficielle.
- Soudage ou brasage de précision en orfèvrerie.

4.2.3.2. Industrie électronique

- Dégazage de certaines pièces telles les électrodes des tubes électroniques.
- Création de plasma pour le travail de certaines pièces ou le perçage de céramiques.
- Fusion pour l'affinage des microcristaux tel le germanium ou le silicium.

4.2.3.3. Secteurs scientifique et médical

- Accélérateurs de particules.
- Création d'un confinement magnétique pour obtenir une fusion thermonucléaire contrôlée.
- Spectroscopie RMN à hauts champs et résonance paramagnétique électronique RPE.
- Magnétohydrodynamie.

4.3. INTERACTIONS AVEC LES SYSTÈMES BIOLOGIQUES

Depuis le début du siècle, on sait que les OEM sont absorbées par les tissus vivants et s'y dégradent en chaleur. Cet effet thermogène est à la base des traitements médicaux dits de diathermie et d'hyperthermie.

Cependant, depuis une quinzaine d'années, on a une connaissance plus précise de l'interaction rayonnements-tissus et de nombreuses expérimentations montrent que l'effet thermogène n'est pas le seul à agir biologiquement.

Aussi, avant d'envisager l'impact sanitaire des OEM, il semble indiqué de procéder à un rappel physique de l'interaction rayonnements - tissus.

4.3.1. Bases physiques des interactions

Lorsqu'une onde radioélectrique plane est interceptée par un matériau plan, d'épaisseur très grande, une partie de l'énergie est renvoyée sous forme d'onde réfléchie et l'autre partie est transmise ou absorbée. Cette dernière est à l'origine des interactions rayonnement-matériau.

Sur le plan biologique, la quantité et la distribution de l'énergie absorbée sont fonction de nombreux facteurs :

- fréquence des champs électromagnétiques ;
- puissance de ces champs ;
- configuration de la source émettrice ;
- géométrie et dimensions des tissus cibles ;
- structure et composition de ces tissus.

Les facteurs liés à l'environnement ne doivent pas non plus être négligés.

En général, il est donc très difficile d'établir une relation significative entre une simple mesure des champs électriques et magnétiques externes et les effets biologiques observés.

4.3.1.1. Origine biophysique de l'absorption des OEM

D'une façon générale, la matière exposée à un rayonnement électromagnétique est soumise à l'action d'un champ induit. Les composantes électrique et magnétique de ce champ sont à l'origine de deux processus : l'oscillation et le déplacement des charges libres et la rotation des molécules polaires à la fréquence d'application de l'OEM. Le déplacement des charges électriques étant perturbé par la résistance du milieu, des pertes de conduction apparaissent. Elles décroissent linéairement en fonction de la fréquence du champ électrique. De même, de nombreuses forces, dont celles liées à la viscosité du milieu, s'opposent à la rotation des molécules polarisées et il en résulte des pertes énergétiques d'origine diélectrique.

L'eau étant l'un des principaux constituants de la matière vivante, celle-ci va réagir vis-à-vis des OEM en fonction de son hydratation. Ainsi, on distingue les tissus très hydratés tels que la peau, les muscles ou le sang, dont les pertes diélectriques atteignent un facteur de l'ordre de 16 à 20 et les tissus à faible concentration hydrique, tels que la graisse et l'os, où ce facteur ne dépasse pas 1 à 2. Par ailleurs, compte tenu de l'existence dans les organismes vivants de solutions salines, les pertes par conduction peuvent devenir très importantes.

4.3.1.2. Profondeur de pénétration des OEM

Pour une même valeur d'intensité de champ, l'absorption est 60 fois plus importante dans les tissus fortement hydratés que dans ceux qui contiennent peu d'eau. Elle entraîne une réduction progressive de l'intensité de ce champ, donc de sa puissance au fur et à mesure de la pénétration de l'onde.

Cette notion peut être quantifiée par la détermination d'une profondeur de pénétration d qui est la distance de propagation pour laquelle la densité de puissance de l'onde décroît d'un facteur $(1/e)^2$, e étant la base des logarithmes naturels ou népériens, soit 0,14. Ainsi, pour les tissus à faible concentration hydrique, cette distance de pénétration est 10 fois plus importante que dans les tissus hydratés.

4.3.1.3. Influence des interfaces biologiques

Chez les animaux ou l'homme, le rayonnement traverse successivement plusieurs tissus d'hydratations différentes. Il en résulte des réflexions au niveau des interfaces intertissulaires, ce qui modifie les diagrammes de pénétration du rayonnement. Les ondes réfléchies interférant avec les ondes incidentes, il peut se créer un système d'ondes stationnaires qui dépend des caractéristiques biophysiques des tissus, de leur épaisseur et de la fréquence de l'OEM.

Par exemple, pour une fréquence d'émission de 27,1 MHz, l'absorption par la graisse représente moins du dixième de l'absorption musculaire, alors que pour 2 450 MHz ce rapport tend vers l'unité et peut même s'inverser si la couche de graisse a une épaisseur de 2 cm. Corrélativement, la profondeur de pénétration musculaire s'amointrit lorsque la fréquence s'accroît.

4.3.1.4. Influence de la configuration géométrique de la cible

La forme du corps exposé aux OEM intervient au niveau de l'absorption énergétique et de sa répartition interne. Pour quantifier ces phénomènes, on a recours à une modélisation informatique. Celle-ci permet de prévoir l'existence d'éventuels points chauds dans la cible.

Par ailleurs, en ce qui concerne les hyperfréquences, la longueur d'onde des rayonnements est du même ordre de grandeur que la taille des animaux servant aux expérimentations (généralement de petits mammifères) mais ne l'est plus nécessairement pour l'homme. Il en résulte que l'absorption, la diffusion et la diffraction des ondes incidentes sont sensiblement différentes chez les petits animaux et chez l'homme. Cela pose le problème de l'extrapolation des résultats obtenus en expérimentation animale à la physiopathologie humaine.

4.3.1.5. Le débit d'absorption spécifique (ou massique) : DAS

Afin de résoudre ces problèmes, on a imaginé d'assimiler les sujets exposés à des ellipsoïdes homogènes mais de tailles et donc de masses différentes et de considérer l'énergie absorbée par unité de masse du corps absorbant. Les études faites ont montré que :

- le maximum d'absorption survient pour des fréquences beaucoup plus élevées chez les petits mammifères (1 à 3 GHz) que chez l'homme (60 à 70 MHz),
- au-delà de la fréquence entraînant le maximum d'absorption, le DAS varie en fonction des dimensions de la cible, de sa masse et de la fréquence de l'OEM selon l'expression suivante :

$$\text{DAS} = 60 \frac{L}{f \cdot M}$$

où L représente la dimension en cm de la cible, M sa masse en g, la fréquence f étant exprimée en GHz.

De plus, l'orientation de son grand axe par rapport à la direction de polarisation du champ électrique de l'onde intervient également dans le phénomène d'absorption énergétique ; ainsi le DAS est nettement plus élevé lorsque le grand axe de l'ellipsoïde, représentant la plus grande dimension du sujet, n'est parallèle au champ électrique que lorsqu'il est perpendiculaire aux deux champs ou parallèle au champ magnétique. Cet effet est d'autant plus marqué que la fréquence de l'onde incidente est basse.

4.3.2. Effets thermogènes

4.3.2.1. Effet thermogène loco-régional

Cet effet thermogène va entraîner suivant son importance :

- une vasodilatation loco-régionale avec toutes les réactions physiopathologiques qui s'y rattachent : augmentation des métabolismes, élimi-

nation des déchets métaboliques, modification des échanges hydriques et ioniques ;

- une altération plus ou moins transitoire des systèmes enzymatiques avec les perturbations métaboliques correspondantes ;
- une coagulation des protéines aboutissant à la mort cellulaire et à la brûlure tissulaire.

Naturellement cette élévation thermique est fortement modulée par la circulation qui évacue tout ou partie des calories produites.

Cet effet, qui est à la base de la physiothérapie, semble donc bien connu. Cependant il faut admettre que son utilisation ne tient actuellement pas compte de la complexité de l'interaction onde-matière et en particulier des multiples réflexions entraînées au niveau des interfaces tissulaires, de l'hétérogénéité de l'absorption énergétique intra-tissulaire et des facteurs d'environnement qui peuvent modifier l'élévation thermique.

A des niveaux de puissance suffisants pour entraîner des DAS supérieurs à $4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ et une augmentation de la chaleur locale, on a pu constater les effets suivants liés directement à la hausse de température locale :

- une inactivation progressive de certaines activités enzymatiques ;
- une augmentation de la létalité de certaines bactéries ;
- une variation des échanges ioniques transmembranaires de l'hématie (augmentation de la sortie du K^+ et de l'entrée du Na^+) et une augmentation de sa mobilité électrophorétique ;
- une modification de la production de certaines enzymes dépendant des conditions expérimentales ;
- une stimulation du système immunocompétent lorsque l'hyperthermie est modérée ($< 41^\circ\text{C}$).

4.3.2.2. Action sur le cristallin

Le cristallin est particulièrement sensible du fait de son avascularisation et de son absorption préférentielle de ces ondes.

La formation d'une cataracte est essentiellement due à une élévation thermique dépassant 41°C . C'est donc la puissance moyenne et non la puissance crête qui est en cause. Cependant, plusieurs expérimentations ayant montré que l'élévation progressive de la température à plus de 41°C par d'autres méthodes n'entraînait pas de lésion, on peut supposer que l'effet thermique n'est pas seul en cause.

Il a été déterminé un seuil d'exposition de $150 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ au-delà duquel apparaît une cataracte, le temps d'exposition dépendant de la fréquence émise, de la modulation de l'émission et de l'environnement.

Cependant, en cas d'expositions répétées à des valeurs inférieures au seuil, une cataracte peut survenir si la fréquence des agressions ne permet pas une réparation des lésions physico-chimiques infra-limaires entraînées par chaque exposition.

Sur le plan pratique, le problème n'est donc pas totalement maîtrisé.

4.3.3. Effets spécifiques ou athermiques

A côté de cette action biologique « thermique », d'autres effets ont été décrits qui ne paraissent pas dus à ce dégagement régional de chaleur avec un DAS inférieur à $4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$. Ceux-ci semblent difficilement reproductibles, ce qui a entraîné une controverse parfois véhémente. Cependant, il semble actuellement se faire jour un consensus sur leur réelle existence ; reste à déterminer leur nature et leur importance.

4.3.3.1. Effets sur l'ADN et la synthèse protéique

Pour des niveaux d'exposition faibles, certaines expériences ne retrouvent aucune modification de la synthèse d'ADN ou des protéines totales, ni de la viabilité de certaines cellules, notamment des leucocytes humains.

En revanche, d'autres expérimentations révèlent, soit une augmentation de la synthèse des protéines par augmentation de l'activité ARN polymérase, surtout parmi les cellules transformées cancéreuses, soit une répression de la synthèse pour d'autres protéines.

Aucune modification de l'ADN ni de l'ARN n'ayant jamais pu être mise en évidence, on peut exclure un effet mutagène de l'exposition aux OEM.

4.3.3.2. Effets sur le système immunitaire

Le système immunitaire paraît affecté par la présence de tels champs. En effet, une exposition courte entraîne une augmentation :

- du taux des anticorps thymo-dépendants ;
- de la réponse aux mitogènes ;
- de l'activité cytotoxique NK.

Cette majoration semble s'infléchir si l'exposition se prolonge (supérieure à 7 jours) avant retour au niveau antérieur si l'exposition est poursuivie. Les auteurs de l'expérience signalent que ce schéma d'adaptation se produit dans de nombreuses situations de stress non spécifique.

4.3.3.3. Effets sur le plan carcinologique

On retrouve in vitro une augmentation de la croissance des tumeurs par un effet de co-promotion et non de carcinogénicité directe (induction). Ce phénomène, récusé par certaines équipes sur des arguments statistiques et épidémiologiques, reste à approfondir.

4.3.3.4. Problème particulier du métabolisme du Ca^{++} . Effets fenêtres

Plusieurs expériences décrivent l'apparition d'un phénomène uniquement pour un niveau d'intensité donnée et/ou pour une fréquence donnée. C'est ce qu'on appelle « l'effet fenêtre ».

Cet effet ne répond pour l'instant à aucune systématisation et c'est là que réside toute la difficulté pour l'appréciation des modifications effectives et la

prévision exacte desdits phénomènes. On retrouve notamment ce phénomène lors de l'étude du métabolisme du Ca^{++} .

On a constaté, avec des OEM de basses fréquences, d'importantes modifications dans le transport du Ca^{++} qui sont explicitées au chapitre ELF. Au contraire, les hyperfréquences ont peu d'activité sur les variations des flux de Ca^{++} lorsqu'elles sont appliquées en émission continue. Par contre, des actions précises ont pu être mises en évidence lorsque ces hyperfréquences sont modulées en basses fréquences. Ainsi il a été constaté une augmentation du flux cellulaire de sortie de l'ion Ca^{++} pour :

- des fenêtres étroites de puissances ;
- un intervalle de modulation de fréquences précis avec une augmentation progressive de l'effet suivant la modulation, dans les limites de valeurs minimales et maximales au-delà desquelles l'exposition n'a plus d'effet. Ce phénomène a été retrouvé pour certaines cellules (neuroblastes humains et animaux) et n'est pas constant selon le type cellulaire (absent pour les fibroblastes humains par exemple). Les variations peuvent dépendre du temps d'exposition. Elles ont été retrouvées à 450 MHz, 915 MHz et 2 450 MHz avec une fréquence de modulation de 16 Hz et ses harmoniques. Il semble en effet que ce soient ces fréquences de modulation qui soient déterminantes alors que la fréquence de l'onde porteuse est une donnée qui limite la profondeur de pénétration tissulaire. Les variations sont dues a priori à la modification de la liaison calmoduline- Ca^{++} sous l'action du champ électromagnétique qui induirait une variation du Ca^{++} libre intracellulaire et donc de la conductance de la membrane.

L'ion Ca^{++} joue un rôle majeur dans les phénomènes électriques des membranes. La présence de variations importantes au niveau des cellules cérébrales pourrait faire redouter une altération du message neurologique et, par-là même, des fonctions du système nerveux central. Cependant, on n'a jamais retrouvé de modifications physiologiques des processus calcium dépendants sous l'effet des hyperfréquences.

4.4. EFFETS PHYSIOLOGIQUES

4.4.1. Études effectuées sur l'animal

4.4.1.1. Effets thermiques

À des puissances d'exposition entraînant une augmentation de la température corporelle de l'animal, on a pu constater un certain nombre de modifications.

4.4.1.1.1. Modifications neurologiques

• A 900 MHz

On constate, chez la grenouille dont le nerf sciatique a été isolé, une décroissance rapide du niveau des potentiels d'action, alors que le niveau de réactivité du nerf reste normal.

4.4.1.1.2. Modifications des fonctions reproductrices et impact sur la descendance

• A 900 MHz

- Chez le rat mâle ayant été exposé de telle façon que la température au niveau des testicules soit de 42 à 44°, on a relevé parmi la descendance certaines aberrations chromosomiques.
- A une puissance induisant une importante élévation de la température malgré un $\text{DAS} \leq 20 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, l'exposition comporte un effet tératogène se traduisant par une réduction du nombre des portées.

• A 2 450 MHz

Chez le rat, l'expérimentation retrouve des troubles de la maturation des cellules sexuelles et une augmentation des aberrations chromosomiques. Si les cellules s'avèrent résistantes à l'exposition répétée, le risque génétique pour la descendance n'est pas nul. Lorsque la température augmente, on constate une nécrose des spermatocytes primaires conduisant à une stérilité temporaire, puis en poursuivant l'échauffement, une dégénérescence des cellules interstitielles et de tout le tissu testiculaire. D'autres équipes ont constaté des variations réversibles de la morphologie embryonnaire des souris, et durant la gestation, une consommation réduite de nourriture de la part des femelles. On observe que, suivant les expériences, on retrouve ou non une diminution du poids de naissance et/ou un ralentissement de la croissance post-natale. A haut niveau d'exposition chez la femelle gestante, on constate un effet tératogène et une diminution du poids des fœtus résistants. Dans ces expériences, l'effet thermique est prédominant mais il ne semble pas expliquer à lui seul les résultats obtenus.

4.4.1.1.3. Modifications hématologiques

• A 900 MHz

Pour des DAS de $2,5 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, on n'a constaté aucune variation du nombre des leucocytes, le volume sanguin et l'hématocrite restant inchangés. Les variations essentielles portent sur le taux des triglycérides, de l'albumine et des protéines totales, dont les valeurs sont augmentées. Les auteurs semblent voir dans ces modifications une adaptation au stress liée à l'exposition aux hyperfréquences. Par ailleurs, on ne retrouve aucune variation de l'action des agents mitogènes (phytohémagglutinine, concanavaline A) sur les cellules d'animaux exposés.

• A 2 450 MHz

Des hémorragies multiples et le décès des animaux exposés à des niveaux conduisant à une augmentation de température majeure sont constatés,

précédés au début d'une augmentation du rythme cardiaque et de l'amplitude respiratoire liée à une déshydratation.

4.4.1.1.4. Apparition de cataractes

Les études portant sur le chien et le lapin montrent qu'à une puissance d'exposition de 100 W des cataractes antérieures apparaissent. Les cataractes postérieures se développent plus progressivement. Les zones cristalliniennes où se situent les plus hautes températures sont variables selon la longueur d'onde, car celle-ci détermine la profondeur de pénétration au sein du tissu biologique.

4.4.1.2. Effets spécifiques

A côté des effets thermogènes, d'autres effets ont été décrits qui ne paraissent pas dus à ce dégagement régional de chaleur.

En fait, l'étude analytique des paramètres des expérimentations ayant abouti à la négation ou à la réalité de ces effets montre que les premières utilisent des expositions énergétiques importantes et des temps d'irradiation brefs, alors que les secondes correspondent à des densités de puissance faibles et à des durées d'exposition le plus souvent longues ; il s'agit donc de deux catégories d'expérimentations ne traitant pas du même sujet.

Par ailleurs, si on compare entre elles deux expériences apparemment similaires, mais aboutissant à des résultats contradictoires, on s'aperçoit que, dans tous les cas, un ou plusieurs paramètres diffèrent de façon significative. Comme précédemment, il s'agit en fait de deux expérimentations différentes.

Enfin, les mécanismes physio-pathologiques impliqués dans certaines expériences étant inhibés par l'hyperthermie, leurs auteurs en ont conclu à l'existence d'un effet « autre que thermique » faisant appel à des mécanismes différents.

Compte tenu du nombre d'expérimentations effectuées dans ce domaine, il n'est pas possible d'en établir une revue exhaustive. Seuls seront présentés ci-après les effets des OEM sur des systèmes capitaux pour l'homéostasie animale.

4.4.1.2.1. Modifications neurologiques et neuro-endocriniennes

Des modifications de l'EEG à certaines fréquences de modulation (12 à 16 Hz) et à certaines densités de puissance ($10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) ont été décrites, de même qu'une augmentation de la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique de certaines substances de poids moléculaire élevé ; une variation de la sensibilité aux médicaments neurotropes a été rapportée chez des animaux soumis à des OEM.

On a tenté d'expliquer cette action des OEM sur le système nerveux central par la mise en évidence d'une modification de la migration calcique vers l'extérieur des tissus cérébraux lorsqu'ils sont soumis à des OEM modulées à une fréquence de 11 à 16 Hz avec une puissance absorbée (DAS) de $0,75 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.

- **A 915 MHz**

On constate une augmentation de la perméabilité de la barrière hématoencéphalique, notamment à l'albumine.

- **A 2 450 MHz**

Pour des DAS de $0,6 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, on a constaté chez le rat une diminution de l'activité cholinergique (canaux Na^+ dépendants).

- **De 2 450 MHz à 3 000 MHz**

L'EEG de rats exposés pendant de longues périodes à des puissances faibles n'induisant aucune augmentation de température corporelle mesurable, montre l'apparition d'épisodes de pointes et de pointes-ondes anormales, qui seraient dues d'après les auteurs à l'action directe des microondes sur le cortex. Il est toutefois à noter que l'EEG enregistré dans les mêmes conditions chez le singe ne montre aucune modification.

La disparition de réflexes conditionnés ou leur modification chez le rat sont soumises à controverse selon les différentes études.

D'autres travaux réalisés chez le rat suggèrent que l'exposition aux microondes à de faibles densités de puissance (DAS de $0,6 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$) conduit à l'activation du système opioïde endogène (activation des récepteurs morphiniques de l'hippocampe et du cortex).

On a retrouvé de la même façon une modification de l'activité des récepteurs à certains neurotransmetteurs (acétylcholine, noradrénaline, dopamine) variable suivant la durée et la répartition de l'exposition. L'exposition aux micro-ondes à de basses puissances peut être aussi le facteur d'une augmentation des valeurs du CRF comme pour un stress, ainsi que l'ont souligné certains auteurs.

Certaines études attribuent aux OEM la capacité d'augmenter la perméabilité de la barrière hématoencéphalique. Plusieurs expérimentations ont été conduites en mettant en œuvre divers rayonnements et champs (radiofréquences, hyperfréquences, champs pulsés et champs continus) agissant sur plusieurs molécules : albumine, sucre, fluorescéine, peroxydase. Les résultats dépendent pour une large part de la fréquence utilisée.

- **A 915 MHz**

A des niveaux de DAS n'induisant aucune augmentation de la température corporelle, on retrouve chez l'animal de laboratoire une augmentation de la perméabilité de la barrière hématoencéphalique à l'albumine marquée au bleu Evans et surtout au patent-blue en champ pulsé.

- **A 2 450 MHz**

Plusieurs expériences ont été menées à différents niveaux thermiques en utilisant successivement plusieurs molécules radiomarquées. Ces expérimentations ont démontré, d'une part, une élévation du volume sanguin cérébral sous l'action de la chaleur à l'origine d'un artefact technique (augmentation de la radioactivité cérébrale) et, d'autre part, une modification de la captation pinocytaire variable selon la molécule concernée et en relation elle aussi avec l'augmentation de la température corporelle. Les auteurs concluent que l'augmentation de la perméabilité de la barrière hématoencé-

phalique sous l'effet des micro-ondes est simplement liée à la variation de la température cérébrale.

Il est à noter que l'appréciation de diverses expériences dans leur globalité se heurte à différents problèmes :

- grande variabilité de l'exposition ;
- défaut de preuve histologique de l'augmentation de la perméabilité de la barrière hématoencéphalique ;
- problème de l'anesthésique employé qui, s'il permet un plus grand confort dans le déroulement de l'expérience, modifie la thermorégulation de l'animal et a parfois une action directe sur la barrière hématoencéphalique.

En conclusion, l'augmentation de la perméabilité de la barrière hématoencéphalique sous l'effet des hyperfréquences demande encore à être confirmée.

Certains résultats suggèrent que les glandes thyroïdes ou surrénales ne sont pas directement stimulées par les OEM et qu'il s'agirait plutôt d'une réponse globale de l'axe hypothalamo-hypophyso-glandulaire à certains paramètres d'exposition de type « effet fenêtre ».

4.4.1.2.2. Action sur le comportement

- Pour des expositions de courte durée avec un $DAS \leq 4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, on relève une modification du comportement moteur et des performances des activités acquises ;
- pour des expositions de durées plus longues, ces modifications ne surviennent que pour des DAS de valeurs précises pour une fréquence donnée (0,9 et $2 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ à 915 MHz, par exemple).

De plus, il semble ressortir de l'ensemble des études :

- une fatigabilité accrue des animaux exposés ;
- une diminution de leur réactivité lors de l'adaptation à de nouvelles conditions d'environnement ;
- une modification transitoire des réflexes conditionnés ;
- une modification des réponses physiologiques semblable à celles d'un stress faible : ACTH, corticostérone,...

4.4.1.2.3. Action sur les systèmes immunitaire et hématopoïétique

• Action sur la réponse immunitaire

Plusieurs expérimentations révèlent qu'à des niveaux d'exposition faible et de courte durée, on retrouve une stimulation du système immunitaire avec majoration du taux d'anticorps par rapport à une population témoin, alors que pour des niveaux d'exposition plus importants ou une exposition chronique, on assiste ensuite à une normalisation puis, éventuellement, à une dépression du système immunitaire.

Pour certains, les RF peuvent entraîner une augmentation de l'index mitotique et de la transformation lymphoblastique spontanée ou après induction par un mitogène, un accroissement du taux d'anticorps induits, etc., alors que d'autres ne retrouvent pas ces résultats. Sachant que ces expérimentations n'ont pas pu être effectuées dans les mêmes conditions techniques, il

n'est pas possible actuellement de décrire une réponse cohérente du système immunitaire aux OEM. En particulier, il semble que l'effet fenêtre interviene, ce qui complique l'analyse des résultats.

• Action sur le système hématopoïétique

Il en est de même en ce qui concerne la réponse du système hématopoïétique à l'action des radiofréquences, les modifications observées étant susceptibles d'être rapprochées des perturbations de l'équilibre thermique des animaux.

4.4.1.2.4. Modifications des fonctions reproductrices et impact sur la descendance

• A 2 450 MHz

Des équipes ayant exposé des rates pendant leur gestation, sans augmentation de la température corporelle, ont constaté parmi leur descendance des déficits neurologiques significatifs ainsi que des modifications du taux de certains de leurs médiateurs et enzymes (ATP, acétylcholinestérase, catécholamines). Ces différences ont été rapidement réversibles au bout de quelques mois de vie. Aucune mutation de cellules germinales n'est apparue dans des conditions expérimentales précises.

4.4.1.2.5. Effet carcinogène

• A 915 MHz

En température contrôlée, l'exposition des mammifères ne fournit aucun argument en faveur d'une éventuelle induction des tumeurs par les micro-ondes, confirmant les observations des expériences « in vitro ».

4.4.1.2.6. Problème particulier de la sensibilité aux médicaments

Diverses études ont montré chez le petit mammifère une modification de l'effet pharmacologique de plusieurs drogues lorsque l'animal est soumis aux micro-ondes (notamment drogues convulsivantes et curarisantes). L'action du rayonnement ne se fait sentir qu'après un délai de une à deux semaines et cet effet diminue ensuite (ou augmente) de façon variable suivant le temps d'exposition. Les auteurs proposent, comme explication du phénomène, une modification des mécanismes enzymatiques impliqués.

4.4.1.2.7. Synthèse des effets spécifiques des OEM

L'ensemble des effets obtenus après l'exposition d'animaux à de faibles densités de puissance paraît suivre les règles suivantes :

- les effets sont généralement fonctionnels et transitoires ;
- il semblerait s'agir de modifications de la cinétique des phénomènes plutôt que de leur déclenchement ;
- nombre des effets ne surviennent que dans une « fenêtre » avec réponses variables pour chaque paramètre en fonction des autres paramètres.

Ainsi on a pu montrer la dépendance fréquentielle du flux calcique étudié dans le tissu cérébral de poulet soumis à des OEM. Le flux calcique est

augmenté pour une modulation de 16 Hz alors que les modulations plus élevées ou moins élevées sont inefficaces. Cet effet a été retrouvé à plusieurs fréquences porteuses (50, 147 et 450 MHz) et pour le tissu cérébral de chat.

Étant donné le rôle capital joué par le Ca^{++} au niveau des réactions enzymatiques, de la physiologie membranaire et du système nerveux central, de nombreuses recherches ont été effectuées dont il résulte que :

- la réponse biologique semble due à la fréquence de modulation et non à la fréquence porteuse ;
- le Ca^{++} membranaire est vraisemblablement la cible des OEM ;
- les mécanismes affectant les modifications de flux calcique dans le cerveau ne peuvent être expliqués par les théories biochimiques classiques. Plusieurs suggestions concernant de nouveaux mécanismes ont été proposées et sont en cours de validation ;
- il n'a jamais été retrouvé « in vivo » de modification physiologique des systèmes Ca^{++} dépendants sous l'effet des OEM.

Il y a lieu de noter, que si ces effets étaient démontrés, ils seraient susceptibles de remettre en cause, du moins en partie, le concept de seuil d'activité et donc de sécurité établi à partir des DAS et de l'intensité des champs électromagnétiques.

En conclusion, nous voyons donc que l'étude des effets biologiques des OEM, qu'ils soient liés à de fortes ou à de faibles absorptions énergétiques, est extrêmement complexe.

En ce qui concerne la dosimétrie, le problème de la répartition intra-tissulaire de l'absorption énergétique n'est pas encore résolu et doit l'être si nous voulons comprendre les phénomènes biologiques provoqués par l'exposition aux OEM.

Quant aux effets eux-mêmes, seule la poursuite de recherches pertinentes (expositions et mesurages adaptés) permettra de préciser les paramètres qui les régissent pour mieux comprendre l'action biologique des OEM.

4.4.2. Effets sur l'homme

4.4.2.1. Pathologies liées aux RF et HF

4.4.2.1.1. Exposition aiguë

Si l'homme est accidentellement exposé à des fortes densités de puissance, surtout lorsque celles-ci sont focalisées, on peut voir survenir des brûlures superficielles ou profondes. Cependant la douleur provoquée par leur apparition entraîne le plus souvent un réflexe de défense de l'organisme avec retrait de la partie exposée du corps hors du champ nocif. Le traitement des lésions et de leurs conséquences immédiates est variable en fonction de l'importance de l'hyperthermie, de sa durée et de sa localisation corporelle.

Lorsque l'énergie n'est pas focalisée, on ne retrouve que les effets physiologiques liés à l'hyperthermie loco-régionale. La gravité dépend alors uniquement de la région du corps exposée et il est bien évident que la tête est plus sensible que les extrémités des membres.

4.4.2.1.2. Expositions répétées ou chroniques

Enfin, en cas d'expositions répétées et/ou prolongées à des densités de puissance modérées, c'est-à-dire supportables par l'homme, on est en présence d'un poste de travail à charge thermique durable auquel cependant semble se surajouter l'action propre des radiofréquences.

• Action sur le système neuro-végétatif

Ce système semble le plus sensible aux OEM. Aussi doit-on rechercher chez le personnel travaillant de façon habituelle et prolongée près des émetteurs RF :

- une asthénie physique, musculaire, surtout aux membres inférieurs, avec parfois des myalgies ;
- une asthénie psychique avec difficulté récente d'idéation, perte de la mémoire, apathie contrastant souvent avec la survenue d'une irritabilité anormale et de réactions caractérielles. Il est à signaler à ce propos que l'on relève souvent, immédiatement après l'exposition, une période primaire et transitoire d'euphorie et de sensation d'être en « pleine forme » ;
- des troubles des cycles nyctéméraux et du sommeil (insomnie) ;
- des céphalées le plus souvent pulsatiles ;
- une sensation ébrieuse, des vertiges, voire de véritables lipothymies pouvant être parfois associées à des nausées ;
- des troubles de la thermorégulation à titre de poussées fébriles le plus souvent modérées mais inexplicables avec parfois frissons et crises sudorales ;
- des sensations dysesthésiques des extrémités des membres ;
- enfin, anorexie et amaigrissement peuvent être observés.

L'examen clinique est le plus souvent négatif, tout au plus peut-on noter une tachycardie dont on ne peut assurer qu'elle ne soit pas due à l'anxiété ou à l'angoisse que présentent souvent ces patients.

L'ensemble de ces signes n'étant pas caractéristique et pouvant être déclenché par bien d'autres causes, le problème tient au fait d'en relier l'apparition à l'exposition professionnelle du sujet, objectif souvent très difficile à atteindre. Seul un interrogatoire minutieux, voire pointilleux, associé à une enquête sociale, familiale et professionnelle permet d'affirmer ou d'infirmer une possible corrélation.

• Action sur le système neuro-endocrinien

Il réagit aux OEM et dans certaines observations cette atteinte est confirmée par une modification des taux sanguins de certaines hormones.

Cependant, et comme précédemment, le problème réside dans l'établissement de la relation « cause-effet » d'autant que l'on commence à connaître assez bien les interrelations existant entre la régulation neuro-endocrinienne et les perturbations psychiques.

Il n'en reste pas moins vrai que lorsque des désordres endocriniens apparaissent chez un sujet exposé aux OEM, il est nécessaire de les explorer complètement et d'en rechercher l'étiologie.

• Action sur le système immunitaire

Elle est très étudiée sur le plan expérimental et il ne semble pas, à notre connaissance, qu'elle ait fait apparaître des troubles cliniquement décelables.

Enfin, il faut se rappeler que jusqu'à présent tous les signes cliniques ou para-cliniques observés, même les plus importants, ont toujours été régressifs et qu'il suffit de soustraire le sujet de l'action des OEM pour obtenir, à plus ou moins long terme, une normalisation complète du patient avec restitution « ad integrum » de toutes ses fonctions.

• Action sur le cristallin

Il semblerait que cette dernière, évoquée sur le plan expérimental, soit en fait peu ou pas retrouvée dans la pratique. Il paraît toutefois logique de surveiller tout particulièrement les sujets atteints d'une pathologie prédisposante et d'effectuer une surveillance plus assidue chez les porteurs d'une affection cataractogène, les diabétiques par exemple.

4.4.2.2. Effet particulier des HF

Le seul effet attesté propre aux hyperfréquences est la perception auditive des hyperfréquences ou « microwave hearing » ; dans la zone d'exposition à des rayonnements électromagnétiques de 425 à 6500 MHz, l'oreille humaine peut percevoir une sensation auditive diversement traduite par un « click » ou un « buzz ».

Les premières constatations de cette perception remontent à la deuxième guerre mondiale quand les opérateurs radar ont signalé pour la première fois cette sensation. Les premières études ont d'abord fait l'objet d'un certain scepticisme de la communauté scientifique avant d'être confirmées par d'autres observations plus nombreuses. Le mécanisme de cette perception est lié à une expansion thermo-élastique du tissu cérébral sous l'effet des micro-ondes. Lorsque les micro-ondes arrivent au niveau du crâne, l'énergie absorbée est convertie en chaleur et produit une petite, mais très rapide, élévation de température (10^{-6} °C en 10 μ s). Cette augmentation de température se produisant pendant un temps très court, elle génère une expansion thermo-élastique rapide du tissu cérébral, ce qui entraîne une vague de pression voyageant jusqu'à la cochlée et détectée par les cellules de l'oreille interne.

Au niveau des conséquences sur la santé, la question peut être considérée sous deux aspects.

4.4.2.2.1. Effet sur l'acuité auditive

Bien qu'il soit peu probable que la perception des micro-ondes constitue un trouble, on ne sait pas quelles peuvent être les répercussions des ondes de pression thermo-élastiques générées à des niveaux significativement élevés. Ni les données physiologiques, ni l'expérience ne permettent pour l'instant une complète analyse du phénomène. Le problème se pose en particulier pour les sujets atteints de maladies vasculaires.

4.4.2.2.2. Réactions physiologiques et psychologiques

La perception auditive des micro-ondes produit des effets similaires aux réactions habituelles de stress (elle produit notamment chez l'animal une réaction d'évitement).

4.5. LIMITES D'EXPOSITION

Il n'y a aucun texte réglementaire français régissant les seuils de sécurité concernant l'exposition aux rayonnements électromagnétiques de radiofréquences et hyperfréquences.

Néanmoins, plusieurs comités internationaux ont établi des recommandations basées sur l'état des connaissances récentes et l'interprétation des données expérimentales.

La référence actuelle s'inspire de la prénorme européenne ENV 50166-2.

4.5.1 Valeurs limites fondamentales

Au-dessus de 10 MHz, la limite supérieure de débit d'absorption spécifique (DAS) ne doit pas dépasser :

- 0,4 W · kg⁻¹ pour le corps entier ;
- 10 W · kg⁻¹ pour une partie du corps (sauf extrémités) ;
- 20 W · kg⁻¹ pour les extrémités.

Ces restrictions de base résultent de l'aboutissement d'observations effectuées à partir d'expérimentations animales. Elles constituent le fondement des valeurs limites d'exposition dérivées d'intensités de champs électriques et magnétiques.

Entre 10 kHz et 10 MHz, le concept de DAS est difficilement acceptable et l'état actuel des connaissances est insuffisant pour établir clairement une relation entre DAS et effets biologiques. Les limites d'exposition actuellement préconisées sont donc des extrapolations à des fréquences plus basses des données physiques et expérimentales connues pour de plus hauts niveaux en tenant compte des effets de la densité de courant induit. En dessous de 100 kHz, le concept de densité de courant induit à la surface et en profondeur du corps humain constitue la donnée essentielle.

De plus, si les effets athermiques des OEM ne peuvent plus être ignorés, ils sont, à l'heure actuelle, difficilement quantifiables et prédictibles. Le CENELEC TC 211 a introduit un coefficient de sécurité pour inclure les effets spécifiques dans les hypothèses d'ordre thermique. Il est néanmoins recommandé de limiter le plus possible le stationnement dans les aires d'exposition en dehors des heures de travail.

4.5.2. Valeurs limites dérivées

A partir des restrictions de base, il a été défini des valeurs limites d'exposition professionnelle dérivées (VLE) servant de références pratiques aux mesurages effectués en laboratoires et sur sites. Ces valeurs sont données pour une exposition de durée supérieure ou égale à 6 mn.

Tableau 10
Valeurs limites d'exposition professionnelle aux OEM de RF (ENV 50166-2)

Fréquence f (MHz)	Valeur rms d'intensité de champ électrique (V/m)	Valeur rms d'intensité de champ magnétique (A/m)	Densité de puissance équivalente (onde plane) (W/m ²)
0,01-0,038	1 000 ^(a)	42 ^(a)	
0,038-0,61	1 000 ^(a)	1,6/f ^(a)	
0,61-10	614/f	1,6/f	
10-400	61,4	0,16	10
400-2 000	$3,07 \cdot f^{1/2}$	$8,14 \cdot 10^{-3} \cdot f^{1/2}$	f/40
2 000-150 000	137	0,364	50
150 000-300 000	$0,354 \cdot f^{1/2}$	$9,4 \cdot 10^{-4} \cdot f^{1/2}$	$3,334 \cdot 10^{-4} \cdot f$

(a) Valeurs limites d'exposition respectivement pour E ou H. L'exposition aux deux composantes de champs (E, H) d'une source unique devrait être assimilée à une exposition aux rayonnements simultanés de deux sources indépendantes.

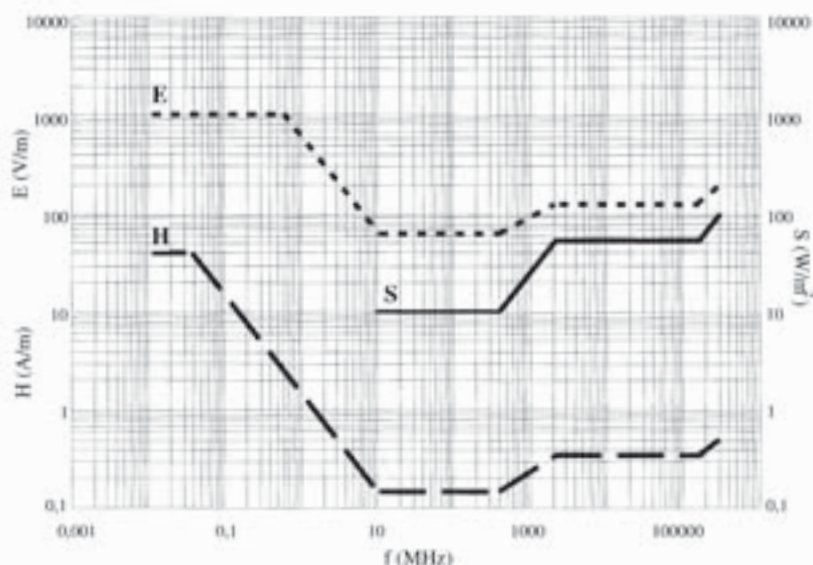


Figure 10
Diagramme des VLE professionnelles aux OEM de RF

Les effets dus aux OEM sont considérés comme cumulatifs et les effets athermiques, s'ils sont encore mal connus, sont pris en compte.

En plus d'une limitation d'exposition à des valeurs de champs et de densité de puissance, il est prévu une limitation des courants induits dans les membres du corps humain par les ondes électromagnétiques de fréquences comprises entre 10 et 100 MHz : elle est de 100 mA.

Si une personne est en contact avec un objet métallique, l'intensité de courant de contact ne doit pas dépasser certaines valeurs en fonction de la fréquence de l'onde électromagnétique émise (tableau 11).

Tableau 11
Intensités limites de courant de contact

Fréquence f	Courant de contact
(MHz)	(mA)
0,01-0,1	$350 \cdot f$
0,1-3	35

4.5.3. Cas particuliers

4.5.3.1. Sources pulsées

Dans le cas d'OEM variables véhiculant des impulsions d'une durée inférieure ou égale à 30 μ s, le tableau 12, page suivante, donne les valeurs limites d'exposition de crête en milieu professionnel.

Figure 11
Diagramme des VLE professionnelles de crête aux OEM de RF

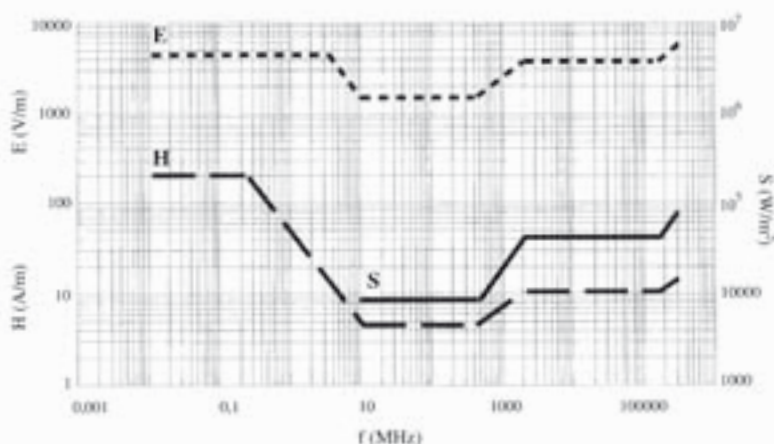


Tableau 12
Valeurs limites d'exposition professionnelle de crête (ENV 50166-2)

Fréquence f (MHz)	Valeur crête d'intensité de champ électrique (V/m)	Valeur crête d'intensité de champ magnétique (A/m)	Densité de puissance crête (W/m²)
0,01-0,23	4 760	200	
0,23-3,73	4 760	46/f	
3,73-10	17 750/f	46/f	
10-400	1 775	4,6	8 160
400-2 000	$88,8 \cdot f^{1/2}$	$0,23 \cdot f^{1/2}$	$20,4 \cdot f$
2 000-150 000	3 970	10,3	40 890
150 000-300 000	$10,3 \cdot f^{1/2}$	$2,66 \cdot 10^{-2} \cdot f^{1/2}$	$0,274 \cdot f$

4.5.3.2. Exposition à plusieurs sources de fréquences différentes

Soit des sources émettant à des fréquences f_i et f_j , la prénorme européenne ENV 50166-2 propose le respect des inéquations suivantes :

$$\sum_i \frac{E_i}{E_{VLE,i}} + \sum_j \frac{H_j}{H_{VLE,j}} \leq 1 \quad 60 \text{ Hz}^* \leq f \leq 700 \text{ kHz}$$

$$\sum_i \left(\frac{E_i}{E_{VLE,i}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{et} \quad \sum_j \left(\frac{H_j}{H_{VLE,j}} \right)^2 \leq 1 \quad 700 \text{ kHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$$

où E_i est la composante de champ électrique due à la i ème source, en V/m

H_j est la composante de champ magnétique due à la j ème source, en A/m

$E_{VLE,i}$ et $H_{VLE,j}$ sont les valeurs limites correspondantes de champs électriques et magnétiques (* le cas des fréquences inférieures à 10 kHz n'entre pas dans le cadre de ce chapitre mais au-dessus de 10 kHz, voir tableau 10 et figure 10).

Pour les valeurs de crête de champs électriques et magnétiques :

$$\sum_i \frac{E_i}{E_{VLE,i}} \leq 1 \quad \text{et} \quad \sum_j \frac{H_j}{H_{VLE,j}} \leq 1 \quad 10 \text{ kHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$$

où les paramètres de champs se réfèrent aux valeurs crêtes et aux valeurs limites correspondantes du tableau 12 et de la figure 11.

A titre d'exemple numérique, quatre sources émettent de façon continue en milieu professionnel selon les données du tableau 13 :

Tableau 13
Hypothèses de calcul (exposition continue)

Sources	f (MHz)	E (V · m ⁻¹)	H (A · m ⁻¹)	E _{VLE} (V · m ⁻¹)	H _{VLE} (A · m ⁻¹)
S ₁	27,500	40	0,1	61,4	0,16
S ₂	7,500	52	0,1	81,9	0,21
S ₃	3,500	102	0,2	175,4	0,46
S ₄	0,900	210	0,5	682,2	1,78

On applique les inéquations précédentes prises dans la bande de fréquences appropriée :

$$\sum_1^4 \left(\frac{E_{1,4}}{E_{VLE, 1,4}} \right)^2 = \left(\frac{40}{61,4} \right)^2 + \left(\frac{52}{81,9} \right)^2 + \left(\frac{102}{175,4} \right)^2 + \left(\frac{210}{682,2} \right)^2 = 1,26 > 1$$

$$\sum_1^4 \left(\frac{H_{1,4}}{H_{VLE, 1,4}} \right)^2 = \left(\frac{0,1}{0,16} \right)^2 + \left(\frac{0,1}{0,21} \right)^2 + \left(\frac{0,2}{0,46} \right)^2 + \left(\frac{0,5}{1,78} \right)^2 = 0,89 < 1$$

Le salarié est donc soumis à un champ électrique excessif ($1,26 > 1$) duquel il peut se protéger par l'utilisation d'une protection adaptée et à un champ magnétique acceptable ($0,89 < 1$).

4.5.3.3. Sources de faibles puissances

L'ANSI note que la VLE peut être dépassée si la puissance de sortie de l'appareil est **inférieure à 7 W**.

L'ACGIH précise que cette dérogation s'applique aux fréquences comprises entre **100 kHz** et **1,5 GHz**.

Ces aménagements ne s'appliquent pas si la source émettrice est placée à moins de **2,5 cm** du corps. C'est le cas des radiotéléphones portatifs qui sont en cours de normalisation par le **CENELEC TC 111**.

4.5.3.4. Recommandations pratiques pour les HF

L'ANSI recommande en milieu professionnel :

- le port de gants et de vêtements protecteurs (quand ils existent et que leur efficacité est reconnue) ;

- l'information du personnel sur la connaissance des risques, en particulier l'existence de courants induits dans les objets conducteurs ;
- une bonne exécution des gestes de travail.

Les salariés peuvent être protégés en utilisant un tissu de protection composé d'un alliage de mailles d'acier inoxydable et de coton. Ce tissu peut être travaillé comme un tissu classique (vêtements, rideaux). L'effet de protection est variable selon la fréquence du champ et la dimension des mailles (25 à 95 % de réduction de l'intensité du champ électrique). Par ce procédé, on crée une sorte de « cage de Faraday » autour de la personne. Ce tissu paraît intéressant pour les émissions souvent utilisées en milieu industriel de 27, 434, 915 et 2450 MHz.

4.5.3.5. Limite d'application des seuils d'exposition recommandés

Pour ce qui résulte des éventuels dangers présentés par les effets spécifiques, l'épineux problème des effets fenêtrés, tant en fréquences qu'en puissances, n'a pas été pris en compte pour la fixation des valeurs limites d'exposition. Il en est de même des absorptions énergétiques très localisées (points chauds) pouvant survenir dans des zones physiologiquement très importantes (plancher du IV^e ventricule du cerveau par exemple) et des variations de champs survenant lors de l'utilisation d'impulsions très courtes et très puissantes avec des fréquences très faibles.

Ces données, bien que connues et admises, n'ont pas pu être prises en compte du fait du trop petit nombre de documents fiables à la disposition des comités « ad hoc » et de l'ignorance actuelle de la nocivité pour l'homme des effets observés.

En conclusion, si les normes actuelles assurent la sécurité des travailleurs contre les accidents aigus de l'exposition aux OEM, en revanche, il faut être conscient qu'elles ne couvrent pas d'éventuels effets nocifs des expositions chroniques.

4.5.3.6. Les fours à micro-ondes

Ces appareils fonctionnent en verrouillage hermétique disposant d'une sécurité « porte » qui coupe l'alimentation et donc l'émission du champ dès l'ouverture indépendamment du dispositif normal de mise sous tension et de coupure. Cette sécurité, garantie par le fabricant, peut être vérifiée en milieu professionnel par la mesure des fuites éventuelles. L'entretien et la propreté de l'appareil, notamment au niveau de son système de fermeture (joints, gonds, etc.), sont nécessaires à l'étanchéité du verrouillage.

Il existe des normes internationales et communautaires de construction et d'utilisation :

- **CEI 519-6 (1982) :**

« Sécurité dans les installations électrothermiques – 6^e partie : spécifications pour la sécurité des installations électrothermiques industrielles à hyperfréquences ».

- **NF EN 60335-225/A2 d'août 1993 (NF C 73-825/A2) = CEI 335-2-25 :**

« Sécurité des appareils électrodomestiques et analogues – 2^e partie : règles particulières pour les fours à micro-ondes ».

La densité de puissance de fuite éventuelle doit être inférieure à **5 mW · cm⁻²** en tout point distant d'au moins **5 cm** des parties accessibles de l'appareil.

Les précautions à prendre pour une utilisation adaptée et les conseils de maintenance de l'appareil doivent être fournis par le fabricant.

Quelques mesures simples assurent aux utilisateurs le maximum de sécurité : autant que possible, éviter les projections par un film plastique adapté (sauf en cas d'utilisation simultanée du grill), nettoyer régulièrement l'intérieur du four et les joints de porte et protéger de même le système de fermeture par une utilisation correcte (ne pas forcer la fermeture, car il est essentiel que le verrouillage reste étanche).

4.5.4. Éléments de métrologie des sources RF et HF

L'importance des mesurages directs de la valeur des OEM est primordiale. Ils doivent être effectués par des techniciens spécialisés avec les sources émettrices en fonctionnement opérationnel :

- en champ libre, c'est-à-dire à une distance minimale de 20 cm de tout objet ;
- uniquement en présence du personnel nécessaire au fonctionnement de l'appareillage.

Ils doivent être réalisés non seulement au poste de travail mais dans tout le local où se trouvent la ou les sources émettrices afin d'intégrer l'environnement professionnel.

Ils seront répétés à chaque modification de la forme des objets cibles susceptibles de modifier le diagramme du rayonnement diffusé : en particulier dans les tunnels de séchage, en fonction des produits exposés au séchage.

Dans le cas où des courants induits pourraient éventuellement provoquer des décharges, voire des brûlures, les courants doivent être mesurés avec des appareils appropriés ayant une constante de temps inférieure à 1 seconde.

Si les manipulations habituelles conduisent au fonctionnement simultané de plusieurs appareils émettant à des fréquences différentes, on devra réaliser les mesures appareil par appareil et calculer ensuite l'exposition résultante en appliquant la méthode proposée au § 4.5.3.2. Les valeurs obtenues seront confrontées aux recommandations et normes en vigueur.

Dans le cas où l'intensité des OEM serait trop élevée, une adaptation de l'appareillage par le fabricant devra être réalisée afin de maintenir l'exposition en dessous des valeurs recommandées.

L'entreprise doit établir un balisage autour de la zone d'émission de façon à signaler l'aire où une exposition du personnel est possible. Un pictogramme réglementaire de signalisation doit être apposé conformément à l'arrêté ministériel du 4 novembre 1993 « Signalisation de sécurité et de santé sur les lieux de travail » (voir page suivante).

En ce qui concerne les appareils de mesurage des RF et des HF, il existe plusieurs possibilités.



Dessin noir sur fond jaune

4.5.4.1. Récepteurs isotropes large bande (30 MHz - 18 GHz)

Ils permettent la mesure de la densité de puissance en $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ à partir de la mesure du champ électrique de toutes les sources émettant dans la bande passante. Ils ne sont utilisables qu'en champ lointain et ne peuvent pas dans tous les cas être mis en oeuvre pour la mesure des fuites qui se situent en champ proche pour les RF et certaines basses fréquences des HF.

Ils ne peuvent pas déterminer la valeur de la fréquence de l'onde ni mesurer les puissances crêtes.

4.5.4.2. Récepteurs sélectifs

Ils doivent être suffisamment fiables dans la gamme des fréquences considérées pour recueillir une bande passante suffisamment étroite.

Les appareils peuvent mesurer, soit l'intensité globale du champ, soit la crête d'intensité (mesure des signaux brefs). Ils doivent être protégés par isolation de tout courant ou tension annexe.

A noter que les mesures de champ sur site sont souvent différentes des caractéristiques précises obtenues en chambre anéchoïque et fournies par le fabricant du fait des phénomènes de diffusion, réfraction et réflexion des ondes sur les parois et les objets présents dans le local.

Dans le cadre de l'exposition en milieu professionnel, c'est la résultante de l'ensemble appareillage-milieu qui doit être évaluée. C'est à cette exposition qu'est réellement soumis le personnel.

4.6. MÉDECINE DU TRAVAIL

4.6.1. Exposition aigue aux RF et HF

Il s'agit généralement d'une exposition accidentelle souvent brève entraînant une hyperthermie localisée. Le problème réside dans la méconnaissance, pour certaines fréquences, de la répartition énergétique à l'intérieur du corps et d'une éventuelle existence de points chauds où l'élévation thermique aurait été suffisamment importante pour entraîner une coagulation

des protéines, c'est-à-dire une nécrose tissulaire interne dont l'expression clinique peut être retardée.

Outre le traitement des lésions et de leurs conséquences immédiates, variables en fonction de l'importance de l'hyperthermie, de sa durée et de sa localisation corporelle, il est donc indispensable de faire une étude des circonstances de l'accident : fréquence émise, puissance, type d'émission (continue ou pulsée), densité de puissance au niveau de la zone atteinte, diagramme du champ, possibilité de focalisation.

De plus, du fait de certaines lésions profondes ou pouvant ne s'extérioriser cliniquement qu'après un certain délai, l'accidenté doit être suivi médicalement pendant 15 à 20 jours.

4.6.2. Expositions répétées ou chroniques

C'est la situation la plus fréquente à laquelle est confronté le médecin du travail.

Si on tient compte d'une étude épidémiologique effectuée par l'armée de l'air française dans laquelle 60 % du personnel exposé ne présentait aucun signe clinique ou des signes subjectifs mineurs, 30 % du personnel présentait un simple syndrome neuro-végétatif non spécifique et 10 % présentait des signes cliniques authentifiés, force est de constater qu'il existe indiscutablement une sensibilité individuelle à l'action des RF et HF. On remarque donc que, soumises à une même exposition, certaines personnes peuvent présenter des troubles cliniques, d'autres non.

Compte tenu du caractère non spécifique des troubles observés, leur imputabilité à l'exposition à des RF ou HF ne peut être systématique et doit faire l'objet d'une enquête sérieuse.

Tout en restant vigilant, il convient d'éviter d'induire la survenue de ces syndromes neurovégétatifs par des interrogatoires trop systématiquement effectués lors des visites médicales.

Enfin, les RF et HF pouvant interférer sur l'évolution des dysendocrinies et des dystonies neurovégétatives préexistant à l'exposition ou apparues pour d'autres causes, il faut être très prudent quant à l'affectation de personnes présentant ces troubles à des postes de travail à risque.

La mission de prévention du médecin du travail et de l'ingénieur de sécurité consiste à faire en sorte qu'il existe le moins possible de postes exposés. C'est dire l'importance de la réalisation, par des personnes compétentes, de mesurages réguliers des champs électromagnétiques existant au niveau des différents postes de travail et de la mise en place de protections adéquates si on ne peut pas réduire l'émission (cf. 4.5.3.4.).

4.6.3. Surveillance médicale

4.6.3.1. Cas général

En ce qui concerne les visites médicales, les résultats expérimentaux très contradictoires obtenus sur l'animal et le peu de renseignements concer-

nant l'exposition humaine ne permettent pas l'élaboration actuelle d'un protocole de surveillance défini.

On conseillera néanmoins l'augmentation de la fréquence des visites médicales et une surveillance plus attentive des personnels soumis à des OEM en fonction de la nature du travail ; on portera une attention particulière à l'apparition ou à l'évolution de tout signe neurologique, endocrinien ou immunologique, particulièrement chez les sujets présentant déjà des affections de ce type.

Il est souhaitable de prévoir, tous les deux ans, un contrôle oculaire avec examen à la lampe à fente en recherchant toute anomalie éventuelle, en particulier cristallinienne.

4.6.3.2. Contre-indications particulières à l'exposition aux RF et HF

Légalement, il n'existe ni en France ni dans aucun autre Etat de contre-indications médicales à un emploi exposé aux RF ou aux HF.

4.6.3.2.1. Porteurs d'implants passifs

La différence doit être faite entre :

- **le matériel inerte** (plastique), non perturbé par les OEM et pouvant donc être porté sans inconvénient ;
- **les implants passifs métalliques** (fils métalliques, prothèses, catgut chromé, stérilets,...). Ceux-ci peuvent, suivant leur forme, leur dimension, leur position et la fréquence utilisée, être source d'un échauffement du tissu environnant l'implant ou d'une induction de charges électriques. Cette dernière peut provoquer, par effet pointe, des microdécharges perçues généralement comme des picotements et, dans certains cas particuliers, être à l'origine de manifestations plus sérieuses telles qu'une coagulation locale.

Le médecin du travail doit contrôler la bonne tolérance du matériel lors de la période initiale de l'emploi par une surveillance médicale appropriée.

4.6.3.2.2. Porteurs d'implants actifs

Pour les stimulateurs cardiaques, les prothèses auditives, les pompes à médicaments,..., il convient de tenir compte de l'interaction possible entre les champs électromagnétiques et les circuits électriques, voire électroniques, de l'appareillage. Il s'agit là de s'interroger sur la compatibilité électromagnétique du matériel et, vu la difficulté actuelle de connaître le seuil d'intensité de champ pour lequel un appareil donné peut voir son fonctionnement modifié, il est souhaitable de prononcer l'inaptitude au poste de travail en cas de première affectation. Dans le cas contraire, c'est-à-dire pour le personnel en place venant de subir une implantation, il y a lieu, avant de se prononcer, de faire procéder à une étude de poste plus poussée et d'éventuellement faire appel à une consultation spécialisée en pathologies professionnelles.

4.6.3.2.3. Femmes enceintes

Concernant la grossesse, la littérature scientifique fait état de quelques troubles chez l'animal (cf. § 4.4.1.2.4.). Ces constatations sont controversées. Chez la femme, aucune anomalie de la gestation n'a pu être mise en évidence.

Cependant, l'existence de malformations congénitales spontanées, qu'on ne peut discerner d'éventuelles malformations acquises, entraîne un contexte psychologique particulier lié à la grossesse. Il semble donc préférable, dans le cadre d'une politique de prudence et dans l'attente d'une meilleure connaissance scientifique, de conseiller d'écarter les femmes enceintes des postes de travail soumis à de tels champs ou de les protéger par des vêtements appropriés qui s'avèrent efficaces dans le domaine des HF. A défaut de valeurs limites fondées sur des effets à long terme et sur la reproduction humaine, les VLE données aux tableaux 10 et 12 peuvent constituer provisoirement un élément d'appréciation.

4.6.4. Information du personnel

L'information fournie au personnel doit reprendre brièvement l'état actuel des connaissances et être suffisamment claire pour ne pas conduire à une exagération de la suspicion à l'égard du matériel émetteur utilisé.

Dans l'attente des résultats des études en cours, il convient d'expliquer au personnel qu'en ce qui concerne les effets à long terme où il semble exister une absence de relation dose-effet, on ne peut prendre de mesures de protection adaptées, ces dernières pouvant éventuellement s'avérer illusoires, voire dangereuses.

En conséquence, il est prudent de conseiller de limiter le stationnement dans les zones exposées aux OEM au temps strictement nécessaire à l'accomplissement des tâches prévues et de s'abstenir de s'exposer inutilement hors des périodes de travail effectives.

Le port d'implant actif ou passif devra être signalé au médecin du travail qui jugera de l'aptitude aux postes et des mesures à prendre (cf. § 4.6.3.2.). De plus il faut préciser que le médecin du travail est à la disposition des personnels pour les informer des éventuelles interactions des champs existant au niveau des postes de travail avec les implants.

Il sera expliqué au personnel féminin en état de procréer l'intérêt de signaler au médecin du travail les grossesses à leur début, ceci afin d'améliorer le suivi de la mère et de l'enfant. Cependant, il n'y a aucune obligation légale de révéler sa grossesse. Cette remarque est également valable pour le personnel atteint d'une maladie cataractogène (par exemple diabète) afin de faire assurer une surveillance oculaire appropriée par un spécialiste.

4.6.5. Recueil et analyse des informations : « vigilance industrielle »

Il convient de rappeler l'importance de la participation du médecin du travail aux systèmes de recueil et de traitement des observations d'accidents ou troubles liés aux OEM, ou de manifestations cliniques pouvant leur être imputées, pour orienter les recherches et améliorer les connaissances en ce domaine.

4.7. BIBLIOGRAPHIE

ACGIH. – « Threshold limite values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices », 1993-1994.

Andrew T., Huang M.D. – Immunologic and hematopoietic alterations by 2450 MHz radiation. USNC/URSI Annual meeting Seattle USA, Juin 1979.

Bach S.A., Luzzic A.F. – Effects of RF energy on human gamma globulin, *J. Med. Elec.*, 9-14, Nov. 1961.

Baranski S. – Effect of chronic MW irradiation on the blood forming system of guinea pigs and rabbits. *Aerospace med.*, 11, 1971, p. 1196-99.

Baranski S. – Effects of MW irradiation in vitro on cell membrane permeability. Biological effects and health hazards of MW radiation. WHO international symposium. Warsaw, Oct. 1973.

Baranski S., Edelwejn Z. – Electroencephalographic and morphological investigations on the influence of microwaves on the central nervous system. *Acta Physiol. pol.*, 18 : 423-436, 1967.

Bawin S.M., Gavallas-Medici R.J. and Adey W.R. – Effects of modulated very high frequency fields on specific brain rhythms in cats. 1 p Repr. from *Brain Res (Amsterdam)* v. 58, n° 2, 1973, p. 365-384.

Berteaud. A – Ondes électromagnétiques et milieu vivant, XIV^e Symposium International sur les applications énergétiques des micro-ondes, Monaco 1979 - in proc., p. 29-34.

Bertharion G., Servantie B. – Electro-corticographic modifications after exposure to MW fields on the white rat. *J. MW Power*, 6-1971, p. 62-63.

Bertharion G., Servantie B. – Biologic effects and health hazards of MW radiation. Proc. of international WHO symposium Warsaw, oct. 1973.

BIT, « La protection des travailleurs contre les rayonnements à fréquences radioélectriques et à hyperfréquences », n° 57, 1989.

Carpentier RC – Opacities in the lens of the eye experimentally produced by exposure to MW radiation. Trans. IRE. ME-7 : 152-157, 1960.

CENELEC ENV 50166-2 (Classement UTE : C 18-610) « Exposition humaine aux champs électromagnétiques Hautes fréquences (10kHz à 300 GHz) ».

Czerski P., Jedrzejczak W.W. – Effects of MW exposure on immunocompetent cells. USNC/URSI Ann. meet. Airline - 1977 oct.-nov.

Duchêne. A.S., Lakey., J.R.A and Repacholi. M.H – « Guideline on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the fre-

quency range from 100 kHz to 300 GHz », IRPA guidelines of protection against non ionising radiation. Pergamon press., 1991, 72-82.

Dyachenko N.A. – Changes in thyroid function with chronic exposure to microwave radiation. 1 p Repr From Gig. Tr Prof Aabol. (URSS) n° 1, 1970, p. 51-52.

Gagny C. – « Immunité des stimulateurs cardiaques aux perturbations électromagnétiques. La situation ». INRS, DMT (à paraître).

Geraut Ch., Rapilly B., Thibault R., Dupas D. – Les Risques médicaux liés à l'utilisation professionnelle des micro-ondes, XX^e journées Nationales de Toulouse, 1988.

« Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électromagnétiques de radiofréquences comprises entre 100 kHz et 300 GHz ». INRS, *Cahiers de notes documentaires*, 148, ND, 1887, 92.

Guy A.W. – Biologic effects and health hazards of microwaves radiation. Warsaw, Poland, *Polish Medical Publishers*, 1974, p. 203-216.

Guy A.W. – Biophysics - Energy absorption and distribution, AGARD - Lectures séries n° 78 on radiation hazards - 1975, in proc., p. 4-14.

Hée G., Barbara J.J., Gros P. – « Valeurs limites d'exposition en ambiance de travail ». INRS, *Cahiers de notes documentaires*, 148, ND 1886, 1992.

Hée G., Méreau P., Vautrin J.P., – « Ondes courtes, ultra-courtes ou radar - risque et prévention ». INRS, DMT, 47 TD 35.

Hée G. – « Rayonnements, champs, courants électriques », 10^e colloque international du comité électricité de l'AISS. INRS, DMT, 47 TD 34.

IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio-frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. Document IEEE C95.1-1991 (revision of ANSI C95.1-1982), avril 1992.

ILO. – « Occupational hazards from non-ionizing electromagnetic radia-

tion », Occupational safety and health series, n° 53, 1985.

Johnson C.C., Guy A.W. – Non ionizing electromagnetic wave effects in biological materials and systems. (Invited paper) - proc. IEEE - Vol. n° 60, n° 6, p. 692-718, June 1972.

Joines W.T., Blackman C.F., Hollins M.A. – « Broadening of the RF power-density window for calcium-ion efflux from brain tissue », IEEE Trans BME, 28 : 568-573, 1981.

Kholodov Y.A. – Changes in the electrical activity of the rabbit cerebral cortex during exposure to a UHF-HF electromagnetic field part 2 the direct action of the UHF-HF field on the central nervous system 1 p. Repr. from Biul. Eksp. Biol. Med. (URSS) n° 56, 1963, p 42-46.

Lefevre S. – Ondes électromagnétiques. Définitions, propriétés, utilisation générale, XIV^e Symposium international sur les applications énergétiques des micro-ondes, Monaco 1979 - In proc., p. 7-13.

Lin J.C., Guy A.W., Johnson C.C. – Power deposition in a spherical model of man exposed to 1-20 MHz EM fields. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MIT-21, n° 12, p. 791-797, Dec. 1973.

Lin J.C. – Electromagnetic Interaction with Biological Systems Plenum Press. N.Y., 1989.

Lobanova A. and Goncharova A.V. – The effect of radio-frequency electromagnetic fields in the 191 and 155 Mc ranges on the conditioned reflexes of animals. 1 p Repr from Gig. Tr. Prof. Zabol (URSS) n° 3, 1968, p. 76-80.

Mikolajczyk H. – Endocrine reactions and changes in endocrine glands under influence of microwaves. 1 p. Repr. from Mref. Lotnicza (Poland) n° 39, 1972, p. 39-51.

Miro L., Loubiere A.V., Pfister A. – Lésions viscérales observées chez des souris et des rats exposés aux OUC. Études particulières des effets de ces ondes sur la reproduction de ces animaux. 21^e Aérospace Medical

Panel meet. of the advisory group for aerospace, 1964.

Miro L. – Effets of MW on the reticulo-histocytic cells metabolism. Biological effects and health hazards of MW rad. WHO int. sympo. Warsaw 1973 oct.

Miro L. – Rapport sur les troubles cliniques et les modifications hématologiques observées sur le personnel de la Base Radar, soumis aux Ondes Ultra-courtes. Rapport AA - interne - 1960.

Miro L., Senelar R., Draussin. M., Mion H., Grasset G., Lagoutte J.H. – Preliminary results on the effects of MW on the reticulo histocytic system. USNC/URSI ann. meet. Airlie 1977 oct. nov.

Miro L. – Bases physiques de l'action biologique des ondes radio électromagnétiques, *J. Med. Nuc. Biophys.*, 1989, 13, 4, 193-201.

« Prévention des risques dus aux machines utilisant le chauffage par pertes diélectriques ou induction dans le domaine des radiofréquences (3 kHz - 300 MHz) » recommandations CNAM R 218 adoptées par le comité technique national des industries de la métallurgie le 2 décembre 1982.

« Protection contre les rayonnements électromagnétiques non ionisants - utilisation d'écrans métalliques et évaluation de leur efficacité », INRS, *Cahiers de notes documentaires*, 121, ND 1552, 1985.

« Risques liés aux rayonnements électromagnétiques non ionisants », INRS, *Cahiers de notes documentaires*, 107, ND 1378, 1982.

Saunders R.D., Kowalczyk C.I., Sienkiewicz Z.J. – « Biological effects of exposure to non ionizing electromagnetic fields and radiation, 3. Radiofrequency and microwave radiation ». Document NRPB-R240, décembre 1991.

Schlagel C.J., Sulek K., Ho H.S., Leach W.M., Ahmed A., Woody J.N. – Biological effects of microwave exposure II. Studies on the mechanisms controlling susceptibility to microwave-induced increases in

complement receptor-positive spleen cells., *Bioelectromagnetics* 1, 1980, 405-414.

Schwan H.P. – Effects of microwave radiation on tissue a survey of basic mechanisms. Non ioniz. radiation - 1.1 - p. 23-30, 1969.

Schwan H.P., Piersol G.M. – The absorption of electromagnetic energy in body tissues, pt 1, *Amer. J. Phys. Med.*, Vol. 33, p. 371-404, 1954.

Schwan H.P. Pierson G.M – The absorption of electromagnetic energy in body tissues, pt 2, *Amer. J. Phys. Med.*, Vol. 34, p. 425-448, 1955.

Schwan H.P. – Electrical properties of tissues and cells. *Advan. Biol. Med. Phys.*, Vol. 5, p. 147-209, 1957.

Servantie B., Gillard J., Servantie A.M., Obrenovitch, Bertharion G., Perrin J.C., Creton B., Plurien G. – Comparative study of the action of 3 MW fields upon the behavior of the white rat. USNC/URSI ann. meet. Airlie 1977. Oct.-Nov.

Shandala M.G., Rudnev M.I., Vinogradov G.K., Belonozhko, Gonchar N.M. – Immunological effects of low MW exposure. USNC/URSI ann. meet. Seattle - 1979 Juin.

« Signalisation de sécurité et de santé sur les lieux de travail », INRS, *Cahiers de notes documentaires*, 153 ND 1947, 1993.

Smialowicz R.J., Kinn J.B., and Elder J.A. – Perinatal exposure of rats to 2450-MHz CW microwave radiation of rabbits : Evaluation of hematological and immunological effects. *J. Microwave Power*, 15, 45 (1980).

Smialowicz R.J., Ali J.S., Berman E., Bursian S.J., Kinn J.B., Liddle C.G., Reiter L.W. and Weil C.M. – Chronic exposure of rats to 100 MHz (CW) radiofrequency radiation : Assessment of biological effects. *Radiat. Res.*, 86 488 (1981).

Smialowicz R.J., Weil C.M., Kinn J.B. and Elder J.A. – Exposure of rats to 425 MHz (CW) radiofrequency radiation : Effects on lymphocytes. *J. Microwave Power*, 17, 211 (1982).

Stodolnich-Baranska W. – The effects of MW on the human lymphocytes cultures. Biological effects and health hazards of MW radiations. WHO international symposium. Warsaw - 1973 oct.

Szmigielski S. – Effects of 10 cm (3GHz) electromagnetic radiation (MW) on granulocytes in vitro. Ann. NY Acad. Sci. 247, 275-281, 1975.

Vautrin J.P., Cavelier C., Clauzade – « Le rayonnement électromagnétique radiofréquences. Applications et risques ». INRS, *Cahiers de notes documentaires*, 92, ND 1127, 1978

(modifiée à l'occasion du séminaire interne « stratégie de prélèvement », janvier 1992).

Williams D.B., Monahan J.P., Nicholson W.J and Aldrich J.J. – Biologic effects studies on microwave radiation time and power thresholds for production of lens opacities by 12.3 cm microwaves, 2 p. refs repr. from Amer. Med. Ass. Arch Ophthmo.v. 54., 1955, p. 863-874.

Zaret M.M., Snyder W.Z., Birebaum L. – Cataract after exposures to non ionizing radiant energy. *Brit. oph.*, 60, 1975, p. 632- 638.

5

RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE



5.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La technique d'exploration par résonance magnétique nucléaire est employée pour deux types d'applications :

- l'imagerie par résonance magnétique ou IRM, utilisée dans le diagnostic médical,
 - la spectroscopie ou spectrométrie RMN utilisée en chimie et biochimie.
- D'une façon générale, le générateur RMN est composé au minimum :
- d'un électroaimant créant un champ magnétique statique se comportant comme un solénoïde parcouru par un courant continu ;
 - d'une bobine alimentée en courant électrique alternatif de radiofréquence produisant un champ tournant perpendiculaire au champ magnétique statique.

L'IRM, en ce qui la concerne, fonctionne grâce à l'association de trois types de champs électromagnétiques, dont seuls les deux premiers sont mis en œuvre en spectroscopie RMN.

Un champ magnétique statique, appliqué au corps humain, oriente les noyaux d'hydrogène ou protons comme des petites aiguilles aimantées parallèlement à la direction de ce champ. Lorsqu'un champ tournant est mis en œuvre, les protons se comportent comme des gyroscopes et entrent en précession, c'est-à-dire que leur axe est animé autour d'une position moyenne d'un mouvement conique caractéristique d'une rotation gyroscopique. Si le champ tournant est brusquement coupé, les protons continuent leur rotation pendant un certain temps pour se réaligner ensuite progressivement sur le champ magnétique statique. Cet arrêt provoque la libération de l'énergie électromagnétique reçue et est à l'origine du signal traduit par un système électronique en une image sur écran.

Cette technique permet ainsi la reconstitution d'images anatomiques en utilisant la propriété de certains noyaux atomiques de se comporter à la fois comme de petits aimants et de petits gyroscopes si on leur applique un champ électromagnétique de fréquence de résonance bien déterminée. De plus, un gradient de champ distribué dans l'espace permet la réalisation de coupes tomographiques de la zone explorée.

5.1.1. Champ magnétique statique

Il permet l'orientation des spins des noyaux de l'atome étudié dans un plan perpendiculaire à l'axe des bobines de l'appareil.

Il est toujours présent dans la pièce, même lorsque l'appareil n'est pas en mode utilisation (production d'une image, par exemple). Il est mesuré en teslas (T).

Son intensité est de l'ordre de 0,3 à 2,5 T pour l'IRM mais peut atteindre des valeurs de 10 à 15 T en spectroscopie RMN.

5.1.2. Champ électromagnétique radiofréquence

Il permet le mouvement de précession, c'est-à-dire de rotation des atomes étudiés autour de l'axe de leurs noyaux.

Sa fréquence est fonction de l'intensité du champ magnétique statique et du type d'atome étudié. A titre d'exemple, il prend une valeur de $42 \text{ MHz} \cdot \text{T}^{-1}$ pour l'examen de l'atome d'hydrogène.

Son intensité dépend de la conception de l'appareillage.

5.1.3. Champ magnétique variable

Ce champ magnétique est variable dans l'espace et il est donc à l'origine d'un gradient spatial du champ. On ne le trouve qu'en IRM. C'est un champ impulsionnel dont la fréquence de répétition se situe dans la gamme ELF.

Son intensité est fonction de la conception de l'appareillage.

5.2. NIVEAUX D'EXPOSITION

Les valeurs d'intensité des différents champs, qui sont fournies par le constructeur, n'existent réellement que dans le volume d'exploration situé à l'intérieur de l'appareil dans lequel on place le patient à examiner ou l'échantillon biologique à analyser.

Le personnel travaillant autour de ces appareils est soumis à des intensités de champs qui sont beaucoup plus faibles :

- Pour le champ magnétique statique, l'intensité décroît en fonction de la distance par rapport à l'aimant suivant une formule mathématique relativement complexe. Il est donc préférable de demander au constructeur de fournir la répartition spatiale de l'intensité de champ existant autour de l'appareillage.
- Pour les champs RF et variables, il ne semble pas exister de mesurages servant de référence autour des appareils. Cependant, compte tenu du mode d'application de ces champs qui est généralement inductif, les valeurs de fuite devraient être très limitées. Il serait cependant souhaitable, lorsque les fréquences RF se situent entre 50 et 90 MHz (fréquences de résonance du corps humain donc d'absorption maximale), de s'assurer de leur valeur par des mesurages.
- Pour les champs variables proprement dits, il en est de même lorsque leur fréquence est une des premières harmoniques de 16 Hz (cf. § 4.3.3.4. et 4.4.1.2.7. relatifs à la dépendance fréquentielle du flux calcique).

5.3. EFFETS PHYSIOLOGIQUES

Les effets sont essentiellement liés à l'action des différents champs mis en œuvre dans la RMN et l'IRM.

5.3.1. Champs magnétiques statiques

Les effets des champs magnétiques statiques sont décrits au chapitre 2.

5.3.2. Champs magnétiques variables

Leurs actions sont dues, soit au gradient spatial du champ, soit à la fréquence du champ électromagnétique radiofréquence. Concernant essentiellement les patients, ces manifestations sont de différents types.

5.3.2.1. Magnétophosphènes

Les champs magnétiques variables appliqués au niveau du crâne peuvent entraîner, pour certaines fréquences de 20 à 50 Hz et pour des valeurs d'induction magnétique inférieures à 5 mT, des sensations visuelles colorées ou magnétophosphènes dont la nature physiologique est connue et qui ne présentent aucun caractère pathologique.

5.3.2.2. Paresthésies

Elles sont dépendantes de la fréquence et de la puissance du gradient de champ et de la susceptibilité personnelle. Leur seuil d'apparition se situe quatre fois en dessous de celui déclenchant un trouble du rythme.

5.3.2.3. Troubles du rythme

Un risque de fibrillation ventriculaire existe pour des expositions à des intensités dépassant $1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$. Le courant résultant de l'induction des champs magnétiques variables produits par une IRM classique est d'environ 100 fois inférieur. Cependant, les phénomènes liés à la surface d'application ou la durée de l'examen doivent conduire à une grande prudence et à prévoir sur place du matériel de réanimation.

5.3.2.4. Modifications des plaquettes

On constate *in vitro*, avec des variations de champ de l'ordre de $24 \text{ T} \cdot \text{s}^{-1}$, une dégranulation des plaquettes, l'apparition de pseudopodes et une rupture de la membrane.

Il est toutefois à noter qu'« *in vivo* » aucune thrombose ni hémorragie n'a été jusqu'à présent mise en évidence.

5.3.3. Champs électromagnétiques. Radiofréquences

Leurs effets sont liés aux basses fréquences des RF. Il a été noté plus particulièrement les éléments suivants :

5.3.3.1. Modification de la chaleur tissulaire locale

Il n'a pas été possible de mettre en évidence une élévation de température excédant 1 °C lors de la réalisation de la plupart des IRM. Cependant lors de l'utilisation de certaines antennes, en particulier céphaliques, on peut observer des élévations très localisées de la température pouvant être la source d'un certain risque pour les enfants, les personnes âgées et/ou présentant des troubles vasculaires cérébraux. Cependant, il faut noter que cette action ne peut survenir qu'à l'intérieur de l'appareil et ne représente aucun danger pour le personnel situé à l'extérieur.

5.3.3.2. Modifications de la réactivité à certains médicaments

Il a été retrouvé expérimentalement, pour certaines fréquences, des modifications de la réactivité physiologique de l'organisme à certains médicaments ; cependant ce phénomène n'a pas encore été décrit en clinique humaine.

5.3.3.3. Effets sur le transport du Ca^{++}

Des changements de la répartition du Ca^{++} entre formes libre et liée ont été décrits expérimentalement, néanmoins ce phénomène n'interviendrait pas aux intensités concernées par la RMN.

5.3.3.4. Modifications de la perméabilité de la barrière hématoencéphalique

Une augmentation de la perméabilité de la barrière hématoencéphalique induite par les RF a été décrite chez des animaux, mais ces résultats n'ont pas encore été confirmés chez l'homme dans le cadre de la RMN.

5.4. LIMITES D'EXPOSITION ET MESURES DE PRÉVENTION

Il n'existe pas en France de législation concernant la prévention des risques professionnels concernant les champs et rayonnements électromagnétiques non ionisants. Cependant, il convient d'appliquer pour chaque champ ou rayonnement émis (champ magnétique statique ou variable, RF) les règles de sécurité les concernant.

Des organismes internationaux tels l'IRPA/ICNIRP ont publié dans un premier temps des recommandations visant à assurer la sécurité du patient soumis à une exploration IRM :

- sauf nécessité absolue, éviter l'exposition des femmes enceintes aux champs électromagnétiques émis lors d'IRM, notamment en début de grossesse, et par mesure de prudence, durant toute sa durée ;
- à la suite d'une exposition à des champs statiques supérieurs à 5 teslas, il faut estimer la fonction cardio-vasculaire. Il a même été constaté qu'il existe un risque de troubles du rythme chez les personnes souffrant de maladies cardio-vasculaires pour des expositions courtes supérieures à 2 teslas (cf. 2.4.2.2.1.).

Celles-ci peuvent, moyennant quelques aménagements, donner des indications pour la surveillance du personnel.

Dans cet esprit, la recommandation IRPA/ICNIRP limite l'intensité du champ magnétique statique à l'extérieur de la salle d'examen IRM à une valeur de :

$$B_{VLE} \leq 200 \text{ mT}$$

L'intensité des différents champs électromagnétiques devra être contrôlée dans toutes les situations possibles d'utilisation :

- appareil employé pour l'examen par imagerie d'un patient en dehors de la présence d'un manipulateur ;
- appareil fonctionnant en situation réelle d'utilisation, patient dans l'appareil et opérateurs nécessairement présents à leur poste.

Il convient également de signaler les propositions émises par le NRPB en ce qui concerne le Royaume-Uni pour l'IRM :

- une limitation du champ constant à 2,5 T ;
- une limitation des variations du champ variable à $20 \text{ T} \cdot \text{s}^{-1}$ pour des impulsions supérieures à 10 millisecondes en sachant que le seuil peut être plus élevé pour des impulsions plus courtes ;
- une limitation de la puissance moyenne absorbée à moins de 70 mW pour des ondes RF d'une fréquence de 15 MHz.

Le principal danger des appareils d'IRM étant d'ordre mécanique du fait de l'attraction d'objets ferromagnétiques due à la présence de champs magnétiques statiques de forte intensité, la première mesure de sécurité consiste à éviter toute présence de tels objets dans ou à proximité immédiate de l'appareil. Une attention particulière doit être portée sur la proximité d'outils, de matériels de réanimation, de brancards, ..., pour éviter de léser l'aimant mais surtout de blesser un patient ou le personnel se trouvant sur la trajectoire de l'objet attiré.

Ce même phénomène d'attraction peut conduire à la mobilisation tragique d'un implant ferromagnétique (lâchage d'un clip cérébral avec hémorragie et lésion des tissus adjacents, par exemple).

En ce qui concerne le local où est implanté le générateur, il est donc recommandé d'installer un sas d'entrée conduisant à la salle d'examen, un portique de détection des masses ferromagnétiques semblable au matériel mis en œuvre dans les aéroports et, au minimum, de signaler de façon très claire et explicite le risque d'exposition ainsi que la nature et l'intensité des

champs (panneaux de signalisation réglementaires, affiches, enseignes lumineuses,...).

De plus, il convient de conseiller au personnel de respecter les consignes suivantes :

- déplacement lent dans le champ magnétique statique (le déplacement dans un tel champ est à l'origine de courants induits dans l'organisme, variables avec la vitesse de déplacement et la position du sujet) ;
- absence du personnel dans la pièce au moment de la prise de l'image. Celui-ci doit se trouver derrière la protection vitrée séparant le local contenant le générateur du local de commande et d'imagerie.

Il va de soi que l'accès aux locaux d'IRM, d'imagerie et de commande est interdit à tout porteur d'implant actif.

En ce qui concerne la spectroscopie RMN, il convient de limiter autant que possible l'exposition des salariés en l'absence de données pertinentes concernant d'éventuels risques.

5.5. MÉDECINE DU TRAVAIL

5.5.1. Considérations générales

Sur le plan de la recherche scientifique, les études concernant l'être humain ont porté principalement sur la limitation de la durée d'exposition des patients à d'importantes intensités de champ. Ce sont donc ces études qui ont été utilisées comme base de référence pour l'appréhension de l'exposition professionnelle, bien que ces deux types d'expositions soient très différents.

5.5.2. Surveillance médicale

Pour l'affectation à un poste de travail RMN et/ou IRM, il convient tout d'abord de respecter les règles d'affectation à un poste de travail présentant un risque lié au champ magnétique statique (voir chapitre 2).

Il convient de rappeler également que le phénomène d'attraction peut conduire à la mobilisation tragique d'un implant ferromagnétique et cela constitue une contre-indication pour tout porteur de ce type de matériel.

D'autre part et compte tenu que les dispositifs intra-utérins (DIU) ou stérilets en cuivre sont susceptibles, sous l'effet des champs électromagnétiques, de subir une électrolyse qui peut par la suite entraîner des altérations tissulaires par effet chimique, il convient de conseiller aux femmes qui portent de tels dispositifs de consulter leur médecin afin de changer le type de DIU ou d'opter pour un autre mode de contraception.

Par ailleurs, il faut constater l'existence de nombreuses inconnues sur le rôle réel cumulé des champs magnétiques statiques, variables et RF sur la multiplication cellulaire et par conséquent sur la grossesse et l'évolution des processus cancéreux. Il semble donc prudent, dans l'attente de données scientifiques plus précises, d'éloigner des postes de travail RMN et/ou IRM les femmes enceintes et les personnels présentant ou ayant présenté une affection cancéreuse.

5.5.3. Information du personnel

Une information claire et non alarmiste sera divulguée en ce qui concerne les précautions médicales à suivre dans le cadre de la visite de médecine du travail.

En particulier, le médecin du travail devra veiller à ce qu'aucun membre du personnel en contact avec les champs électromagnétiques ne soit porteur d'implant actif, de clips ou agrafes ferromagnétiques ou de tout matériel ferromagnétique implanté.

Dans la première période de l'emploi ou de la reprise du travail, une information régulière du personnel porteur de matériel d'ostéosynthèse devra être réalisée. Elle doit permettre en retour d'aider à révéler la survenue éventuelle d'une gêne localisée.

Le médecin du travail devra conseiller le remplacement de tout dispositif intra-utérin en cuivre par un matériel en plastique inerte ou par toute autre méthode contraceptive.

Enfin le personnel féminin devra être informé des risques et des interrogations liées au déroulement d'une grossesse. Celui-ci sera ainsi en mesure de signaler son état le plus rapidement possible pour une meilleure surveillance et, éventuellement, pour un retrait provisoire du poste de travail pendant les 100 premiers jours de grossesse.

5.6. BIBLIOGRAPHIE

(complémentaire des bibliographies de base des chapitres précédents)

Adams D.F. – « Biologic effects and potential hazards of nuclear magnetic imaging » (Imagerie par résonance magnétique nucléaire : effets biologiques et risques potentiels), *Cardiovascular and Interventional Radiology*, États-Unis, vol. 8, n° 5-6, pp. 260-263, 1986.

« Association nationale de médecine du travail du personnel des hôpitaux. 13^{es} Journées nationales de formation », Monaco, 9-11 décembre 1987, *Archives des maladies professionnelles*, vol. 49, n° 4, pp. 223-288, 1988.

Bernhardt J.H., Kossel F. – « Recommendations for the use of NMR equipment (RMN et sécurité : règles d'utilisation des équipements) »,

Clinical Physics and Physiological Measurement, Royaume-Uni, vol. 6, n° 1, pp. 65-74, février 1985.

Berry I., Le Tinnier A., Berry P., Grezes-Rueff C. et coll. - « Effets biologiques expérimentaux secondaires à l'exposition aux champs magnétiques fixes ou variables et aux ondes radio-fréquence (technologie de la RMN) », Extrait des 20^{es} journées nationales de médecine du travail, 18-21 mai 1988, Toulouse, *Archives des maladies professionnelles*, vol. 50, n° 2, pp. 176-179, 1989.

Budinger T.F. - « Nuclear magnetic resonance (NMR) "in vivo" studies : known thresholds for health effects », *Journal of computer assisted tomography*, 1981, 5 (6), pp. 800-811.

Charron D.P. - « Champs magnétiques en milieu de travail », CCHST P90-5F, Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST), 15 p., ill., bibliogr., 1990.

Dalmas J. - « Notions techniques et technologiques sur l'imagerie par résonance magnétique », Institut Schering, 1986.

Davis P.L., Crooks L., Arakawa M., Magree R., Kaufman L., Margulis A.R. - « Potential hazards in NMR imaging : Heating effects of changing magnetic fields on small metallic implants », *AJR*, 1981, 137, pp. 857-860.

Estryn-Behar M. - « Guide des risques professionnels du personnel des services de soins », Éditions Lamarre, 377 p., ill., bibliogr., 1991.

Evans J.A., Savitz D.A., Kanak E., Gillen J. - « Infertility and pregnancy outcome among magnetic resonance imaging workers (Stérilité et issue des grossesses chez des opératrices d'imagerie par résonance magnétique) », *Journal of Occupational Medicine*, États-Unis, vol. 35, n° 12, pp. 1191-1195, ill. bibliogr., décembre 1993.

Galla P., Cavellier J.F. - « Effets et risques liés à l'utilisation des champs magnétiques dans les explo-

ratings par résonance magnétique nucléaire chez l'homme », *Radioprotection*, vol. 20, pp. 97-115, ill., bibliogr., 1985.

Geard C.R., Osmak R.S., Hall E.J., Simon H.E., Maudsley A.A., Hilal S.K. - « Magnetic resonance and ionizing radiation : A comparative evaluation "in vitro" of oncogenic and genotoxic potential », *Radiology*, 1984, 152, pp. 199-202.

« Guideline on protection of the patient undergoing a magnetic resonance examination », document ICNIRP, *Radioprotection*, 27, 3, 1992.

IRPA/INIRC « Protection of the patient undergoing a magnetic resonance examination », *Health Physics*, 1991, 61, (6), pp. 923-928 et *Radioprotection* 1992, 27, (3), pp. 326-336.

Le Bihan D., Siahmed M. - « L'imagerie par résonance magnétique », *Biomequip*, 1986, 7, pp. 58-67.

« Le médecin du travail face aux technologies nouvelles. Thème n° 1 », extrait des 20^{es} Journées nationales de médecine du travail, Toulouse, 18-21 mai 1988, *Archives des maladies professionnelles* vol. 50, n° 2, pp. 139-190, ill. bibliogr., 1989.

« La médecine du travail face aux technologies nouvelles », 29^{es} Journées nationales de médecine du travail, Gand (Belgique), 7-8 décembre 1989, *Cahiers de médecine du travail*, vol. 27, n° 4, pp. 190-243, ill., bibliogr., 1990.

« La prévention au quotidien », *Travail et sécurité* n° 9, pp. 487-488, septembre 1990.

« La prévention au quotidien », *Travail et sécurité*, n° 498, p. 183, mars 1992.

McNamara M.T. - « L'imagerie par résonance magnétique », *Archives des maladies professionnelles*, vol. 49, n° 4, pp. 275-278, 1988.

Michel P. - « Hôpitaux », *Les Techniques de l'ingénieur*, 23 p., ill., bibliogr., 1992.

NRPB ad hoc advisory group on nuclear magnetic resonance clinical

imaging, « Revised guidance on acceptable limits of exposure during nuclear magnetic resonance clinical imaging », *The British Journal of Radiology*, 1983, 56, pp. 974-977.

NRPB - « Principals for the protection of patients and volunteers during clinical magnetic resonance diagnostic procedures », *Ann. New-York Acad. of science*, 649, Proceedings of conference, Bethesda, mai 1991, pp. 372-375.

Pavlicek W. - « Safeguards help minimize potential MRI hazards », *Diagnostic Imaging*, 1985, november, pp. 166-169.

Pavlicek W., Geisinger M., Castle L., Borkowski G.P., Meaney T.F., Bream B.L. and Gallagher J.H. - « The effects of nuclear magnetic resonance on patients with cardiac pacemakers », *Radiology*, 147, pp. 149-153, 1983.

Phillips M.L. - « Industrial hygiene investigation of static magnetic fields in nuclear magnetic resonance facilities (Étude d'hygiène industrielle sur les champs magnétiques statiques dans les installations de résonance magnétique nucléaire) », *Applied occupational and Environmental Hygiene*, Etats-Unis, vol. 5, n° 6, pp. 353-358, ill., bibliogr., juin 1990.

Saunders R.D., Smith H. - « Safety aspects of NMR clinical imaging », *Brit. Med. Bull.*, 40, 2, pp. 148-154, 1984.

Savina A., Claudon M. - « L'IRM à champ modéré », *CNEH*, n° 1, janvier-mars 1990.

Savina A., Lallemand D. - « Profil médical technique et économique des innovations : Imagerie par résonance magnétique », 1985, Profil n° 13, CNEH, Saint-Quentin-en-Yvelines.

Stuchly M.A., Lecuyer D.W. - « Survey of static magnetic fields around magnetic resonance imaging devices (Étude des champs magnétiques statiques à proximité des installations d'imagerie par résonance magnétique) », *Health Physics*, États-Unis, vol. 53, n° 3, pp. 321-324, ill., bibliogr., septembre 1987.

Tremolières J. - « Les champs magnétiques en milieu professionnel : un risque à évaluer », *Revue générale de la sécurité*, n° 113, pp. 54-58, ill., bibliogr., mai 1992.

Weinreb J.C., Maravilla K.R., Peschock R., Payne J. - « Magnetic resonance imaging : Improving patient tolerance and safety », *AJR*, 1984, 143, pp. 1285-1287.

Withers H.R., Mason K.A., Davis C.A. - « MR effects on murine spermatogenesis », *Radiology*, 1985, 156, pp. 741-742.

Woiche C. - « La résonance magnétique : aspects de sécurité », *Médecine et travail*, n° 152, pp. 35-40, ill., bibliogr., 1992/2.

Woiche C. - « La résonance magnétique. Aspects de sécurité ». Extrait de : 29^e Journées nationales de médecine du travail. Gand. (Belgique), 7-8 décembre 1989, *Cahiers de médecine du travail*, vol. 47, n° 4, 1990.

Wolff S., James T.L., Young G.B., Margulis A.R., Bodycote J., Afzal V. - « Magnetic resonance imaging : Absence of "in vitro" cytogenetic damage », *Radiology*, 1985, 155, pp. 163-165.

Zimmermann B.H. and FAUL D.D. - « Artefacts and hazards in NMR imaging due to metal implants and cardiac pacemakers », *Diagn. Imag. Clin. Med.*, 1984, 53, pp. 53-56.

6

ANNEXES



ANNEXE 6.1.

CHAMPS STATIQUES ET ELF DONNÉES DE L'OMS

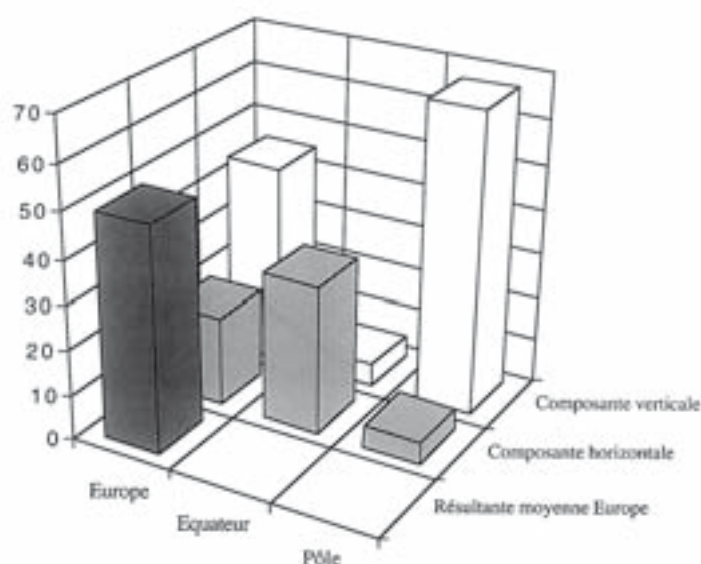
La littérature internationale, notamment les publications de l'Organisation mondiale de la santé, donne de nombreuses indications concernant l'évaluation des champs électriques et magnétiques développés par des sources naturelles ou artificielles. Ci-après, quelques extraits de résultats de mesurages qui semblent assez représentatifs pour l'appréciation des ordres de grandeurs de ces champs s'exerçant au niveau de la population et en milieu professionnel.

6.1.1. Champs statiques

Tableau 13
Champ magnétique naturel

(tiré de : « Magnetic fields », *Environmental health criteria* 69, OMS 1987, p.14)

Champ terrestre en μT	Pôle	Équateur	Europe
Composante verticale	67	# 0	45
Composante horizontale	# 0	33	20
Résultante moyenne	-	-	# 50



6.1.2. Champs électriques ELF

Tableau 14

Intensités maximales de champ électrique au niveau du sol
à mi-distance entre pylones de lignes de distribution d'électricité
(tiré de : « La protection contre les rayonnements non ionisants », 2^e édition,
OMS, publications régionales, série européenne n° 25, p. 215)

Tension de ligne en kV	Intensité maximale de champ électrique en $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$
123	1 à 2
245	2 à 3
420	5 à 6
800	10 à 12
1 200	15 à 17

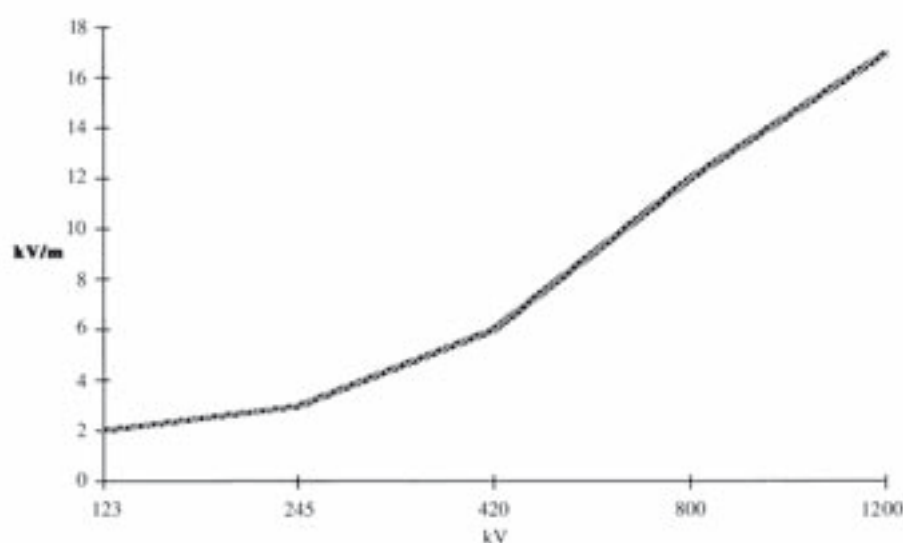
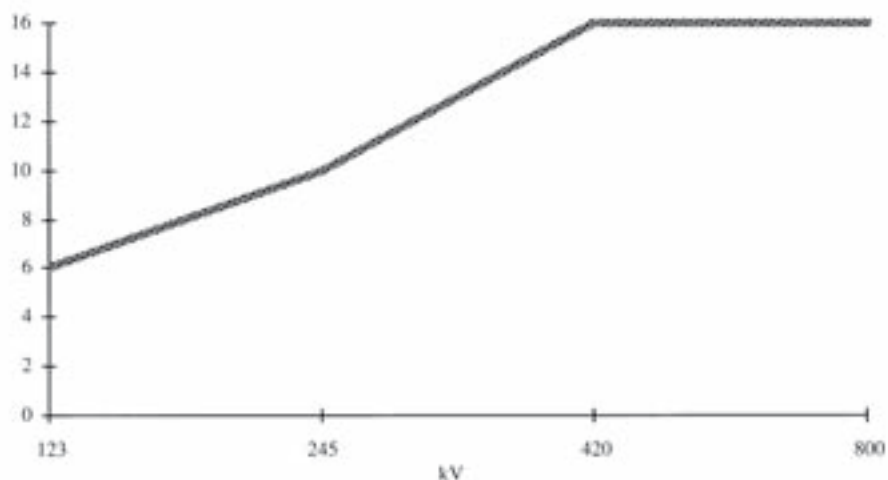


Tableau 15 - Intensités maximales de champ électrique sous les barres de connexion de stations d'alimentation électrique
(de : « La protection contre les rayonnements non ionisants », 2^e édition, OMS, publications régionales, série européenne n° 25, p. 215)

Tension maximale d'alimentation en kV	Intensité maximale de champ électrique en $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$
123	5 à 6
245	9 à 10
420	14 à 16
800	14 à 16



6.1.3. Champs magnétiques ELF

Tableau 16

Inductions magnétiques à 60 Hz aux États-Unis à proximité d'appareils électro-ménagers
(tiré de : « Magnetic fields », *Environmental health criteria* 69, OMS 1987, p. 36)

Appareils	B (μT) à 3 cm	B (μT) à 30 cm	B (μT) à 1 m
Ouvre-boîtes électriques	2 000	30	1
Sèche-cheveux	2 000	7	0,3
Rasoirs électriques	1 500	9	0,3
Scies sauteuses et circulaires	1 000	25	1
Perceuses	800	3,5	0,2
Aspirateurs	800	20	2
Robots	700	10	0,25
Lampes fluorescentes de bureau	400	2	0,25
Broyeurs de déchets	250	2	0,1
Fours micro-ondes	200	8	0,6
Luminaires fluorescents	200	4	0,3
Plaques électriques chauffantes	200	4	0,1
Radiateurs portables	180	5	0,25
Mixeurs	130	2	0,12
Téléviseurs	50	2	0,15
Fours électriques	50	0,5	0
Machines à laver	50	3	0,15
Fers à repasser	30	0,3	0,025
Ventilateurs	30	4	0,35
Machines à café	25	0,15	0,01
Lave-vaisselle	20	3	0,03
Grille-pain	18	0,7	0,01
Friteuses	8	0,15	0,01
Sèche-linge	8	0,3	0,06
Réfrigérateurs	1,7	0,25	0,01

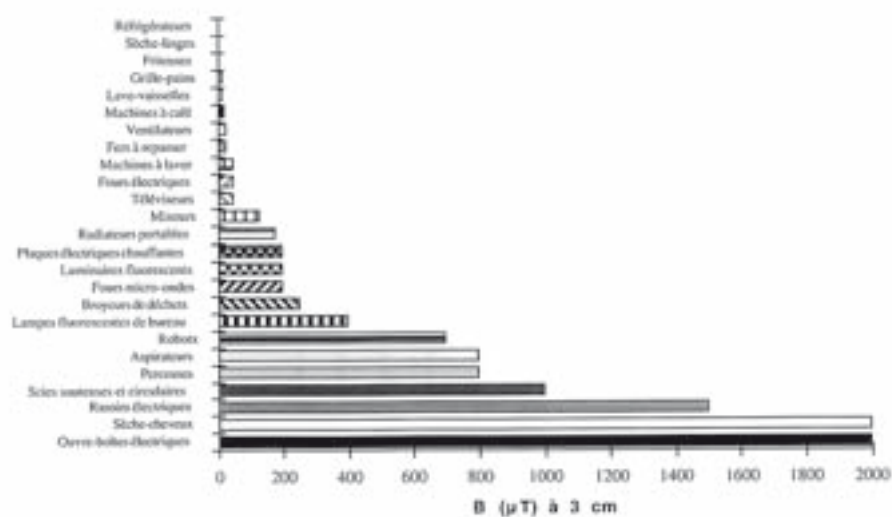
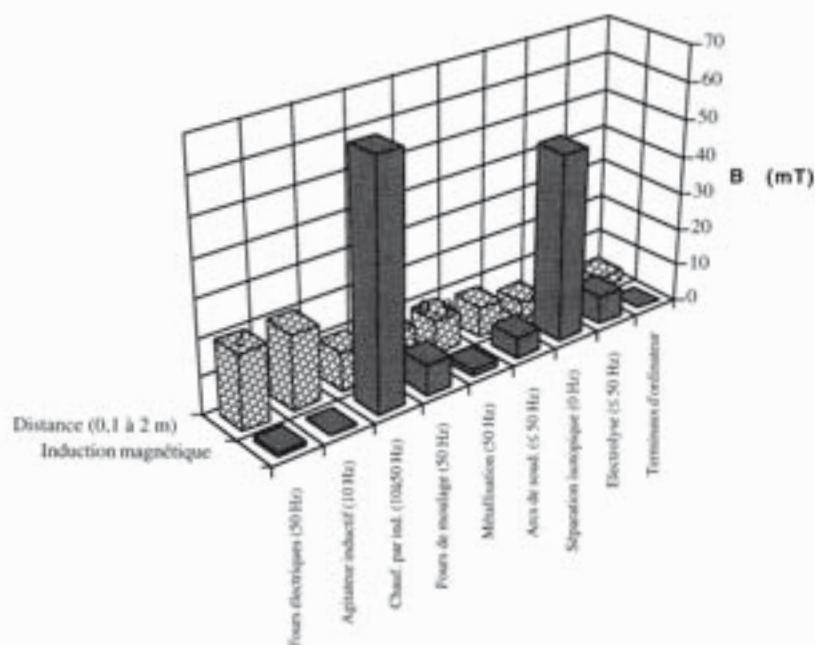


Tableau 17
Sources industrielles d'exposition professionnelle
aux champs magnétiques

(tiré de : « Magnetic fields », *Environmental health criteria* 69, OMS 1987, p. 36)

Sources industrielles	Inductions magnétiques (mT)	Distance (m)
Arcs de soudage (0 à 50 Hz)	5,8	0,1
Chauffage par induction (10 à 50 Hz)	65	0,1
Terminaux d'ordinateur	$2,8 \cdot 10^{-4}$	0,3
Électrolyse (0 à 50 Hz)	7,6	PT
Séparation isotopique (0 Hz)	50	PT
Métallisation (50 Hz)	1,7	0,9
Fours de moulage (50 Hz)	8	1
Fours électriques (50 Hz)	1	2
Agitateur inductif (10 Hz)	0,3	2

PT : distance approximative de la source et du poste de travail.



ANNEXE 6.2.

RAYONNEMENTS RF ET HF CAMPAGNES DE MESURAGES INRS-N/ESS*

6.2.1. Cadre des interventions

A la demande des services de prévention des Caisses régionales d'assurance maladie et de la médecine du travail, les agents de l'INRS sont intervenus à maintes reprises depuis 20 ans afin de relever les valeurs d'exposition (en radiofréquences) et les valeurs de fuite (en hyperfréquences) autour d'installations électrothermiques industrielles radiofréquences et hyperfréquences.

En outre, quelques interventions ponctuelles ont été effectuées autour d'électrolyseurs et de fours à induction où les champs magnétiques ont été mesurés.

6.2.2. Appareils de mesure mis en œuvre

Le tableau 18 rapporte les moyens pouvant être mis en œuvre pour les mesures concernées :

Tableau 18
Appareils de mesure

Grandeurs concernées pour le mesurage	Capteur utilisé	Mesureur utilisé
Grandeurs radiofréquences	boucle, fouet, biconique	récepteur sélectif, analyseur de spectre
	sonde isotropique	mesureur de champs
Grandeurs hyperfréquences	sonde isotropique	mesureur de champs
	cornet	récepteur sélectif, analyseur de spectre

6.2.3. Installations à 27 MHz

230 machines ont été contrôlées. Les champs électriques aux postes de travail ont été mesurés selon un protocole prédéterminé.

* N/ESS : service Électronique et sécurité des systèmes du Centre de recherche et de formation INRS de Nancy.

La figure 9 représente la répartition par classes de $60 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ des valeurs des champs électriques maximaux relevés aux endroits où séjourne le personnel. La classe de $60 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ a été choisie en raison de sa proximité avec la valeur limite d'exposition de $61 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ préconisée par l'IRPA.

6.2.4. Installations radiofréquences hors 27 MHz

37 installations radiofréquences à des fréquences autres que 27 MHz ont fait l'objet de relevés de mesures aux fréquences spécifiques de 4 - 8 - 13,5 - 40 MHz.

La figure 10 donne la distribution des champs électriques maximaux relevés pour chaque fréquence considérée.

6.2.5. Installations hyperfréquences

Le cas des installations hyperfréquences suppose des considérations différentes de celles mises en œuvre en radiofréquences.

En effet, contrairement à ces dernières, les installations hyperfréquences rencontrées à l'occasion de cette campagne présentent les particularités suivantes :

- il n'y a pas de postes de travail permanents,
- les installations sont souvent closes,
- les valeurs relevées loin des parois sont généralement faibles et inférieures à la valeur limite de référence ($5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$).

Par contre, la connaissance de la valeur de fuite (à 5 cm des parois des installations) est utile car il convient de tenir compte de la présence de la tête et des yeux du personnel à faible distance du processus en cours.

La figure 11 représente la répartition par classes de $5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ des valeurs de fuite relevées sur 32 installations à hyperfréquences.

Figure 9
Répartition en % par classe de $60 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ des valeurs des champs électriques maximaux relevés aux postes de travail de 230 machines émettant à 27 MHz

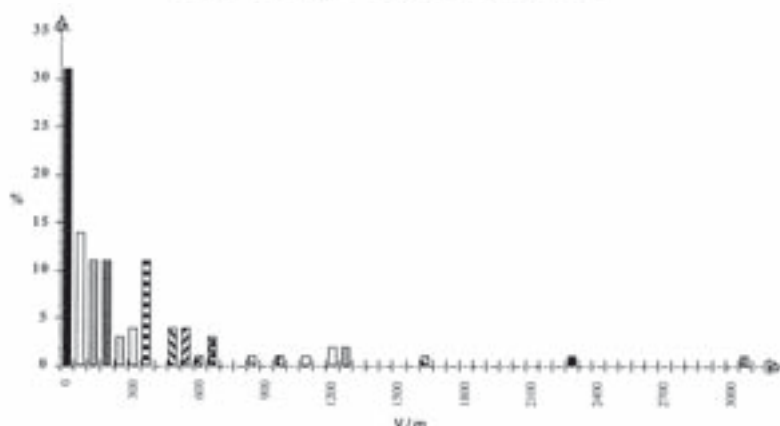


Figure 10
Valeurs de champs électriques relevés à proximité de quelques émetteurs industriels de radiofréquences hors 27 MHz

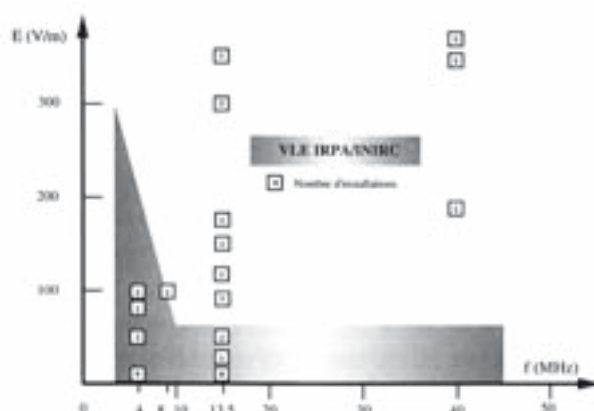
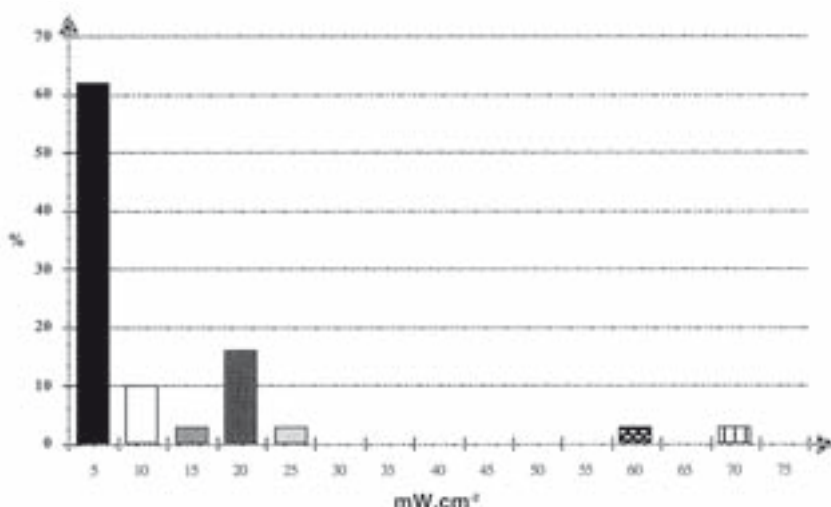


Figure 11
Répartition par classes de $5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ des valeurs de fuite relevées sur 32 installations à hyperfréquences (2 450 MHz)



6.2.6. Bilan

L'INRS est intervenu pendant près de deux décennies pour relever les valeurs de niveaux d'exposition à proximité d'installations industrielles émettant ou utilisant des rayonnements électromagnétiques radiofréquences ou hyperfréquences.

En l'absence de valeurs limites d'exposition réglementaires nationales ou européennes (une directive est en cours de discussion et deux prénormes européennes viennent d'être adoptées), les spécifications données par l'IRPA ont été considérées comme une référence acceptable.

A noter qu'elles sont peu différentes des recommandations de la norme américaine ANSI (American National Standard Institute) dans la mesure où IRPA et ANSI s'appuient sur la même base scientifique, à savoir le Débit d'Absorption Spécifique (DAS en français, SAR en anglais).

La comparaison entre les valeurs relevées et la valeur limite considérée doit être effectuée avec circonspection. En effet, la métrologie en ce domaine est délicate car les mesures sont souvent entachées d'incertitude. Il faut s'attacher à l'ordre de grandeur plutôt qu'à la valeur absolue d'un champ ou d'une densité de puissance. En d'autres termes, si la valeur relevée est nettement plus élevée que la valeur limite (au moins 2 fois), il convient de reconsidérer le poste de travail et le blindage de la machine.

Toutefois, si les valeurs de champs électromagnétiques atteignent ou dépassent légèrement la référence, il ne faut pas s'en alarmer outre mesure.

Cas des installations à 27 MHz

On constate que plus de 30 % des 230 machines contrôlées présentent des valeurs de champs égales ou inférieures à cette limite.

La plupart des machines présentant des valeurs supérieures à $61 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ sont des machines anciennes qui ont par conséquent été contrôlées avant les années 1985. Il est indéniable que quasiment toutes les machines récentes sont en conformité avec la spécification IRPA, ce qui traduit une amélioration certaine des conditions d'exposition à ces postes spécifiques.

Cas des installations radiofréquences hors 27 MHz

Les valeurs limites IRPA ont été portées pour les différentes fréquences :

- à 4 MHz, toutes les machines présentent des valeurs inférieures aux spécifications IRPA,
- à 8 MHz, une machine présente une valeur légèrement supérieure,
- à 13,5 MHz, pour laquelle la limite IRPA est de $61 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, 7 machines sur 18 dépassent cette valeur,
- à 40 MHz, les 3 machines présentent des niveaux supérieurs à $61 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$.

Cas des installations hyperfréquences

Les valeurs d'exposition à 1 mètre des installations sont systématiquement inférieures à la valeur de référence de $5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Toutefois, dans le but de prévenir le risque d'exposition de la tête et des yeux, d'une part, et de respecter les normes d'émissivité de la CEI ($5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ à 5 cm des parois), d'autre part, les valeurs de fuite ont été relevées. Dans plus de 62 % des installations, cette valeur est inférieure à $5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$. Deux cas extrêmes ont montré des valeurs comprises entre 55 et $70 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$.

En conclusion générale, en 20 ans de mesurage, l'INRS a constaté une diminution appréciable des valeurs d'exposition et de fuite des installations surveillées. Il est encourageant de constater que les nouvelles machines mises sur le marché respectent, pour la plupart, les spécifications données par l'IRPA.

ANNEXE 6.3.

EFFETS SUR LA SANTÉ DES RADIOTÉLÉPHONES CELLULAIRES

**Synthèse des connaissances et des recherches en cours
chez l'homme (article publié dans les Documents pour le médecin
du travail, n° 73, 1^{er} trimestre 1998).**

Dans le prolongement d'une phase initiale explosive, les radiotéléphones cellulaires sont en pleine expansion. Après quelques années d'utilisation, la question reste posée de leur innocuité pour la santé, interrogation largement relayée par les médias. Cette synthèse des données acquises et des recherches en cours chez l'homme, réalisée à l'intention des préventeurs et tout particulièrement des médecins du travail, devrait les aider à répondre aux questions qui leur sont posées.

Les études et recherches dans ce domaine s'organisent à deux niveaux :

- *effets graves et irréversibles : existe-t-il un effet déclenchant ou favorisant sur le cancer ?*
- *effets bénins et réversibles : existe-t-il des effets moindres mais susceptibles d'altérer la santé, sur le système endocrinien, sur le système nerveux (migraines, perturbations électroencéphalographiques...), sur le système immunitaire... ?*

Pour répondre à la question des effets cancérogènes éventuels, deux types d'approche sont possibles :

- l'expérimentation animale, qui a déjà été bien développée,
- les études épidémiologiques, qui sont plus directement appropriées à l'homme, mais présentent également des inconvénients (facteurs confondants, faible nombre de cas, longue période de latence avant obtention des résultats).

En revanche, pour évaluer les effets bénins, le meilleur modèle, permettant de prévenir les risques d'extrapolation inappropriée, reste l'expérimentation humaine. Jusqu'à présent, il n'a jamais été montré d'effet pathologique grave à court terme dû aux champs des radiotéléphones cellulaires. Si c'était le cas, il ne serait ni utile, ni éthiquement possible de réaliser des études avec des volontaires sains. Tout au plus peut-on craindre certains effets tels que des céphalées, dont il est nécessaire de démontrer ou non la relation avec l'exposition aux champs électromagnétiques.

Deux objectifs de ces expérimentations peuvent être différenciés :

- détection d'un effet physiologique, permettant de mettre en évidence la sensibilité de l'organisme au champ électromagnétique émis,
- recherche d'un effet néfaste pour la santé : mise en évidence de la causalité entre les symptômes décrits et l'exposition aux radiotéléphones.

En 1995, une mise au point d'un chercheur de l'Institut suédois de santé au travail [1] concluait à une absence de danger, pour la santé, du téléphone portable utilisé en conditions normales. L'évolution des connaissances ces 2 dernières années est présentée ci-après.

6.3.1. Expérimentations animales

La majorité des expérimentations animales réalisées jusqu'à présent n'apporte pas d'argument étayant les craintes émises vis-à-vis du cancer.

En particulier, il est maintenant exclu que les champs émis par les radiotéléphones cellulaires puissent être initiateurs d'un cancer. En revanche, la question d'un rôle de cofacteur reste posée.

Ainsi, deux études, dont les résultats mériteraient d'être confirmés par de nouveaux travaux, ne permettent pas d'éliminer complètement l'hypothèse de ce risque pour la santé :

- les travaux de Lai [2, 3], chez le rat, montrent une fragilité accrue des chromosomes de cellules nerveuses (inhibition des systèmes physiologiques de réparation ?) après une exposition à une émission impulsionnelle de 2,45 GHz, avec des impulsions de 2 μ s toutes les 2 ms ;
- une étude de Repacholi [4], chez des souris transgéniques déjà prédisposées à l'apparition de lymphomes, indique que l'exposition à ce type de champ pourrait faciliter le développement de ces tumeurs.

Si ces résultats étaient confirmés, il serait alors nécessaire d'en rechercher les mécanismes ou/et les conséquences éventuelles sur la santé humaine.

6.3.2. Études épidémiologiques

Une étude épidémiologique a été initiée par Rothman [5], depuis 1994, sur les troubles de santé chez les utilisateurs de radiotéléphone. Peut-être permettra-t-elle, à terme, de savoir si cette technologie représente réellement un facteur de risque de développement d'une tumeur cérébrale ? De multiples précautions ont été prises pour définir et prendre en compte les facteurs confondants possibles [6] et préciser les paramètres utilisables pour évaluer au mieux l'exposition [7].

Il faut noter que cette étude est réalisée aux États-Unis où 80 % des systèmes cellulaires fonctionnent avec des signaux analogiques⁽¹⁾, pour lesquels le codage est très différent des signaux numériques⁽²⁾ principalement utilisés en Europe.

6.3.3. Études sur volontaires sains

L'hypothèse qui gouverne la majorité des études sur volontaires sains est la recherche d'une interaction primaire avec l'organisme à l'origine de changements dont les répercussions à long terme « pourraient » être graves.

(1) Analogique : codage principalement par modulation de fréquence et d'amplitude sur une émission continue.

(2) Numérique : codage par modulation de fréquence sur une émission par impulsions.

Ce sont ces interactions primaires que l'on cherche à mettre en évidence ; la revue de la littérature indique que trois systèmes sont particulièrement susceptibles d'en être l'objet :

- le système endocrinien,
- le système nerveux,
- le système immunitaire.

Plusieurs études chez l'homme ont exploré le système nerveux et le système endocrinien. En revanche, la mise en évidence des mécanismes en cause dans l'atteinte du système immunitaire est particulièrement difficile en raison de la multiplicité des facteurs confondants. La variabilité intra et interindividuelle est très importante et permettrait difficilement de mettre en évidence des différences significatives.

Système endocrinien

Après exposition à des radiotéléphones cellulaires (2 h/jour, 4 semaines), il n'a pas été observé de différence significative sur les sécrétions de base ou les rythmes circadiens des hormones suivantes : ACTH, cortisol, LH, FSH, GH (hormone de croissance), TSH (hormone de stimulation de la thyroïde) et prolactine [8, 9, 10, 11]. Une autre hormone intéressante est la mélatonine, pour laquelle une inhibition de la sécrétion sous l'effet des champs électromagnétiques a été montrée par plusieurs équipes chez l'animal : un tel effet n'a pas été retrouvé chez l'homme après exposition aux champs des téléphones mobiles [12, 13, 14].

Système nerveux

L'organe le plus exposé aux champs des radiotéléphones est l'oreille. Les études réalisées à l'aide de techniques d'enregistrement les plus sensibles possible ont recherché une perturbation de signaux électrophysiologiques produits par cet organe lors d'une stimulation sonore. Ce sont les potentiels évoqués auditifs (PEA) et les produits de distorsion des oto-émissions (PDOE), qui ont été mesurés avant et après une exposition d'une heure aux champs des radiotéléphones. Aucune modification statistiquement et biologiquement significative n'a été mise en évidence [15, 16].

Un autre paramètre susceptible d'être perturbé par une stimulation extérieure est l'électroencéphalogramme (EEG). Une modification de ce paramètre a été recherchée après une heure d'exposition. Afin de sensibiliser au mieux cet examen, l'analyse a été réalisée après numérisation de l'EEG (EEG quantifié), permettant de rechercher un décalage discret des fréquences ou une modification de l'amplitude d'un signal à une fréquence déterminée. Le paramètre analysé dans ce cas est la densité de puissance spectrale dans chaque bande de fréquence. Il a été trouvé une légère modification de l'activité électrique cérébrale, dont l'interprétation physiologique est en cours.

Il ne semble pas que cette modification puisse a priori avoir un impact nocif sur la santé. D'autres équipes ont également étudié l'influence des radiotéléphones sur l'EEG. Thuroczy a trouvé un effet d'abord chez le rat [17], puis chez l'homme [18] : modification de la répartition des ondes dans certaines bandes de fréquences. Rösche et Mann [20] ont également publié un effet chez l'homme pendant le sommeil, l'exposition durant toute la nuit : la latence d'endormissement était légèrement réduite (9 minutes au lieu de 12 minutes) et la durée totale du sommeil

paradoxal (REM) était également diminuée. En revanche, ces auteurs n'ont observé aucun effet chez des volontaires éveillés soumis à une exposition de 3,5 min. [21].

6.3.4. Cas particulier des porteurs de stimulateurs cardiaques

Le risque le plus objectif reste celui d'interférences avec les stimulateurs cardiaques chez les sujets appareillés. Bien que le risque en situation normale d'utilisation soit minime et ait été principalement observé dans des conditions où le stimulateur cardiaque n'était pas implanté (essais in vitro), il est nécessaire de prévenir les porteurs de stimulateur cardiaque de ce risque afin qu'ils n'approchent pas leur téléphone à moins de 15 cm de leur poitrine, même et surtout en veille, et qu'ils l'utilisent sur l'oreille controlatérale au côté d'implantation du stimulateur. Ils peuvent éventuellement faire tester ce risque d'interférence dans un service de cardiologie.

6.3.5. Conclusions et perspectives

L'état actuel des connaissances quant au risque de cancer chez l'homme de par l'utilisation de radiotéléphones cellulaires est rassurant. Cependant, compte tenu de certaines données de l'expérimentation animale, ce risque ne peut pas encore être totalement exclu.

Ces études laissent à penser que, si risque il y a, il serait circonscrit à des situations particulières (conditions d'exposition, sensibilité individuelle...) qui restent à mieux définir. Dans les années à venir, des réponses devraient pouvoir être apportées, notamment grâce à l'étude coordonnée par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) de Lyon, qui doit démarrer incessamment. D'autres manifestations pathologiques de gravité moindre telles que des céphalées pourraient être dues à l'utilisation de cette technologie. De légères modifications de l'électrogenèse cérébrale nécessitent également d'être confirmées ; si c'est le cas, les conséquences possibles de ces perturbations sur la santé humaine devront être recherchées.

Un rapport d'experts réunis par la Direction générale de la santé en juin 2000 sur les téléphones mobiles, leurs stations de base et la santé a été rendu public au début de l'année 2001.

BIBLIOGRAPHIE

- | | |
|--|---|
| <p>[1] Hansson Mild K. – Exposure to electromagnetic fields at radio frequencies from mobile phones (in Swedish). <i>Arbete och Hälsa</i>, 1994, 19.</p> <p>[2] Lai H., Singh N.P. – Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to</p> | <p>radiofrequency electromagnetic radiation. <i>International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine</i>, 1996, 69, 4, pp. 513-521.</p> <p>[3] Lai H., Singh N.P. – Acute low intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat</p> |
|--|---|

brain cells. *Bioelectromagnetics*, 1995, 16, pp. 207-210.

[4] Repacholi M.H., Basten A., Gebiski V., Noonan D., Finnie J., Harris A.W. - Lymphomas in Epim I transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiation Research*, 1997, 147, pp. 631-640.

[5] Rothman K.J., Loughlin J.E., Funch D.P., Dreyer N.A. - Overall mortality of cellular telephone customers. *Epidemiology*, 1996, 7, 3, pp. 303-305.

[6] Rothman K.J., Chou C.K., Morgan R. et coll. - Assessment of cellular telephone and other radio frequency exposure for epidemiologic research. *Epidemiology*, 1996, 7, 3, pp. 291-298.

[7] Bren S.P.A. - Reviewing the RF safety issue in cellular telephones. *IEEE Engineering in Medicine Biology Magazine*, 1996, 15, 3, pp. 109-115.

[8] Miro L., de Seze R., Desprès B., Bec C. - Human studies on the effects of cellular phones on antepituitary hormones: preliminary results. In: *Methods for exposure assessment related to standards design and quality control of laboratory experiments*, 7^e COST 244 MCM and Workshop, Athènes, 27-28 mars 1995. Sölna (Suède), National Institute for Working life, 1995.

[9] Miro L., de Seze R., Fabbro-Peray P., Desprès B., Bec C., Albertin V. - Human studies on the possible effects of cellular phones on antepituitary hormones. In: *Proceedings of the COST 244 Meeting on: Biological Effects Relevant to Amplitude Modulated RF Fields*, Kuopio, Finlande, 3-4 septembre 1995. Sölna (Suède). National Institute for Working life, 1995.

[10] De Seze R., Fabbro-Peray P., Toutou Y., Miro L. - Effects on human of microwaves emitted by GSM-type mobile telephones: chronobiological rhythm of ACTH. In: *18th annual meeting of Bioelectromagnetics Society*, Victoria, Canada, 9-14 juin 1996. Frederik (Etats-Unis), W/L Associates, Ltd, 1996, pp. 56-57.

[11] De Seze R., Bec C., Fabbro-Peray P., Miro L. - Effects of microwaves emitted by mobile phones on hypophyseal hormones in humans. In: *18th annual meeting of Bioelectromagnetics Society*, Victoria, Canada, 9-14 juin 1996. Frederik (Etats-Unis), W/L Associates, Ltd, 1996, p. 123.

[12] De Seze R., Ayoub J., Fabbro-Peray P., Miro L., Toutou Y. - No effect in humans of microwaves emitted by GSM and DCS mobile telephones on the circadian rhythm of plasma melatonin. In: *2nd World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*, Bologna, Italie 8-13 juin 1997. Frederik (Etats-Unis), W/L Associates, Ltd, 1997, p. 141.

[13] De Seze R., Ayoub J., Fabbro-Peray P., Miro L., Toutou Y. - Etude de l'exposition aux champs électromagnétiques émis par les téléphones mobiles GSM et DCS sur le rythme circadien de mélatonine chez l'homme. In: *Congrès National de Radioprotection*, Avignon, 18-22 juin 1997. Fontenay-aux-roses, Société française de radioprotection, 1997.

[14] De Seze R., Ayoub J., Miro L., Toutou Y. - Effect in humans of electromagnetic fields emitted by mobile telephones on the circadian rhythm of endocrine hormones. *Chronobiology International*, 1997, 14, sup 1, p.40.

- [15] Thimonier C., Chabert R., Ayoub J., De Seze R., Lallemand J.G., Miro L. - No effect in humans of microwaves emitted by GSM mobile telephones on the auditory brainstem responses and auditory distortion products. *In : 2nd World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, Bologne, Italie, 8-13 juin 1997.* Frederik (Etats-Unis), W/L Associates, Ltd, 1997, pp. 273-274.
- [16] Thimonier C., Chabert R., Ayoub J., De Seze R., Lallemand J.G., Miro L. - Etude chez l'homme de l'exposition aux champs électromagnétiques émis par les téléphones mobiles GSM sur les potentiels évoqués auditifs et les produits de distorsion acoustiques. *In Congrès National de Radioprotection, Avignon, 18-22 juin 1997.* Fontenay-aux-roses, Société française de radioprotection, 1997.
- [17] Thuroczy G., Kubinyi G., Nagy N., Szabo L.D. - Measurements of visual evoked potentials (VEP) and brain electrical

activity (EEG) after GSM-type modulated microwave exposure on rats. *In : Honma T. (éd) - Advanced Computational Electromagnetics.* IOS Press, Amsterdam, 1995, pp. 384-395.

[18] Thuroczy G., Kubinyi G., Sinay H., Bakos J., Sipos K., Lenart A., Szabo L.D. - Human studies on potential influence of RF exposure emitted by GSM cellular phones on cerebral circulation and electroencephalogram (EEG). *In : 2nd World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, Bologne, Italie, 8-13 juin 1997.* Frederik (Etats-Unis), W/L Associates, Ltd, 1997, pp. 164-165.

[19] Mann K., Röschke J. - Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep. *Neuropsychobiology*, 1996, 33, pp. 41-47.

[20] Röschke J., Mann K. - No short-term effects of digital mobile radio telephone on the awake human electroencephalogram. *Bioelectromagnetics*, 1997, 18, pp. 172-176.

Rappels physiques

Paramètres d'émission des téléphones

Les paramètres des champs émis par les téléphones mobiles sont standardisés selon différents systèmes en fonction des régions et des pays. En France, les deux systèmes actuellement en place sont le système GSM, commercialisé par les opérateurs Itinéris et SFR, et le système DCS, plus récent, commercialisé par l'opérateur Bouygues.

Système GSM (global system for mobile)

La fréquence porteuse s'étend de 890 à 915 MHz. A l'intérieur de cette gamme, les bases cellulaires attribuent à chaque utilisateur une bande plus étroite de 0,2 MHz pour chaque communication (découpage fréquentiel). Cette bande est aléatoire et peut être amenée à changer lorsque l'utilisateur se déplace ; sa communication est alors relayée d'une base à une autre.

A l'intérieur de chaque bande de fréquence, il existe un nouveau découpage, temporel cette fois-ci : l'information est émise par impulsions, à raison d'une impulsion de 576 ms toutes les 4,6 ms. Ceci permet que chaque bande de fréquence soit utilisée à tour de rôle par huit utilisateurs différents. La communication est ensuite « reconstituée », après décodage, le tout dans un temps suffisamment court pour qu'elle semble continue. Une conséquence intéressante de ce découpage temporel est une diminution par huit de la puissance moyenne par rapport à la puissance-crête (les téléphones cellulaires ayant une puissance crête de 2 W, la puissance moyenne est donc de 250 mW).

Champ émis, DAS

Environ 40 % de l'énergie émise est absorbée dans la tête. Cependant, cette absorption n'est pas homogène, 70 % de cette énergie est absorbée au niveau du lobe temporo-pariétal, en regard de l'antenne. Ainsi, le DAS local est de 0,6 W/kg.

La puissance décroît exponentiellement en fonction de la profondeur par rapport à la surface. Le DAS sous-cutané peut donc encore être supérieur lorsqu'il est calculé sur un petit volume (1 g ou 10 g). On est alors obligé, pour calculer ce DAS, de connaître ou de calculer le diagramme du champ électrique dans les tissus.

Problème des stations de base

Les stations de base se multiplient et suscitent des réactions de rejet de la part des individus habitant à proximité. Du point de vue physique, le champ électrique issu d'une station couramment rencontrée et auquel peuvent être soumises les personnes, se présente de la façon suivante :

- strictement en face de l'antenne, le champ électrique, à une distance de 1 mètre, est de 50 V/m, puis décroît exponentiellement. La norme européenne ENV 50166-2 étant de 41 V/m à 900 MHz et de 58 V/m à 1 800 MHz, ceci implique qu'une distance minimale de 2 mètres soit respectée ;
- dès que l'on s'éloigne de l'axe de l'antenne en dessus ou en dessous (cas le plus courant, ces antennes étant habituellement disposées à une hauteur de 20 m environ), le champ électrique est au maximum de 1 à 2 V/m. Ce maximum n'est pas au pied du pylône supportant l'antenne mais à une distance horizontale de 10 à 20 m.

Il ressort de ces éléments que, dans la majorité des cas, l'exposition humaine par les stations de base est négligeable et ne constitue pas une préoccupation scientifique et de santé prioritaire.

ANNEXE 6.4.

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

Traduction d'extraits de l'article « Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) », paru dans la revue « Health physics », avril 1998, volume 74, numéro 4, pp. 494 – 522, reproduit ici avec l'aimable autorisation de l'ICNIRP et de la Health Physics Society.

Voir également l'article paru dans les Cahiers de notes documentaires, 182, 1^{er} trimestre 2001, ND 2143, pp. 19-48.

Tableau 6

Niveaux de référence pour l'exposition professionnelle à des champs électriques et magnétiques alternatifs (valeurs rms en conditions non perturbées)*

Domaine de fréquences	Intensité de champ E (V.m ⁻¹)	Intensité de champ H (A.m ⁻¹)	Champ B (μT)	Densité de puissance de l'onde plane équivalente S _{eq} (W.m ⁻²)
jusqu'à 1 Hz	-	1,63 x 10 ⁵	2 x 10 ⁵	-
1 - 8 Hz	20 000	1,63 x 10 ⁵ /f	2 x 10 ⁵ /f	-
8 - 25 Hz	20 000	2 x 10 ⁵ /f	2,5 x 10 ⁵ /f	-
0,025 - 0,82 kHz	500/f	20/f	25/f	-
0,82 - 65 kHz	610	24,4	30,7	-
0,065 - 1 MHz	610	1,6/f	2,0/f	-
1 - 10 MHz	610/f	1,6/f	2,0/f	-
10 - 400 MHz	61	0,16	0,2	10
400 - 2 000 MHz	3f ^{0.2}	0,008f ^{0.2}	0,01f ^{0.2}	f/40
2 - 300 GHz	137	0,36	0,45	50

* Notes :

1. f : comme indiqué dans la colonne Domaine de fréquences.
2. A condition que les restrictions de base soient respectées et que l'on puisse exclure les effets nocifs indirects, les valeurs d'intensité de champ peuvent être dépassées.
3. Aux fréquences comprises entre 100 kHz et 10 GHz, S_{eq}, E', H' et B' doivent être moyennés sur une période quelconque de 6 minutes.
4. Pour les fréquences allant jusqu'à 100 kHz, on obtient la densité de courant crête en multipliant la valeur rms par √2 (= 1,414). Pour des impulsions de durée tp, il est recommandé de calculer la fréquence équivalente applicable pour le calcul des restrictions de base selon la formule f = 1/2 tp.

5. Pour les valeurs de crête aux fréquences supérieures à 100 kHz, voir figures 1 et 2. Entre 100 kHz et 10 MHz, les valeurs de crête des intensités de champ sont obtenues par interpolation de 1,5 fois la valeur de crête à 100 kHz à 32 fois la valeur de crête à 10 MHz. Pour les fréquences supérieures à 10 MHz, il est suggéré que la densité de puissance de crête de l'onde plane équivalente, moyennée sur la largeur d'impulsion, ne dépasse pas 1000 fois les restrictions S_{eq} ou que l'intensité de champ ne dépasse pas 32 fois les niveaux d'intensité de champ donnés dans le présent tableau.

6. Aux fréquences supérieures à 10 GHz, il faut moyenner S_{eq} , E^2 , H^2 et B^2 sur une période quelconque de $68/f^{1/3}$ min (f étant exprimée en GHz).

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

Tableau 7

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

Domaine de fréquences	Intensité de champ E (V.m ⁻¹)	Intensité de champ H (A.m ⁻¹)	Champ B (μT)	Densité de puissance de l'onde plane équivalente S_{eq} (W.m ⁻²)
jusqu'à 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	-
1 - 8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^4/f$	$4 \times 10^4/f$	-
8 - 25 Hz	10 000	$4\,000/f$	$5\,000/f$	-
0,025 - 0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0,8 - 3 kHz	$250/f$	5	6,25	-
3 - 150 kHz	87	5	6,25	-
0,15 - 1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	-
1 - 10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	-
10 - 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 - 2 000 MHz	$1,375f^{1/2}$	$0,0037f^{1/2}$	$0,0046f^{1/2}$	$f/200$
2 - 300 GHz	61	0,16	0,20	10

* Notes :

1. f comme dans la colonne Domaine de fréquences.

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

3. Aux fréquences comprises entre 100 kHz et 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 et B^2 doivent être moyennés sur une période quelconque de 6 minutes.

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

5. Pour les valeurs de crête aux fréquences supérieures à 100 kHz, voir figures 1 et 2. Entre 100 kHz et 10 MHz, les valeurs de crête des intensités de champ sont obtenues par interpolation de 1,5 fois la valeur de crête à 100 kHz à 32 fois la valeur de crête à 10 MHz. Pour les fréquences supérieures à 10 MHz, il est suggéré que la densité de puissance de crête de l'onde plane équivalente, moyennée sur la largeur d'impulsion, ne dépasse pas 1000 fois les restrictions S_{eq} ou que l'intensité de champ ne dépasse pas 32 fois les niveaux d'intensité de champ donnés dans le présent tableau.

6. Aux fréquences supérieures à 10 GHz, il faut moyenner S_{eq} , E^2 , H^2 et B^2 sur une période quelconque de $68/f^{1/3}$ min (f étant exprimée en GHz).

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

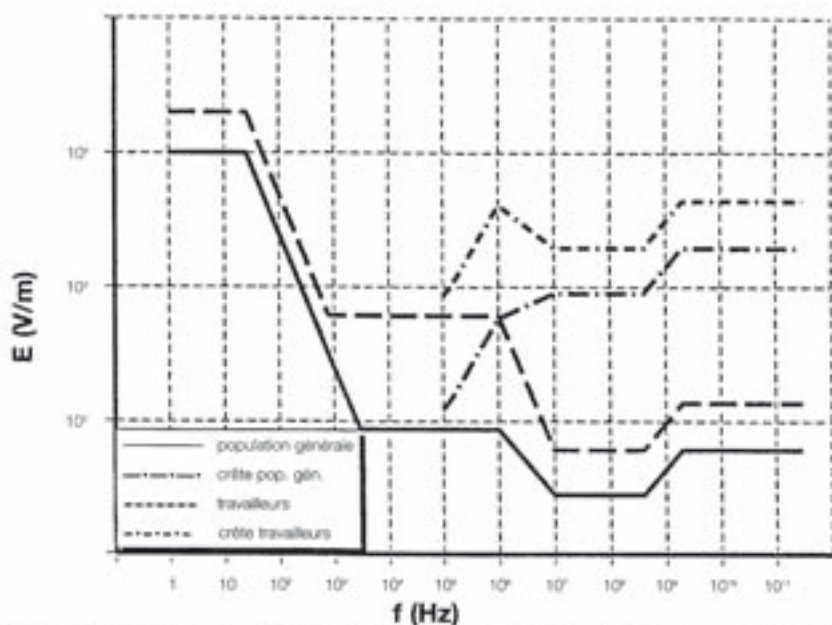


Figure 1. Niveaux de référence pour l'exposition à des champs électriques alternatifs (voir tableaux 6 et 7)

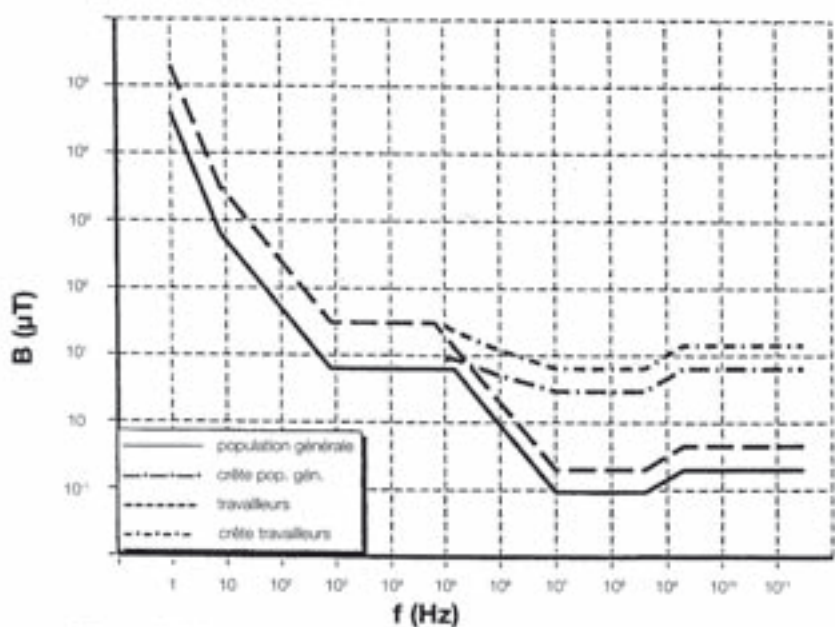


Figure 2. Niveaux de référence pour l'exposition à des champs magnétiques alternatifs (voir tableaux 6 et 7)

7

LEXIQUES



7.1. GLOSSAIRE DES TERMES BIOLOGIQUES ET MÉDICAUX

Acétylcholinestérase : enzyme qui catalyse l'hydrolyse de la fonction ester de l'acétylcholine (cf. catécholamines).

ACTH : (adréno-corticotrophique hormone) hormone corticotrope ou corticostimuline d'origine antéhypophysaire, excitant la sécrétion hormonale de la substance corticale de la capsule surrénale.

ADN : acide désoxyribonucléique, molécule située dans les chromosomes, support des gènes, servant à la transmission héréditaire.

Adrénaline : (cf. catécholamines).

Anévrisme : tumeur vasculaire produite sur le trajet d'une artère par la dilatation de la paroi.

Anticorps : molécules permettant la défense de l'organisme. Elles apparaissent dans le sérum d'un animal à la suite de l'injection d'éléments qui lui sont étrangers, appelés antigènes.

Antigènes : substances agressives pour l'organisme, pouvant provoquer la formation d'anticorps.

ATP : (acide adénosine triphosphorique) substance intervenant dans les métabolismes cellulaires.

ARN : acide ribonucléique, molécule servant de matrice à la production des différentes protéines.

Barrière hématoencéphalique (BHE) : membrane séparant les cellules nerveuses du cerveau des vaisseaux. La BHE ne laisse normalement passer que les sucres et quelques acides aminés.

Bleu Evans : colorant vital utilisé en physiologie.

Calcium dépendants (systèmes) : le Ca^{++} , ayant une action indirecte sur

la conformation protéique en se liant à des récepteurs spécifiques, agit sur l'activité d'un certain nombre de systèmes effecteurs tels que les enzymes, les canaux ioniques, l'appareil contractile, les liaisons antigènes-anticorps, dits systèmes calcium dépendants.

Calmoduline : molécule servant au transport et à la fixation intracellulaire du Ca^{++} .

Carcinogénèse : synonyme de cancérogénèse.

Cataracte : affection oculaire aboutissant à l'opacité du cristallin.

Catgut chromé : fil employé en chirurgie pour les sutures, recouvert d'une fine pellicule de chrome le rendant conducteur.

Catécholamines : (adrénaline, acétylcholine, métacholine, dopamine) neurotransmetteurs (cf. neurotransmetteurs) du système nerveux.

Circadien : qui se rapporte à une durée d'environ 24 heures (moins précis que nycthéméral : cf. ce terme).

Clone : groupe de cellules de même constitution génétique, issues d'une seule cellule.

Cochléaire : qui se rapporte à la cochlée (partie de l'oreille interne où se trouve l'organe récepteur de l'audition).

Cortex cérébral : zone périphérique du cerveau formée principalement par les cellules nerveuses.

Corticostéroïdes (hormones) : (cf. Glucocorticoïdes).

Corticostérone : une des hormones corticostéroïdes.

CRF : (cortico-releasing factor) hor-

mone hypothalamique régulant la production d'ACTH par l'hypophyse.

Dopamine : (cf. catécholamines).

Dyesthésies : Sensations de diminution ou d'augmentation de la sensibilité.

ECG : Electrocardiogramme fournissant un tracé résultant de l'enregistrement de l'activité électrique à l'origine des contractions cardiaques. On distingue l'onde *P*, auriculaire, liée à la contraction des oreillettes et le complexe *QRS* lié à la contraction ventriculaire ; l'espace *P-R* correspond au temps de propagation de l'influx nerveux de l'oreillette au ventricule.

EEG : électroencéphalogramme fournissant un tracé résultant de l'enregistrement de l'activité électrique générée par le cortex cérébral. En cas d'irritation de ce dernier, apparaissent des oscillations de grande amplitude et de durée brève (pointes) pouvant être suivies d'une oscillation plus longue et d'aspect arrondi (pointe-onde).

Électrophorèse : transport vers les électrodes, sous l'influence d'un champ électrique, de particules chargées électriquement en solution ou en suspension dans un liquide.

Enzymes de l'ARN et ADN (ex : ARN polymérase) : enzymes agissant sur la production, la dénaturation ou la réparation de l'ADN ou de l'ARN.

Fibrillation ventriculaire : trémulation désordonnée des fibres musculaires cardiaques, entraînant une inefficacité de la pompe cardiaque.

Fibroblastes : cellules fusiformes, en voie de différenciation, facilement reproduites en cultures de tissu.

Formule sanguine : étude de la répartition dans le sang des différents types cellulaires de globules blancs (ou leucocytes).

FSH : hormone antéhypophysaire stimulant la production des oestrogènes (hormones ovariennes).

GH : hormone antéhypophysaire de croissance.

Gliome : tumeur maligne développée aux dépens du tissu nerveux, le plus souvent cérébral.

Glucocorticoïdes (hormones) : hormones produites par la substance corticale de la glande surrénale.

Hématocrite : technique destinée à mesurer le volume des globules rouges par rapport à celui du sang.

Hématopoïèse : production des éléments figurés du sang (globules et plaquettes).

Homéostasie : maintien des différences constantes physiologiques à leur valeur normale.

Hypothalamus : région de l'encéphale située à la base du cerveau, où se trouvent principalement le centre de l'activité sympathique, le centre de l'éveil et du sommeil, le centre de la régulation thermique.

Implant actif : matériel implanté dans le corps humain ayant une action sur la physiologie d'un de ses composants (par exemple stimulateur cardiaque – « pacemaker » – ou pompe à insuline implantable). Ces implants contiennent généralement des composants électriques, électroniques et très souvent informatiques.

Implant passif : matériel implanté dans le corps humain pour remplacer un de ses composants défaillants (par exemple prothèse osseuse). Ces implants, généralement réalisés en matériaux inertes, n'ont théoriquement pas d'action sur les tissus avoisinants.

Immunocompétent (système) : ensemble des cellules intervenant dans la réponse immunitaire.

Index mitotique : index de multiplication cellulaire.

Initiation ou Induction des cancers : première phase de la cancérogénèse, phénomène qui aboutit, au cours d'une action unique, à une modification définitive de l'ADN (ou mutation).

LCR (Liquide céphalorachidien) : liquide dans lequel baignent le cerveau et la moelle épinière, assurant leur protection.

Leucémie (myéloïde, lymphoïde) : prolifération cancéreuse des tissus myéloïde ou lymphoïde, se traduisant par une augmentation importante, dans le sang, du nombre des globules blancs correspondants.

Leucocyte : globule blanc.

LH : hormone antéhypophysaire stimulant la production de la progestérone (hormone ovarienne).

Lipothymie : Malaise passager avec impression d'évanouissement.

Lymphocyte T : globule blanc, participant au système thymique, responsable de l'immunité cellulaire.

Macrophages : cellules de grande taille intervenant dans les processus immunitaires par destruction des cellules étrangères en les englobant, les absorbant et les digérant.

Magnétosphères : cf. phosphères.

Mélatonine : hormone produite par l'épiphyse (ou glande pinéale), ayant un rôle dans la régulation du cycle nyctéméral (cf. nyctéméral). Sa diminution a été observée dans les cancers du sein.

Mitogène : produit qui induit la multiplication cellulaire, par exemple, la phytohématagglutinine cf. ce terme).

Mnésique : relatif à la mémoire.

Mutagène : qui entraîne une mutation au niveau des gènes.

Neuroblastes : cellules nerveuses embryonnaires.

Neurotransmetteurs : molécules chimiques permettant le passage et la régulation de l'influx nerveux au travers des synapses (cf. synapse).

Nyctéméral : qui se rapporte à un espace de temps comprenant un jour et une nuit, soit 24 heures.

Ondes α : ondes de l'EEG apparaissant

normalement chez l'homme éveillé en repos sensoriel, d'une fréquence de 8 à 12 Hz.

Opiode endogène (système) : système physiologique aboutissant à la libération dans l'organisme d'endorphines, molécules proches de la morphine et ayant ses propriétés antalgiques.

Ostéosynthèse : intervention assurant la réduction et la contention des fractures des os à l'aide de matériels tels que vis, plaques, boulons, tiges,... que l'on laisse dans les tissus. Ces matériaux constituent alors des implants passifs.

Paresthésies : sensations pénibles variées, telles que fourmillements, engourdissements, picotements, chaleur ou froid, phénomènes de vasoconstriction, survenant au niveau d'un territoire régional ou local.

Perspiration (cutanée) : échanges gazeux se faisant à travers la peau.

Phosphènes : sensations lumineuses perçues par l'œil en l'absence de stimulation lumineuse de ce dernier ; quand ce phénomène survient lors de l'application d'un champ magnétique au niveau de la tête, on parle de magnétosphères.

Physiothérapie : Utilisation dans un but thérapeutique des agents physiques: eau, air, électricité, rayonnements électromagnétiques,...

Phytohématagglutinine : protéine présente dans le haricot rouge, capable d'agglutiner les hématies et de provoquer la prolifération et la transformation des petits lymphocytes.

Pinocytose : absorption de gouttelettes de liquide par les macrophages (cf. macrophages).

Plaquettes : éléments figurés du sang jouant un rôle essentiel dans la coagulation du sang ; ils contiennent des petites formations ou granules renfermant en particulier de la sérotonine (cf. sérotonine) et du calcium. La dégranulation des plaquettes

entraîne la libération de ces produits dans le sang.

Potentiel d'action : modification de l'état électrique d'un nerf à la suite d'une stimulation. Le propre du PA est sa propagation le long de la fibre nerveuse, à distance du point stimulé.

Potentiel évoqué : variation du potentiel électrique cérébral suivant une stimulation expérimentale d'un organe sensitif ou sensoriel ou des voies sensitives ou sensorielles.

Promotion cancéreuse : deuxième phase de la cancérogénèse, phénomène survenant après un temps plus ou moins long après l'initiation, et entraînant la multiplication de la cellule mutée en un clone (cf. clone) de cellules cancéreuses.

Protéinurie : élimination urinaire de protéines (phénomène généralement pathologique).

Pseudopodes : prolongements qu'émettent certains organismes inférieurs, ainsi que les leucocytes, pour se déplacer.

Rash : Éruption transitoire.

Spécifiques (effets) : concerne les effets athermiques dans le cas des ondes électromagnétiques.

Tératogène (effet) : effet produisant des malformations embryonnaires.

Thymique : qui concerne le thymus (glande essentiellement impliquée dans la résistance aux infections chez l'enfant).

Thymo-dépendants (anticorps) : anticorps soumis à l'action du système thymique cf. thymique).

Sérotonine : amine intervenant dans les tissus de l'organisme comme médiateur chimique.

Spermatocytes : cellules de la lignée germinale aboutissant à la production des spermatozoïdes et se trouvant dans les testicules.

Synapse : zone de contact entre deux cellules nerveuses ou jonction synaptique. À ce niveau, la transmission de l'information se fait entre les deux terminaisons nerveuses, grâce aux neurotransmetteurs (cf. neurotransmetteurs).

Thrombose : formation d'un caillot sanguin à l'intérieur d'un vaisseau ou d'une cavité du cœur chez un être vivant.

Triglycérides : forme de réserve des graisses.

Troubles du rythme : modifications du rythme cardiaque normal. Ce phénomène, transitoire ou définitif, peut être lié à une lésion organique ou à un dysfonctionnement pathologique.

Tumeurs hématopoïétiques : formations cancéreuses intéressant les cellules sanguines et immunocompétentes.

7.2. GLOSSAIRE DES TERMES TECHNIQUES

Accélérateur de particules : appareil qui permet de communiquer à des particules chargées (protons, électrons,...) une énergie cinétique souvent très importante grâce à

l'action de champs électriques et/ou magnétiques.

ACGIH : « American conference of governmental industrial hygienists » :

Association gouvernementale américaine des hygiénistes de l'industrie.

ANSI : « American national standard institute » : Organisme américain de normalisation.

Antenne : appareillage destiné à émettre et à recevoir des ondes électromagnétiques.

Bande passante : la bande passante d'un appareil correspond à une gamme de fréquences, limitée par des seuils supérieur et inférieur, dans laquelle le signal n'est pas distordu.

Cage de Faraday : cage à parois conductrices permettant d'isoler les corps placés à l'intérieur des champs électriques extérieurs.

CCE : Commission des communautés européennes

CEN : Comité européen de normalisation.

CENELEC (CT 111) : Comité européen électrotechnique de normalisation. Le CT 111 est le comité technique en charge des normes de sécurité concernant les OEM.

Chambre anéchoïque : enceinte absorbant le rayonnement incident évitant ainsi toute réflexion. Une étude effectuée dans une telle chambre est assimilable à une étude effectuée en champ libre.

Champ constant : champ dont l'intensité ne varie pas dans le temps.

Champ électrique $\vec{E}$: vecteur champ existant en un point P distant de d d'une charge électrique « q ». Ce champ se traduit par une force d'attraction ou de répulsion agissant sur toute charge placée en P. Son intensité s'exprime en volts par mètre ($V \cdot m^{-1}$).

Champ électromagnétique : Champ dont les composantes électrique et magnétique sont associées à l'onde électromagnétique (OEM).

Champ libre : espace de propagation d'une OEM dans lequel il n'existe aucun phénomène de réflexion,

réfraction, diffraction ou diffusion (mesurage en champ libre).

Champ lointain : région (dite encore zone de Fraunhofer) dans laquelle les champs électrique et magnétique sont perpendiculaires entre eux et par rapport à la direction de propagation. Dans cette zone située à environ 10 longueurs d'onde de l'antenne ou la structure radiante, l'intensité de l'OEM varie de façon inversement proportionnelle au carré de la distance et les modules de $\vec{E}$ et $\vec{H}$ sont reliés entre eux par la relation $E/H = 377 \Omega$. La simple mesure de $\vec{E}$ ou de $\vec{H}$ permet de déterminer la densité de puissance D de l'OEM.

Champ magnétique $\vec{H}$: vecteur champ dû à l'existence d'un courant électrique déterminant des forces magnétiques d'attraction ou de répulsion liées au mouvement de particules chargées animées d'une vitesse constante. Un aimant permanent ou un courant continu génère un champ magnétique statique. Son intensité s'exprime en ampères par mètre ($A \cdot m^{-1}$).

Champ proche : région (dite encore zone de Fresnel) généralement proche de l'antenne ou de la structure radiante (à quelques longueurs d'onde) dans laquelle les champs électrique et magnétique n'ont pas un caractère d'onde plane mais varient fortement d'un point à un autre. Dans cette zone, $\vec{E}$ et $\vec{H}$ ne sont pas corrélés et doivent être mesurés indépendamment.

Champ pulsé : champ émis par impulsions. Entre chaque impulsion il y a absence de champ.

Conductance : inverse de la résistance.

Confinement plasmatique : technique permettant de maintenir un plasma dans un volume réduit déterminé.

Constante de temps : temps nécessaire à un instrument de mesure pour atteindre un pourcentage défini de la valeur finale du paramètre mesuré (en général 90 % de cette valeur).

Courant induit : courant électrique produit dans un corps lorsque celui-ci est soumis à un champ électromagnétique.

DAS : Débit d'absorption spécifique : terme français correspondant au SAR. Il est exprimé en $W \cdot kg^{-1}$. Généralement, il s'agit de l'absorption énergétique massique dans les tissus (cf. SAR).

Dégazage des tubes électroniques : opération industrielle consistant à vider les tubes électroniques de toute trace de gaz.

Densité de puissance surfacique : quotient du flux énergétique reçu par un élément de surface par l'aire de cet élément. Elle est exprimée en $W \cdot m^{-2}$.

Diagramme de champ : schéma visualisant de façon quantitative l'émission électromagnétique autour d'une source.

Diélectrique : relatif à une substance isolante ou très peu conductrice du courant électrique.

Dosimétrie : mesure de la quantité d'énergie à laquelle un corps est exposé ou qui est absorbée par ce corps.

Effet-dose (relation) : Relation quantitative existant entre la survenue et l'importance d'un effet biologique et la dose absorbée par la cible biologique.

Effet fenêtre : effet physiologique ne survenant qu'entre deux seuils, supérieur et inférieur, d'un paramètre expérimental (fréquence ou puissance).

Effet pointe : accumulation des charges électriques dans la section la plus réduite d'un conducteur. Par exemple, au niveau de l'extrémité d'un fil métallique ou d'une vis, il peut exister une accumulation de charges électriques telle, qu'elle peut être à l'origine d'une décharge. Celle-ci peut provoquer par elle-même un certain nombre d'effets biologiques ou physiologiques.

Électrolyse : décomposition chimique de substances en fusion ou en solution par le passage d'un courant électrique.

ELF : rayonnements électromagnétiques de fréquences supérieures à 0 Hz et inférieures à 10 kHz (correspond à l'exclusion des champs statiques, à la gamme des basses fréquences adoptée par le CENELEC TC 211).

EMP : exposition maximale permise (exprimée également en terme de VLE, cf. VLE).

Facteur de forme : il correspond au rapport de la durée τ d'une impulsion dans une suite d'oscillations sur la durée t de l'intervalle existant entre chaque impulsion. Par exemple, pour $\tau = 100$ ms et $t = 200$ ms, le facteur de forme est égal à 1/2.

Fantôme : dispositif expérimental tendant à reproduire les caractéristiques physiques des tissus biologiques et des organismes vivants, utilisé pour étudier l'action d'un agent physique sur les organismes vivants.

Fraunhofer (zone de) : cf. champ lointain.

Fréquence : nombre de vibrations ou d'oscillations par unité de temps dans un phénomène périodique.

Fresnel (zone de) : cf. champ proche.

Gradient de champ : vecteur représentant la variation du champ dans le temps ou dans l'espace.

Gyroscope : appareil inventé par Foucault pour mettre en évidence la rotation de la terre.

Hall (effet) : distorsion des lignes de courant dans une structure métallique très mince quand elle est placée dans un champ magnétique normal à son plan.

Harmoniques : multiples de la fréquence fondamentale : par exemple, les harmoniques du 50 Hz sont 100, 150, 200 Hz, ...

Hyperfréquences : rayonnements électromagnétiques de fréquences comprises entre 300 MHz et 300 GHz (CENELEC TC 111).

IEEE : « Institute of electrical and electronics engineers » : institut des ingénieurs électriciens et électroniciens.

ICNIRP : « International commission on non ionizing radiation protection » : commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants ayant succédé au comité international des rayonnements non ionisants de l'association internationale de radioprotection (cf. INIRC et IRPA).

INIRC : comité international des rayonnements non ionisants de l'association internationale de radioprotection (cf. IRPA).

IRM : imagerie par résonance magnétique.

IRPA : « International radiation protection association » : organisme international de radioprotection éditant des recommandations concernant les rayonnements électromagnétiques ionisants ou non.

Largeur d'impulsion : durée d'une impulsion mesurée à la hauteur moyenne de cette dernière.

Magnétohydrodynamie : discipline qui étudie la dynamique des fluides conducteurs en présence d'un champ magnétique.

Magnétron : source d'hyperfréquences.

Modulation d'amplitude : système de modulation faisant varier l'amplitude de l'onde porteuse, la fréquence de celle-ci restant constante.

Modulation de fréquence : système de modulation faisant varier la fréquence de l'onde porteuse à la cadence des signaux modulateurs, l'amplitude de l'onde porteuse restant constante.

Normes européennes : Normes de construction ou de sécurité établies

par le CEN et le CENELEC, applicables dans tous les pays européens, après adoption par l'autorité européenne.

NRPB : « National radiological protection board » : bureau gouvernemental de radioprotection en Grande Bretagne.

OEM : désignation anglo-saxonne des ondes électromagnétiques, regroupant les rayonnements de radiofréquences et d'hyperfréquences.

OMS : Organisation mondiale de la santé (WHO « World health organisation » en anglais).

Onde porteuse : onde électromagnétique de haute fréquence, employée pour la transmission des signaux par modulation.

Pictogramme de signalisation : graphisme particulier attaché à un objet, un lieu, un danger, une situation permettant de les repérer aisément sans secours d'indications littérales écrites. Les pictogrammes sont réglementaires en France sur les lieux de travail (Arrêté ministériel du 4 novembre 1993).

Puissance : quotient de l'énergie délivrée par un système par le temps d'émission. La puissance s'exprime en watts (W).

Puissance crête : puissance maximale contenue dans une impulsion.

Radiofréquences : rayonnements électromagnétiques de fréquences comprises entre 10 kHz et 300 MHz (CENELEC TC 211).

Recuit des métaux : technique industrielle permettant d'assurer à un produit métallurgique une stabilité physico-chimique et structurelle par chauffage à une température suffisante suivi d'un refroidissement lent.

RMN : Résonance magnétique nucléaire.

RNI : Rayonnements non ionisants : rayonnements dont l'énergie photonique est inférieure à 12,5 eV, c'est-

à-dire incapable de provoquer l'ionisation d'un corps ou d'une substance.

SAR : « Specific absorption rate » : Débit spécifique d'absorption (DAS), soit la dérivée dans le temps de la quantité d'énergie absorbée (dW) par une masse élémentaire (dm) ou contenue dans un volume élémentaire (dv) de densité massique ρ .

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho \cdot dv} \right)$$

Le SAR (ou DAS) est exprimé en $W \cdot kg^{-1}$.

Solénoïde : bobine de forme cylindrique dont la longueur est très grande par rapport au diamètre.

Parcourue par un courant, elle crée un champ magnétique intérieur pratiquement uniforme.

Spectrométrie ou **Spectroscopie** : étude graphique d'une grandeur en fonction de la fréquence ou de la longueur d'onde.

Spin : moment cinétique des particules élémentaires des noyaux atomiques se traduisant par un nombre quantique positif ou négatif en rapport avec l'énergie liée à la rotation de l'électron sur lui-même.

Temps de moyennage : temps pendant lequel est sommée l'énergie contenue dans les impulsions afin de déterminer la puissance intégrée d'un rayonnement.

VLE : valeur limite d'exposition.

Pour commander les films (en prêt), les brochures et les affiches de l'INRS, adressez-vous au service prévention de votre CARSAT, CRAM ou CGSS.

Services prévention des CARSAT et des CRAM

CRAM ALSACE-MOSELLE

(67 Bas-Rhin)
14 rue Adolphe-Seyboth
CS 10392
67010 Strasbourg cedex
tél. 03 88 14 33 00
fax 03 88 23 54 13
prevention.documentation
@cram-alsace-moselle.fr
www.cram-alsace-moselle.fr

(57 Moselle)
3 place du Roi-George
BP 31062
57036 Metz cedex 1
tél. 03 87 66 86 22
fax 03 87 55 98 65
www.cram-alsace-moselle.fr

(68 Haut-Rhin)
11 avenue De-Lattre-de-Tassigny
BP 70488, 68018 Colmar cedex
tél. 03 88 14 33 02
fax 03 89 21 62 21
www.cram-alsace-moselle.fr

CARSAT AQUITAINE

(24 Dordogne, 33 Gironde, 40 Landes,
47 Lot-et-Garonne, 64 Pyrénées-Atlantiques)
80 avenue de la Jallère
33053 Bordeaux cedex
tél. 05 56 11 64 36
fax 05 57 57 70 04
documentation.prevention
@carsat-aquitaine.fr
www.carsat-aquitaine.fr

CARSAT AUVERGNE

(03 Allier, 15 Cantal, 43 Haute-Loire,
63 Puy-de-Dôme)
48-50 boulevard Lafayette
63058 Clermont-Ferrand cedex 1
tél. 04 73 42 70 76
fax 04 73 42 70 15
preven.carsat@orange.fr
www.carsat-auvergne.fr

CARSAT BOURGOGNE et FRANCHE-COMTÉ

(21 Côte-d'Or, 25 Doubs, 39 Jura, 58 Nièvre,
70 Haute-Saône, 71 Saône-et-Loire,
89 Yonne, 90 Territoire de Belfort)
ZAE Cap-Nord
38 rue de Cracovie
21044 Dijon cedex
tél. 08 21 10 21 21
fax 03 80 70 52 89
prevention@carsat-bfc.fr
www.carsat-bfc.fr

CARSAT BRETAGNE

(22 Côtes-d'Armor, 29 Finistère,
35 Ille-et-Vilaine, 56 Morbihan)
236 rue de Châteaugiron
35030 Rennes cedex
tél. 02 99 26 74 63
fax 02 99 26 70 48
drpcdi@carsat-bretagne.fr
www.carsat-bretagne.fr

CARSAT CENTRE

(18 Cher, 28 Eure-et-Loir, 36 Indre,
37 Indre-et-Loire, 41 Loir-et-Cher, 45 Loiret)
36 rue Xaintrilles
45033 Orléans cedex 1
tél. 02 38 81 50 00
fax 02 38 79 70 29
prev@carsat-centre.fr
www.carsat-centre.fr

CARSAT CENTRE-OUEST

(16 Charente, 17 Charente-Maritime,
19 Corrèze, 23 Creuse, 79 Deux-Sèvres,
86 Vienne, 87 Haute-Vienne)
4 rue de la Reynie
87048 Limoges cedex
tél. 05 55 45 39 04
fax 05 55 45 71 45
cirp@carsat-centreouest.fr
www.carsat-centreouest.fr

CRAM ÎLE-DE-FRANCE

(75 Paris, 77 Seine-et-Marne, 78 Yvelines,
91 Essonne, 92 Hauts-de-Seine, 93 Seine-
Saint-Denis, 94 Val-de-Marne, 95 Val-d'Oise)
17-19 place de l'Argonne
75019 Paris
tél. 01 40 05 32 64
fax 01 40 05 38 84
prevention.atmp@cramif.cnams.fr
www.cramif.fr

CARSAT LANGUEDOC-ROUSSILLON

(11 Aude, 30 Gard, 34 Hérault,
48 Lozère, 66 Pyrénées-Orientales)
29 cours Gambetta
34068 Montpellier cedex 2
tél. 04 67 12 95 55
fax 04 67 12 95 56
prevdoc@carsat-lr.fr - www.carsat-lr.fr

CARSAT MIDI-PYRÉNÉES

(09 Ariège, 12 Aveyron, 31 Haute-Garonne,
32 Gers, 46 Lot, 65 Hautes-Pyrénées,
81 Tarn, 82 Tarn-et-Garonne)
2 rue Georges-Vivent
31065 Toulouse cedex 9
tél. 0820 904 231 (0,118 €/min)
fax 05 62 14 88 24
doc.prev@carsat-mp.fr - www.carsat-mp.fr

CARSAT NORD-EST

(08 Ardennes, 10 Aube, 51 Marne,
52 Haute-Marne, 54 Meurthe-et-Moselle,
55 Meuse, 88 Vosges)
81 à 85 rue de Metz
54073 Nancy cedex
tél. 03 83 34 49 02
fax 03 83 34 48 70
service.prevention@carsat-nordest.fr
www.carsat-nordest.fr

CARSAT NORD-PICARDIE

(02 Aisne, 59 Nord, 60 Oise,
62 Pas-de-Calais, 80 Somme)
11 allée Vauban
59662 Villeneuve-d'Ascq cedex
tél. 03 20 05 60 28
fax 03 20 05 79 30
bedprevention@carsat-nordpicardie.fr
www.carsat-nordpicardie.fr

CARSAT NORMANDIE

(14 Calvados, 27 Eure, 50 Manche,
61 Orne, 76 Seine-Maritime)
Avenue du Grand-Cours, 2022 X
76028 Rouen cedex
tél. 02 35 03 58 22
fax 02 35 03 60 76
prevention@carsat-normandie.fr
www.carsat-normandie.fr

CARSAT PAYS DE LA LOIRE

(44 Loire-Atlantique, 49 Maine-et-Loire,
53 Mayenne, 72 Sarthe, 85 Vendée)
2 place de Bretagne
44932 Nantes cedex 9
tél. 0821 100 110
fax 02 51 82 31 62
prevention@carsat-pl.fr - www.carsat-pl.fr

CARSAT RHÔNE-ALPES

(01 Ain, 07 Ardèche, 26 Drôme, 38 Isère, 42
Loire, 69 Rhône, 73 Savoie, 74 Haute-Savoie)
26 rue d'Aubigny
69436 Lyon cedex 3
tél. 04 72 91 96 96
fax 04 72 91 97 09
preventionrp@carsat-ra.fr - www.carsat-ra.fr

CARSAT SUD-EST

(04 Alpes-de-Haute-Provence,
05 Hautes-Alpes, 06 Alpes-Maritimes,
13 Bouches-du-Rhône, 2A Corse Sud,
28 Haute-Corse, 83 Var, 84 Vaucluse)
35 rue George
13386 Marseille cedex 5
tél. 04 91 85 85 36
fax 04 91 85 75 66
documentation.prevention@cram-sudest.fr
www.carsat-sudest.fr

Services prévention des CGSS

CGSS GUADELOUPE

Immeuble CGRR,
Rue Paul-Lacavé,
97110 Pointe-à-Pitre
tél. 05 90 21 46 00
fax 05 90 21 46 13
lina.palmont@cgss-guadeloupe.fr

CGSS GUYANE

Espace Turenne
Radamonthe, route
de Raban, BP 7015,
97307 Cayenne cedex
tél. 05 94 29 83 04
fax 05 94 29 83 01

CGSS LA RÉUNION

4 boulevard Doret,
97704 Saint-Denis
Messag cedex 9
tél. 02 62 90 47 00
fax 02 62 90 47 01
prevention@cgss-reunion.fr

CGSS MARTINIQUE

Quartier Place-d'Armes,
97210 Le Lamentin cedex 2
tél. 05 96 66 51 31
05 96 66 51 32
fax 05 96 51 81 54
prevention972@cgss-martinique.fr

Le bilan des effets physiques et biologiques des rayonnements électromagnétiques non ionisants ainsi que l'aspect médical de la question sont traités au regard de la situation actuelle de la recherche scientifique dans le domaine. Ce guide, initialement prévu à destination des médecins du travail, a été complété de nombreuses considérations techniques pour élargir son impact.

Les champs électriques et magnétiques statiques, les rayonnements d'extrêmement basses fréquences de la nature de ceux qui sont générés par les lignes de distribution de l'électricité et les ondes électromagnétiques de 10 kHz à 300 GHz développées par les générateurs de radiofréquences et d'hyperfréquences font l'objet d'un examen systématique incluant les principes de fonctionnement, les valeurs limites d'exposition admises dans la plupart des pays industrialisés et de considérations propres à aider le médecin du travail pour le suivi médical des salariés exposés et favoriser sa mission de prévention.

Ce guide, assorti de deux lexiques, l'un médical et l'autre technique, ainsi que de nombreuses données bibliographiques, est illustré par une application particulière relevant de l'usage récent de la résonance magnétique nucléaire (RMN). Il constitue ainsi la synthèse actualisée de données pratiques dans un secteur qui préoccupe de plus en plus la population et, plus particulièrement, les salariés.



Institut national de recherche et de sécurité
pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
30, rue Olivier-Noyer 75680 Paris cedex 14 • Tél. 01 40 44 30 00
Fax 01 40 44 30 99 • Internet : www.inrs.fr • e-mail : info@inrs.fr

Édition INRS ED 785

1^{re} édition (1995) • réimpression novembre 2010 • 1 000 ex. • ISBN 978-2-7389-1862-8