

# Champs électriques Champs magnétiques Ondes électromagnétiques

Guide à l'usage du médecin du travail  
et du préventeur

7



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 SECURITE  
30 rue Olivier-Noyer 75680 Paris cedex 14  
Edition INRS ED 785  
1ère édition . août 1995 . 10 000 ex. ISBN 2-7389-0368-1

Il co  
que  
- le  
- le  
- le  
- le  
Le :  
sité  
= 1  
En  
est  
mer  
triel  
un

**4**

4.2  
C'e  
la  
rac  
Le  
d'e

4.  
Eil  
ch  
im  
m  
Pe  
vé  
O

4.

## 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* (Hautres 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.

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

On a constaté, avec des OEM de basses fréquences, d'importantes modifications dans le transport du  $\text{Ca}^{++}$  qui sont explicitées au chapitre ELF. Au contraire, les hyperfréquences ont peu d'activité sur les variations des flux de  $\text{Ca}^{++}$  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  $\text{Ca}^{++}$  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- $\text{Ca}^{++}$  sous l'action du champ électromagnétique qui induirait une variation du  $\text{Ca}^{++}$  libre intracellulaire et donc de la conductance de la membrane.

L'ion  $\text{Ca}^{++}$  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

A 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

• A

On  
dét  
de

4.4

• A

• A

Ch  
ce  
les  
po  
co  
lité  
de  
co  
so  
pa  
no  
cro  
on  
tar  
se

4.

• /

Pc  
de  
va  
de  
bl  
at  
l'a  
le

• ,

D  
cc

#### 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  $DAS \leq 20 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 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

On  
cép

• A

Pou  
l'ac

• De

L'El  
faib  
rab  
ano  
mic  
les  
La c  
sou

D'at  
ond  
l'act  
phir

On  
teur  
mine  
aux  
aug  
sou

Cert  
lité  
conc  
fréq  
sant  
Les

• A S

A de  
corp  
perm  
bleu

• A 2

Plusi  
utilis  
men  
céré  
men  
la ca  
elle  
conc

i-  
e  
a-  
s-  
n  
u

---

• **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  $\text{Na}^+$  dépendants).

• **De 2 450 MHz à 3 000 MHz**

3-  
nt  
s  
a-  
s-  
jit  
t.

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).

ii-  
e,  
a-  
é-

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.

s  
à  
a-

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.

il  
s  
ie

• **A 915 MHz**

à  
s,  
o-  
le  
é

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**

al  
es  
le

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  
tème  
vienn

• Acti  
Il en  
tique  
ceptil  
anima

4.4.1.

• A 2

Des é  
tation  
des c  
de ce  
catéc  
quelq  
rue di

4.4.1.

• A 91

En te  
argun  
ondes

4.4.1.

Divers  
l'effet  
aux n  
L'acti  
semai  
vant l  
phénc

4.4.1.:

L'ense  
densit

- le
- il
- pl
- nc
- ré
- pé

Ainsi  
dans

n'est pas possible actuellement de décrire une réponse cohérente du système immunitaire aux OEM. En particulier, il semble que l'effet fenêtré intervienne, 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 « fenêtré » 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.

Enfi  
puis  
sen  
ser

### • Ac

Ce  
che  
éme

-

-

-

-

-

-

-

-

L'ex  
une  
ou à  
L'en  
décl  
l'app  
cile  
une  
mer

### • Act

Il réa  
mée

Cepe  
ment  
asse  
et les

Il n'e  
raiss  
comp

### • Act

Elle  
conn  
lable

#### 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  $\mu$ 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).

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.

Cor  
trou  
sée  
évic  
Cep  
qu'  
un  
dor  
l'att  
ter  
ou  
dan  
effe  
tabl  
ciat

4.6.

L'in  
actu  
con  
utili  
Dan  
pers  
une  
tecti  
voire  
En c  
dan  
l'acc  
men  
Le p  
juge  
(cf.  
à la  
tion  
impl  
Il se  
de s  
afin  
il n'y  
est  
gène  
appi

#### 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'écartier 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., Gavalas-Medici R.J. and Adey W.R. – Effects of modulated very high frequency fields on specific brain rythms 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<sup>e</sup> Symposium International sur les applications énergétiques des micro-ondes, Monaco 1979 - in proc., p. 29-34.
- Bertharion G., Servantie B. – Electrocorticographic 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. Airlie - 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 frequency range 300 kHz to 300 GHz », protection against microwave radiation. Pergamon p.
- Dyachenko M – The effect of microwave radiation on the function of the brain. *Gig. Tr Pro* 1970, p. 51-55.
- Gagny C. – Les effets des champs électromagnétiques à haute fréquence sur les auteurs cardiaques. *INRS, DMT (Documentaire)*
- Geraut Ch., Dupas D. – Les effets des champs électromagnétiques à haute fréquence liés à l'utilisation des micro-ondes. *Revue des Travaux Nationaux de l'INRS*
- « Guide pour la détermination des limites d'exposition humaine aux champs électromagnétiques à haute fréquence comprises entre 300 kHz et 300 GHz ». *INF documentaire*
- Guy A.W. – Health hazards of microwave radiation. Warsaw Publishers, 1973.
- Guy A.W. – Microwave absorption and health hazards. *Lectures séminaires* 1973.
- Hée G., Baeyens W. – « Valeurs limites de l'ambiance de travail à haute fréquence de 1886, 1992.
- Hée G., Métais J. – « Ondes centimétriques - radar - risque de cancer ». *DMT*, 47 TD
- Hée G. – « Les effets des courants électromagnétiques à haute fréquence sur la santé humaine ». *International symposium I'AISS. INRS*
- IEEE standard for safety with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields in the frequency range 300 kHz to 300 GHz. *C95.1-1991* (1992), avril 1992.
- ILO. – « Occupational exposure to non-ionizing electromagnetic fields in the frequency range 300 kHz to 300 GHz ». *International Commission on Radiological Protection (ICRP)*

- 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<sup>es</sup> 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<sup>e</sup> 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 radiation », 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.
- Lefeuvre S. - Ondes électromagnétiques. Définitions, propriétés, utilisation générale, XIV<sup>e</sup> 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., Loubière 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<sup>e</sup> Aerospace 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 I*, 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., Obrenovotich, 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 effects of M cytes cultur health haz WHO inte Warsaw - 19
- Szmigielski (3GHz) ele (MW) on Ann. NY Ac 1975.
- Vautrin J.P. – « Le rayo tique radiofre risques ». I documentai

positive spleen  
etics I, 1980,

of microwave  
urvey of basic  
z. radiation -

I G.M. - The  
netic energy  
mer. J. Phys.  
14, 1954.

I G.M. - The  
netic energy  
mer. J. Phys.  
8, 1955.

cal properties  
Advan. Biol.  
47-209, 1957.

J., Servan-  
Bertharion G.,  
., Plurien G.  
the action of  
ehavior of the  
I ann. meet.

udnev M.I.,  
Belonozhko,  
munological  
exposure.  
et. Seattle -

curité et de  
vail », INRS,  
entaires, 153

J.B., and  
xposure of  
microwave  
uation of  
nological  
r, 15, 45

man E.,  
le C.G.,  
Chronic  
(CW)  
ssess-  
adiat.

J.B.  
ts to  
dia-  
es.  
(2).

Stodolnich-Baranska W. - The  
effects of MW on the human lympho-  
cytes 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 électromagné-  
tique 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 opa-  
cities by 12.3 cm microwaves,  
2 p. refs repr. from Amer. Med. Ass.  
Arch Ophtalmo.v. 54., 1955, p. 863-  
874.

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