

**MECANISMES D'INTERACTION DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES
AVEC LES SYSTEMES BIOLOGIQUES**

Dr R. de Sèze- INERIS, Parc ALATA - BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte - France

I. SOMMAIRE

DR R. DE SEZE - INERIS, PARC ALATA - BP 2 - 60550 VERNEUIL-EN-HALATTE - FRANCE	1
I. INTRODUCTION	4
II. NIVEAUX D'ENERGIE	5
III. CHAMPS ELECTRIQUES STATIQUES	6
III.A. EFFET SUR LES IONS.....	7
III.B. EFFET SUR LA MEMBRANE AMPLIFICATION TRANSMEMBRANAIRE PAR POLARISATION INTERFACIALE	7
IV. CHAMPS MAGNETIQUES STATIQUES.....	8
IV.A. EFFETS MAGNETO-MECANIQUES.....	8
IV.B. EFFETS SUR LES IONS : FORCE DE LORENTZ	10
IV.C. INTERACTIONS ELECTRONIQUES	11
V. CHAMPS ELECTRIQUES ELF : COURANTS INDUITS.....	11
VI. CHAMPS MAGNETIQUES ELF.....	11
VI.A. MECANISME D'INTERACTION : COURANTS INDUITS	11
VI.B. EXEMPLES D'EFFETS BIOLOGIQUES EXPLIQUES PAR LES COURANTS INDUITS	13
VI.C. DANGER LIE AUX COURANTS INDUITS	13
VI.D. EFFETS BIOLOGIQUES NON EXPLIQUES PAR LES COURANTS INDUITS	13
VII. CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES RF	16
VII.A. MECANISME D'INTERACTION : ABSORPTION DIELECTRIQUE	17
VII.B. DANGER LIE A L'ABSORPTION DIELECTRIQUE : BRULURE PAR SUREXPOSITION	19
VII.C. EFFETS INDIRECTS : COURANTS INDUITS PAR L'INTERMEDIAIRE D'UNE MASSE METALLIQUE EXPOSEE A UN CHAMP ELECTRIQUE	20
VII.D. EFFETS BIOLOGIQUES DES CHAMPS RF NON EXPLIQUES PAR LES MECANISMES CLASSIQUES	20
VIII. CONCLUSION	21
IX. BIBLIOGRAPHIE	21
X. GLOSSAIRE.....	24

II. INTRODUCTION

Les champs électromagnétiques sont de plus en plus fréquemment utilisés dans notre environnement. De nombreux articles scientifiques décrivent des effets biologiques pouvant laisser craindre un risque pour la santé humaine de l'exposition aux champs électromagnétiques. La première des quatre étapes proposées par l'Académie des Sciences des Etats-Unis en 1983 pour la démarche d'évaluation du risque est l'identification du potentiel dangereux [Bard, 1995]. Pour qu'un tel danger lié aux champs électromagnétiques existe, encore faut-il que les effets décrits soient réels et effectivement liés à l'exposition. Or la majorité de ces études sont difficilement ou non reproductibles, et il n'existe le plus souvent pas de mécanisme identifié qui permette de comprendre comment les effets pourraient être liés aux champs d'exposition utilisés. Nous nous proposons dans cet exposé de faire le point sur les mécanismes connus et hypothétiques d'interaction entre les champs électromagnétiques et les systèmes biologiques afin de mieux appréhender le niveau de compréhension que nous pouvons avoir des effets biologiques attribués aux champs et de l'éventuel danger qu'ils représentent. Il faut différencier les mécanismes biophysiques primaires d'interaction des champs électromagnétiques avec des molécules cibles qui pourraient être à l'origine des effets observés et les mécanismes biologiques secondaires évoqués pour comprendre la chaîne de réactions qui pourrait éventuellement expliquer l'effet final observé. Cet exposé abordera uniquement les mécanismes d'interaction primaires qui ne permettent pas à ce jour d'expliquer ou de comprendre un danger éventuel de champs de faible intensité, notamment d'intensité inférieure aux valeurs limites recommandées dans les normes. Les effets biologiques et les mécanismes considérés ici concernent toutes les gammes de fréquence, en séparant schématiquement les champs électriques et magnétiques statiques, les champs électriques et magnétiques d'extrêmement basses fréquences ou EBF (équivalent du terme anglo-saxon ELF), et en englobant car ils procèdent d'un mécanisme unique d'interaction les rayonnements radioélectromagnétiques dits radiofréquences, et les rayonnements micro-ondes, encore appelés hyperfréquences ou plus communément radars.

Les rayonnements électromagnétiques qui font intervenir des mécanismes d'interaction quantiques ont été largement étudiés et ne font pas l'objet de cet exposé. Ce sont les rayonnements X et γ à l'origine d'ionisations moléculaires et de radicaux libres, les rayonnements ultra-violets, visibles et infra-rouges dont certains sont utilisés dans les lasers, et qui peuvent modifier les niveaux d'énergie de vibration et de rotation de petites molécules. Une partie importante des préoccupations de santé liées à une exposition électromagnétique

concerne les interactions sur les implants actifs tels que les stimulateurs cardiaques. Cette situation constitue un problème de compatibilité électromagnétique, compliqué par l'environnement biologique que constitue le corps du patient [Gagny, 1994]. Elle ne fera pas non plus l'objet de ce rapport.

Les effets produits par l'application directe de courants par l'intermédiaire d'électrodes font l'objet de mécanismes différents et ne sont pas considérés dans cette étude.

Dans la mesure du possible, les forces et les énergies mises en jeu dans ces mécanismes seront quantifiées pour évaluer leur impact éventuel sur les processus biologiques. Quelques exemples d'effets faisant intervenir les mécanismes classiques d'interaction, qui sont à la base des niveaux de référence recommandés par les organismes de normalisation, seront cités. Des effets biologiques faisant l'objet d'un ensemble cohérent de travaux scientifiques, mais non expliqués par les mécanismes classiques, seront également signalés. En particulier, certains effets biologiques ont été décrits avec des émissions pulsées qui laissent supposer des effets sans échauffement dits athermiques, généralement non linéaires et présentant parfois l'effet appelé « effet fenêtre ». Les effets observés laissent supposer une démodulation du signal radiofréquence par les tissus vivants. Des hypothèses de mécanismes théoriques élaborées pour tenter d'expliquer ces effets seront présentées.

III. NIVEAUX D'ÉNERGIE

Du point de vue quantique, les niveaux d'énergie de vibration et de rotation des petites molécules sont trop élevés pour être perturbés par des photons micro-ondes (Tableau 1) ; les niveaux associés à des grosses molécules, comme les molécules biologiques, sont élargis et s'interpénètrent trop pour envisager des phénomènes efficaces de transfert quantique d'énergie. Pour comparaison, si l'on considère que le corps est en majorité composé d'eau, d'un poids molaire de 18 g, une énergie de 1 kcal/mole serait apportée par une exposition à un débit d'absorption spécifique (DAS) de 4 W/kg pendant 1 heure.

	kcal/mol	e- V	f (GHz)	λ (μm)
Interaction Van der Waals	0,05 à 0,5	0,01	$2,4 \times 10^3$	125
Mouvement brownien à 30°C	0,6	0,026	$6,3 \times 10^3$	47,6
Liaison hydrogène	0,5 à 5	0,1	$2,4 \times 10^4$	12,5
Rotation protéine polaire	1 à 10	0,2	5×10^4	6
Changement de conformation réversible	10	0,4	1×10^5	3
Décrochage eau liée	15	0,65	$1,6 \times 10^5$	1,9
Liaison covalente	50 à 150	4	1×10^6	0,33
Potentiel d'ionisation	230	10	$2,4 \times 10^6$	0,125

Tableau 1. Ordre de grandeur des énergies mises en jeu dans les liaisons intra et inter-moléculaires. Fréquences correspondantes du point de vue d'une interaction quantique

De nombreux mécanismes d'interaction existent entre les champs électriques et magnétiques avec la matière vivante, différents en fonction de la gamme de fréquence considérée. Bien qu'il puisse y avoir recoupement partiel, nous classerons par commodité les mécanismes en fonction de la gamme où ils prédominent : champs statiques, champs d'extrêmement basse fréquence (ELF) et champs radioélectromagnétiques ou radiofréquences (RF).

IV. CHAMPS ELECTRIQUES STATIQUES

L'organisme vivant est composé de tissus faiblement conducteurs à l'intérieur d'une enveloppe relativement isolante : la peau. A l'échelle macroscopique, si σ_0 et σ_{int} sont respectivement la conductivité de l'air et du milieu vivant, la relation entre le champ externe E_{ext} et le champ E_{int} produit dans les tissus est :

$$\text{Erreur !} = \text{Erreur !} \quad (1),$$

avec $\sigma_0 = 10^{-13}$ S/m, $\epsilon_0 = 10^{-11}$ F/m, $\sigma_{int} = 10^{-1}$ S/m et $\epsilon_{int} = 10^{-5}$ F/m, à très basse fréquence, cette équation devient :

$$E_{int} = \text{Erreur !} E_{ext} \quad (2)$$

En champ statique, l'intensité est ainsi divisée par 10^{12} au passage à l'intérieur de

l'organisme vivant [Polk, 1987].

IV.A. Effet sur les ions

Un champ électrique appliqué sur un milieu biologique peut exercer des forces :

- sur la charge q d'un ion : $\vec{F} = q \vec{E}_{int}$, où E_{int} est la valeur du champ à l'intérieur des tissus
- sur une particule neutre polarisable $\vec{F} = P \text{ grad } E_{int}$, où P est la polarisabilité de la molécule

L'effet du champ électrique sur les charges libres dans les fluides tissulaires se traduit par la formation de courants, de densité :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \text{ avec } \sigma = \sum_i q_i \mu_i C_i ;$$

Pour les principaux ions biologiques (Na, K, Ca, Mg, Cl), la mobilité est de l'ordre de $5 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Pour des concentrations de l'ordre de 150 mM/l, la conductivité en présence d'un champ constant est donc environ 0,7 S/m. Un champ de 1mV/m dans les tissus produira donc un courant de 0,7 mA/m².

C'est ainsi que 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.

IV.B. Effet sur la membrane

Amplification transmembranaire par polarisation interfaciale

Il existe un potentiel transmembranaire $\Delta\phi$ de l'ordre de 100 mV, pour une épaisseur de membrane de 10 nm. Le champ transmembranaire résultant est de 10^7 V/m . Les champs

extérieurs et a fortiori les champs internes appliqués sont très inférieurs à E_{tm} , mais il existe une amplification au niveau de la membrane par le phénomène de polarisation interfaciale (Figure 1) :

IV.B.1. En absence de champ transmembranaire

Un champ appliqué de 100 V/cm appliqué sur une cellule de 10 μm de diamètre et en l'absence de différence de potentiel (ddp) transmembranaire, comme dans une micelle lipidique par exemple, produit à travers la cellule une ddp de 0,1 V ; la membrane étant isolante et l'intérieur de la cellule étant équipotentielle à un potentiel nul, le champ transmembranaire est dans ces conditions de : $0,05 \text{ V} / 10 \text{ nm} = 5 \times 10^6 \text{ V/m}$ côté positif, - 5

$\times 10^6$ V/m côté négatif.

IV.B.2. Avec champ transmembranaire

Avec un champ appliqué de 100 V/cm et une ddp transmembranaire de 10^7 V/m :

- du côté positif, les champs s'additionnent : $1,5 \times 10^7$ V/m
- du côté négatif, la résultante est égale à la différence : $0,5 \times 10^7$ V/m

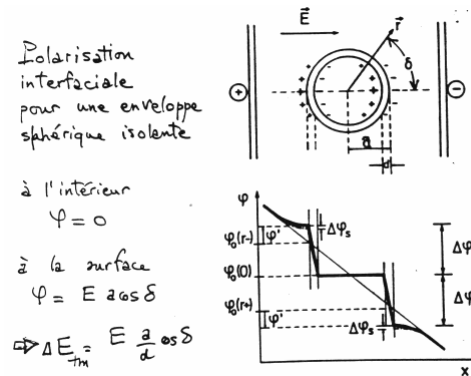


Figure 1 Polarisation interfaciale

V. CHAMPS MAGNETIQUES 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 : la force de Lorentz, les effets magnéto-mécaniques et les interactions électroniques.

V.A. Effets magnéto-mécaniques

V.A.1. Magnéto-orientation

Dans un champ magnétique statique, les assemblages moléculaires dia- ou para-magnétiques, à haut niveau d'anisotropie magnétique, subissent un couple qui les fait tourner jusqu'à ce qu'ils atteignent un niveau d'énergie minimal. Ainsi des modifications de la structure des enzymes ont été évoquées avec un retentissement sur les vitesses de réactions métaboliques ; 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 (telles le segment externe des bâtonnets rétinien, 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.

L'orientation de certaines molécules comme les phospholipides [Boroske, 1978] ou la rhodopsine [Chalazonitis, 1970 ; Chagneux et al., 1977 ; Chabre, 1986] en présence d'un champ magnétique intense (supérieur à 100 mT), évoque la possibilité d'une modification de la fluidité membranaire. La fluidité membranaire peut être mesurée par cytométrie de flux, mais il est difficile de mettre au point un système qui permette l'analyse des cellules, sans que le champ magnétique ne perturbe fortement le cytomètre.

Une deuxième méthode paraît plus compatible avec l'étude des champs : c'est l'utilisation de marqueurs dont la fluorescence varie en fonction de la fluidité membranaire. Un phospholipide fluorescent est inséré dans la membrane cellulaire. Un faisceau de lumière vive excite la fluorescence d'une zone focalisée qui re-émet un signal d'intensité proportionnelle à la fluidité. Cette méthode peut être mise en jeu pour étudier un effet éventuel du champ magnétique sur la fluidité membranaire.

Commentaire : Cf. VIRIOT

Certaines espèces ont cependant la faculté de synthétiser de la magnétite, telle la bactérie marine anaérobie *Aquaspirillum magnetotacticum*, qui lui confère la propriété de s'orienter dans le sens du champ magnétique terrestre [Blakemore, 1975]. Le moment magnétique dipolaire qui s'applique sur la chaîne de cristaux d'une bactérie est de $2 \times 10^{-16} \text{ A.m}^2$; soumise à un champ de 50 μT , l'énergie magnétique du système est alors de 10^{-20} J . Cette énergie est plusieurs fois supérieure à l'énergie d'agitation thermique kT ($4 \times 10^{-21} \text{ J}$), ce qui explique qu'elle puisse intervenir dans le mécanisme d'orientation. Une fois orientée, le mouvement spontané de la bactérie la dirige vers le fond sédimentaire où elle trouve des nutriments et un milieu propice à son développement. Si une telle bactérie est transférée dans l'hémisphère opposé à son hémisphère d'origine, la composante verticale du champ magnétique ayant un sens opposé dans les deux hémisphères, elles se dirigent vers la surface et meurt, car l'oxygène est toxique pour cet organisme anaérobie. Cet exemple est intéressant pour montrer qu'il existe dans la nature des systèmes biologiques pour lesquels des champs magnétiques aussi faibles que le champ terrestre sont importants et même vitaux. Mais ces organismes possèdent pour cela des récepteurs spécifiques et répondent à un mécanisme bien compris.

Un tel effet ne permet par contre pas d'expliquer l'influence du champ magnétique sur l'orientation des pigeons ou des abeilles, bien que des cristaux de magnétite aient également été décrits dans ces espèces.

V.A.2. Magnéto-translation

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.

$$F = m \, dB/dx \text{ avec } m = \chi_m H \quad (\mu_r = 1 + \chi_m)$$

$\chi > 0$ para, $\chi \gg 0$ ferro, $\chi < 0$ dia

Les forces mises en jeu sont à l'origine d'accidents, soit en transformant des objets métalliques proches en projectiles, soit en provoquant des gestes accidentels chez les ouvriers en train d'utiliser des outils métalliques. Ce phénomène peut également agir sur des chaussures de protection thermiques métalliques, et entraîner par l'attraction qu'il provoque une fatigue musculaire excessive.

Commentaire : continuer
index

V.B. Effets sur les ions : force de Lorentz

Une charge électrique en mouvement dans un champ magnétique subit une force qui dévie sa trajectoire selon une courbe, selon la formule bien connue $F = q.v.B.\sin\theta$. A l'échelle d'un ion se déplaçant dans l'organisme à des vitesses de l'ordre de quelques centimètres par secondes (flux sanguin : 20 cm/s), la force exercée par un champ magnétique perpendiculaire à son mouvement est de 3×10^{-21} N. L'énergie transférée sur une distance de 5 cm serait de $1,6 \times 10^{-22}$ J. En comparaison, l'énergie liée à l'agitation thermique d'un ion est de $4,3 \times 10^{-21}$ J, soit environ 30 fois plus importante, et la force à laquelle est soumis un ion à travers une membrane est de $1,6 \times 10^{-12}$ N, soit 5×10^8 fois la force de Lorentz. Les ions peuvent donc effectivement être soumis à ce type de force, mais à l'échelle de temps et des distances dans les organismes biologiques, et avec les intensités de champs considérés, il est difficilement envisageable que ce phénomène puisse avoir une grande efficacité ; tout au plus concevrait-on que cette interaction ralentisse les mouvements spontanés des ions, et donc diminue leur diffusion ou leur perméabilité à travers les membranes (perturbations du trajet dans les canaux). Sur le plan physiologique, cette interaction est extrêmement faible pour les champs magnétiques auxquels l'homme peut être soumis.

Au niveau de la crosse aortique où la vitesse de circulation est de 60 cm/s, une différence de potentiel (ddp) est ainsi créée dans le sang qui peut atteindre 15 mV pour un champ magnétique de 1 tesla. Cet effet, connu en physique sous le nom d'effet Hall, explique une augmentation apparente de l'onde T de l'ECG à laquelle ce potentiel se superpose chez des petits mammifères exposés à des champs magnétiques de 1,5 T.

V.C. Interactions électroniques

En photochimie : lorsqu'une molécule est dans un état excité, elle peut revenir à l'état fondamental directement ou en passant par un état triplet. En présence d'un champ magnétique, la très faible différence d'énergie entre les deux niveaux singulets dédoublés par effet Zeeman peut suffire à modifier considérablement la probabilité de transition vers l'état triplet. La recombinaison de radicaux dans leur cage de solvant peut également être affectée par un champ magnétique.

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 dans la structure hyperfine de certaines molécules et par conséquent de la vitesse de réaction chimique correspondante. Il est concevable qu'à l'échelle d'une molécule biologique ce type de phénomène puisse perturber une réaction enzymatique ou la fonction d'une protéine (réceptrice, ...). 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.

Il n'a pas été identifié si l'un des mécanismes décrits précédemment permet d'expliquer les effets observés de champs magnétiques constants, d'intensité identique à celle du champ terrestre, sur l'activité de la glande pinéale ou épiphyse.

VI. CHAMPS ELECTRIQUES ELF : COURANTS INDUITS

Pour calculer les champs à l'intérieur des tissus, la formule (2) vue précédemment s'applique également à des champs électriques de basse fréquence. A 50 Hz, le champ interne est ainsi égal à 10^{-8} fois le champ externe ; ainsi, un champ de 10 kV/m, qui peut se rencontrer sous une ligne à très haute tension ou dans quelques situations industrielles, produit à l'intérieur de l'organisme vivant un champ de l'ordre de 0,1 mV/m. Avec une conductivité autour de 0,2 S/m, La densité de courant j ainsi produite, de 0,02 mA/m², reste nettement inférieure à la valeur recommandée pour les travailleurs, de 10 mA/m².

VII. CHAMPS MAGNETIQUES ELF

VII.A. Mécanisme d'interaction : courants induits

Un champ magnétique variable $B(t)$ induit un champ électrique $E(t)$ à l'intérieur de l'organisme. Ces champs induits pénètrent plus profondément et sont plus homogènes que ceux que l'on peut engendrer directement avec un champ électrique externe. Le champ électrique induit est dans un plan perpendiculaire à la direction du champ magnétique

appliqué et suit un trajet circulaire autour de son axe (Figure 2). Son intensité est proportionnelle au rayon du trajet qu'il parcourt. Il engendre à son tour des courants appelés « courants de Foucault » dans les tissus conducteurs de l'organisme. La densité de courant induit correspondante j s'exprime en ampères par mètre carré ($A.m^{-2}$).

Commentaire : PAGE: 12 courants de Faraday?

$E(t) = - \text{Erreur !} , = - \text{Erreur !} \omega B_0$ si $B(t) = B_0 \sin \omega t$ avec : $S = \pi r^2$, $l = 2\pi r$ et $\omega = 2\pi f$

Au total, $j = \sigma E = \sigma \cdot \pi r^2 \cdot 2\pi f \cdot B / 2\pi r = \sigma \cdot \pi \cdot f \cdot r \cdot B$; cette formule est la fonction de transfert utilisée par l'ICNIRP (Commission internationale de radioprotection des rayonnements non ionisants) pour établir les niveaux de référence du champ magnétique afin de ne pas dépasser la restriction de base en densité de courant.



Figure 2. Champ électrique et courants induits dans un milieu conducteur par un champ magnétique

A l'échelle microscopique, les milieux biologiques sont constitués de cellules entourées de membranes et de liquide extracellulaire. Les membranes phospholipidiques constituent un isolant vis à vis du champ électrique externe, d'autant plus que la fréquence est basse. La membrane a une grande capacité ($1 \mu F/cm^2$) et une faible conductivité ($10^{-8} S/m$).

Le circuit équivalent pour une cellule vivante peut être représenté de la façon suivante (Figure 3) :

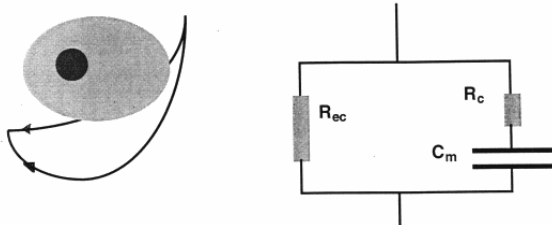
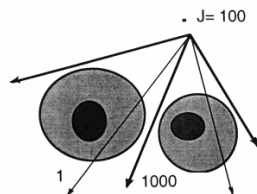


Figure 3. Représentation électrique de la cellule

A basse fréquence, le courant est donc principalement extra-cellulaire (Figure 4)



Figure

Figure 4. Répartition des courants dans un tissu

La nature diélectrique des membranes explique que les courants induits soient principalement extra-cellulaires. Ils peuvent perturber la composition ionique ou aqueuse de la surface des membranes et avoir une répercussion sur le fonctionnement de la cellule.

VII.B. Exemples d'effets biologiques expliqués par les courants induits

Ce mécanisme est concrètement utilisé en médecine dans la magnéto-neurostimulation : cette technique consiste à appliquer un gradient très rapide dB/dt d'un champ magnétique intense : 2 T en 200 μs , c'est-à-dire 10^4 T/s. Dans les tissus, le courant induit permet de dépolariser des nerfs et de déclencher un potentiel d'action, utilisé en diagnostic pour mesurer la conduction nerveuse et en thérapie pour stimuler la contraction musculaire. Le courant induit calculé dans cette application est de 30 A/m². Cet effet permettrait également d'expliquer les magnétophosphènes (perception lumineuse sous exposition à un champ magnétique alternatif).

VII.C. Danger lié aux courants induits

Si des courants induits pouvaient atteindre une valeur de 1000 mA/m² au niveau du thorax, ils pourraient provoquer une fibrillation cardiaque. Entre 100 et 1000 mA/m², ils pourraient déclencher une stimulation nerveuse. En dessous de 100 mA/m², il n'a jamais été observé de phénomène nocif irréversible. L'application d'un facteur 10 de sécurité a conduit à établir comme restriction de base 10 mA/m² pour les courants induits.

VII.D. Effets biologiques non expliqués par les courants induits

Les effets éventuels parfois décrits sur la synthèse de mélatonine, l'accroissement du nombre de tumeurs induites, l'augmentation du nombre d'embryons de poulet malformés, l'incidence augmentée de leucémie de l'enfant dans des études épidémiologiques, ne sont pas expliqués par ce mécanisme.

VII.D.1. La résonance cyclotron

Blackman et al. [1985a et b] ont montré que la superposition de 2 champs magnétiques ELF pouvait modifier in vitro l'efflux des ions calcium hors des tissus de cerveau d'embryon de poulet. Les caractéristiques de ces champs sont : un champ statique B_{DC} qui est le plus souvent le champ magnétique terrestre d'intensité 38 μT , et un champ oscillant à la fréquence ν appelé B_{AC} . Pour le champ ELF parallèle à B_{DC} , B_{AC} est égal à 10 nT et ν peut varier de 1 à 120 Hz. La quantité d'ions $^{45}Ca^{2+}$ relâchée dans le milieu par les cellules cérébrales est supérieure dans le tube exposé par rapport au témoin pour des valeurs

définies de la fréquence ν , telles que : $\nu = q B_{DC}/2\pi m$, où q et m sont respectivement la charge et la masse de l'ion considéré, et B_{DC} l'intensité du champ constant. Cet effet est celui utilisé dans les accélérateurs cyclotron, et une fréquence obéissant à cette relation est appelée : « fréquence cyclotron ». Un effet similaire a été observé avec d'autres ions, comme le potassium (K^+) ou le Lithium (Li^+). Les diatomées sont des algues unicellulaires dont la mobilité est conditionnée par la concentration extracellulaire en ions calcium. Plusieurs auteurs ont également montré que la mobilité des diatomées était modifiée lors de l'exposition à des champs magnétiques à la fréquence cyclotron.

Le mécanisme sous-jacent à cet effet n'a pas été explicité de façon satisfaisante, malgré plusieurs théories successives ; la cible biologique primaire du champ qui pourrait servir de récepteur n'a pas non plus été identifiée.

VII.D.2. Les faiblesses du modèle classique de résonance cyclotron

Les expériences réalisées sur les systèmes biologiques impliquant l'ion calcium font apparaître une fréquence de réponse qui coïncide avec la fréquence cyclotronique de l'ion Ca^{++} dans un champ magnétique constant B_{DC} , dans le vide. Ce résultat a donc orienté l'interprétation des mouvements des ions vers une théorie s'inspirant du mouvement des ions dans la théorie du cyclotron.

L'image la plus simple consiste à considérer une particule chargée, et la façon dont elle réagit à la présence de 2 champs, B_{DC} que nous supposons colinéaire à l'axe Oz, et B_{AC} .

Il en résulte que, dans le vide, la force d'origine magnétique subie par une particule de charge q et de vitesse v dans une induction magnétique B s'écrit :

$$\vec{F} = q.(\vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (1)$$

Dans le vide, cet ion libre adopte une trajectoire hélicoïdale. La projection de ce mouvement dans un plan perpendiculaire aux lignes de champ est un mouvement circulaire uniforme dont la fréquence ν est donnée par la relation :

$$\nu = \frac{q}{2\pi m} B \quad (2)$$

Par exemple pour un ion Ca^{2+} , tel que $q/m = 4,29.10^6$ Cb/kg et $B = 1$ mT, on obtient $\nu = 682$ Hz et pour une énergie de l'ordre de kT à $T = 300^\circ K$, le rayon de son orbite est d'environ 0,21 m. Ce rayon étant très grand devant les distances cellulaires, il paraît difficile d'envisager que ce mécanisme permette d'expliquer un effet biologique à cette échelle.

Les résultats de Blackman [1985a et b] semblent vérifier une relation de la forme $\nu = (2n+1).k.B$, qui présente des similitudes avec l'expression (2) ; de plus la valeur de la fréquence obtenue pour $n = 0$ correspond à la fréquence cyclotronique de Ca^{2+} . Il ne faut en outre pas perdre de vue que la fréquence cyclotron est donnée pour un ion libre isolé, ce qui n'est pas le cas dans les systèmes vivants. Si l'on considère dans un système vivant la particule chargée soumise d'une part à un champ statique représenté par le champ terrestre

(de l'ordre de $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ T}$), et d'autre part un champ oscillant, il faut au moins tenir compte de la viscosité du milieu. Le bilan des forces s'exerçant sur cet ion peut alors s'écrire de la manière suivante :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot (\vec{v} \wedge \vec{B}) - \text{Erreur ! (3)}$$

Le premier terme représente le champ électrique induit par B, le deuxième représente la force de Lorentz, et le troisième est un terme de frottement. Ce type de modélisation a été proposé par McLeod et Liboff [1987], ainsi que par Chiabrera [1991] avec un formalisme légèrement différent en partie du au fait qu'ils ne l'appliquent pas au même système biologique.

Selon Liboff et McLeod [1988], le champ oscillant amènerait une modification de la conductivité ionique à travers la membrane cellulaire pour une fréquence du champ B_{AC} égale à la fréquence cyclotron. Une telle résonance pourrait modifier le mouvement des ions dans les canaux calciques. Pour Chiabrera, le champ oscillant pourrait aussi modifier les constantes d'association et de dissociation de l'ion calcium avec la calmoduline.

Mais appliquer des modèles de ce type au mouvement des ions pose de nombreux problèmes liés à la faiblesse des énergies mises en jeu dans des champs si faibles. Un des principaux problèmes est dû à la viscosité du milieu. Chiabrera précise même que dans le cas de l'ion calcium dans la calmoduline, si l'on utilise la valeur de la viscosité du milieu intracellulaire pour une application numérique, il faudrait alors appliquer une induction de l'ordre de 10^7 T pour que l'effet de la viscosité devienne négligeable. Pour s'affranchir de ce problème ces auteurs font appel à des hypothèses artificielles qui ne semblent actuellement pas justifiables.

VII.D.3. Autres modèles proposés, quantiques

Certains auteurs ont suggéré que les effets observés au niveau macroscopique pourraient être mieux expliqués par des phénomènes quantiques. Par le biais de telles descriptions, ils espéraient aussi s'affranchir des problèmes d'ordre de grandeur des effets électromagnétiques calculés par rapport au bruit thermique. Lednev [1991] a été l'un des premiers à adopter un tel point de vue. Il s'appuie sur les observations expérimentales obtenues pour des systèmes biologiques placés dans des champs magnétiques de la forme : $B = B_{dc} + B_{ac} \cos(\omega \cdot t)$. Il considère que l'ion de masse m et de charge q , lié dans le site protéique pourrait être considéré comme un oscillateur. La fréquence ν de B_{AC} pour laquelle on observe un effet biologique correspondrait alors à la fréquence de vibration cet oscillateur. Il est difficile de rattacher cette notion d'oscillateur à un phénomène physique qui se produirait dans le site protéique de la calmoduline. L'auteur suppose que cet oscillateur est dans un état excité, et que celui-ci est dégénéré. L'application d'un champ magnétique statique fait alors éclater le niveau d'énergie de l'état excité en deux sous niveaux caractérisés par les énergies E_1 et E_2 . Ces énergies correspondent à des fréquences ν_1

et v_2 . La différence d'énergie ΔE est liée au champ magnétique par :

$$E = h (v_1 - v_2), \text{ avec } v_1 - v_2 = \text{Erreur !} = v_{\text{cyclotron}}$$

Selon lui la probabilité que l'ion subisse une désexcitation radiative, depuis l'un de ses états excités (1 ou 2) vers l'état fondamental serait liée aux amplitudes électromagnétiques de radiation. Or, dans ce modèle, Lednev n'envisage qu'une désexcitation radiative et rien dans le modèle ionique ne permet de privilégier ce phénomène relativement lent par rapport à une désexcitation par collision. Cette hypothèse est difficile à accepter d'autant plus que l'on sait que la fixation du calcium sur la calmoduline induit un changement de configuration de la molécule. De plus, il considère dans ce modèle que son état excité est dégénéré, or cela n'est vrai que si la symétrie sphérique du potentiel de la molécule concernée est parfaite ; sinon il n'y a pas dégénérescence de l'état excité. Le champ magnétique ne peut donc pas lever une dégénérescence qui n'existe pas . On pourrait accumuler les arguments qui semblent contredire cette théorie quantique du mouvement des ions dans un champ magnétique, mais l'argument de poids est le problème de l'ordre de grandeur de ces effets par rapport aux autres phénomènes chimiques, soulevé par Adair [1992]. Seul un phénomène coopératif pourrait contourner cette difficulté. Blanchard et Blackman [1994] ont pourtant continué à rechercher dans cette direction une justification à leurs résultats expérimentaux.

En définitive, aucun de ces modèles n'est pleinement satisfaisant. Les champs magnétiques faibles utilisés ne peuvent induire dans les modèles proposés que des effets négligeables devant les effets thermiques. Il n'y a pas de lien démontré entre les résultats observés et les grandeurs utilisées pour les décrire dans ces théories. Le problème majeur vient de la complexité des systèmes étudiés. En effet, on peut remarquer que les mouvements des ions calcium qui semblent avoir été mis en évidence expérimentalement peuvent ne pas être dus à un effet direct des champs magnétiques sur ces ions, mais à un effet indirect par l'intermédiaire du métabolisme. On prend peut-être « l'effet pour la cause ». De nouvelles hypothèses restent peut-être à établir...

VIII. CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES RF

Dans le domaine des radiofréquences, on distingue les mécanismes thermiques dus à des champs de forte intensité, et les mécanismes athermiques, habituellement dus à des champs de faible intensité. **Lorsque l'échauffement est manifeste**, il n'y a pas de difficulté. Cependant, dans certaines études, l'échauffement est prévenu par un système de refroidissement. Bien qu'il n'y ait alors pas d'effet thermique à proprement parler, l'énergie absorbée peut cependant être considérable et on ne peut pas dire que l'exposition dans ces études soit « de faible intensité ». On en trouve un exemple dans l'étude de Maes et al., [1993], où le système biologique était thermorégulé malgré un débit d'absorption spécifique de 70 W/kg .

VIII.A. Mécanisme d'interaction : absorption diélectrique

Au niveau macroscopique, les paramètres qui définissent les propriétés de la matière vis-à-vis d'un rayonnement électromagnétique (propriétés diélectriques) sont la permittivité électrique et la perméabilité magnétique.

La perméabilité de la matière biologique est très proche de celle du vide, c'est-à-dire qu'elle ne perturbe pas la composante magnétique du rayonnement.

La permittivité du milieu tient elle-même compte de trois autres paramètres :

- **La polarisabilité** des molécules qui est importante pour les molécules biologiques, et en particulier pour l'eau (qui constitue la majeure partie de l'organisme vivant). Cette polarisabilité est l'aptitude d'une molécule à s'aligner dans le champ électrique, suite à la répartition de ses électrons entre les différents atomes qui la constituent (moment dipolaire).
- **La conductivité** du milieu est surtout due aux ions qui présentent une grande mobilité, et sont susceptibles de se déplacer avec la variation du champ électrique. Leur interaction avec les charges fixes de molécules plus grosses engendre une dissipation d'énergie dans le milieu.
- **La viscosité** du milieu s'oppose au changement d'orientation des molécules ; les mouvements de molécules de petite taille pourront « s'accorder » avec la fréquence du rayonnement jusqu'à des valeurs plus élevées. Ainsi, la fréquence de relaxation de l'eau est de 18 GHz à 25°C, c'est-à-dire que sa bande d'absorption d'énergie présente un maximum à cette valeur.

La matière vivante est un matériau inhomogène, diélectrique, mauvais conducteur. Sur le trajet d'une onde électromagnétique, celle-ci est en partie réfléchi, en partie absorbée et en partie transmise. A la différence d'un matériau conducteur qui serait complètement réfléchissant, ou d'un matériau non conducteur, qui n'absorberait pas du tout (Figure 5).

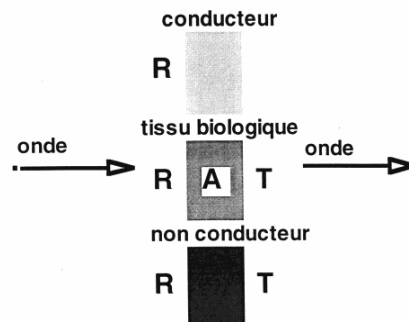


Figure 5. Comportement d'une onde électromagnétique en présence de différents types de matériaux

La permittivité présente des valeurs très différentes en fonction de la fréquence. Les variations brutales correspondent à des mécanismes d'absorption définis à l'origine d'une absorption d'énergie, et appelés relaxations.

Les différentes relaxations sont identifiées par une lettre grecque (Figure 6) :

- α - diffusion des ions
- conductance de la membrane

- charge d'organelles fixées à la membrane

a) β - charge capacitive des membranes

- relaxation dipolaire des protéines

γ - relaxation dipolaire de l'eau « libre »

δ - relaxation dipolaire de l'eau « liée »

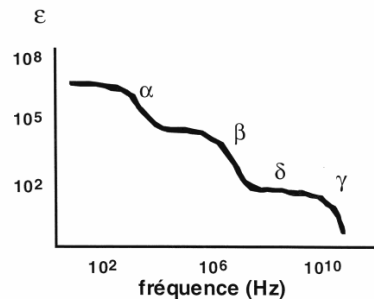


Figure 6. Permittivité des milieux biologiques en fonction de la fréquence

En pratique, la valeur de ϵ intervient pour calculer l'intensité du champ électrique à l'intérieur des tissus. Ces calculs complexes visent à résoudre les équations de Maxwell de façon itérative à partir d'une représentation mathématique de la source, de l'objet exposé et de leur interaction. La méthode la plus employée pour cela est la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Une méthode alternative consiste à mesurer le champ électrique dans des mannequins constitués de matériaux électriquement équivalents aux tissus biologiques. Quand le champ électrique interne E_{int} est défini, la puissance absorbée, quantifiée par le débit d'absorption spécifique (DAS ou SAR en anglais) peut être calculée grâce à la formule : $SAR = \sigma E_{int}^2 / \rho$, où σ et ρ sont respectivement la conductivité et la densité du milieu biologique.

Lorsque l'intensité du champ est élevée, l'énergie absorbée est à l'origine d'un échauffement. Cet échauffement est limité in vivo par des phénomènes de thermorégulation, mais sa pente à l'origine en fonction du temps $\Delta T/dt$ constitue une autre façon de mesurer le SAR à l'aide de la formule : $SAR = c \Delta T/dt$, où c est la chaleur massique des tissus biologiques, proche de celle de l'eau, soit $1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ ou encore $4186 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$.

Le niveau de champ correspondant à un DAS donné peut être calculé lorsqu'un organisme de caractéristiques déterminées se trouve exposé en entier et à une distance suffisante de la source appelée « champ lointain ». Cette façon de calculer est utilisée par la commission internationale de radioprotection des rayonnements non-ionisants (ICNIRP) pour définir les niveaux de référence des champs d'exposition. Cette méthode n'est pas facile à appliquer en conditions de champ proche, qui sont souvent celles de l'exposition professionnelle. L'estimation de la puissance absorbée nécessite

alors le recours aux méthodes présentées précédemment.

La profondeur de pénétration δ d'un rayonnement dans un matériau peut être évaluée à l'aide des formules suivantes :

b) - pour un bon conducteur $\delta = \text{Erreur !}$

- pour un milieu biologique, p étant la proportion de tissu cellulaire par rapport au tissu interstitiel $0,1 < p < 10$
 $\delta = \text{Erreur !}$

Un certain nombre de facteurs conditionnent l'interaction (réflexion, absorption, réfraction, diffraction, diffusion) des RF avec les organismes biologiques :

1. les paramètres physiques d'exposition : fréquence, polarisation, modulation (AM, FM, PW, CW), puissance incidente (crête ou moyenne), proximité de l'émetteur, uniformité du champ, dimensions et nature de la chambre d'exposition
2. les paramètres physiques des systèmes biologiques : propriétés diélectriques des tissus, dimensions, forme et position de l'objet par rapport à la longueur d'onde, orientation de l'animal, relations spatiales entre animaux
3. les facteurs de l'environnement : température, humidité,
4. les variables liées au test biologique : prédisposition génétique, ligne de base de la réponse, désordres métaboliques et fonctionnels
5. les variables expérimentales : procédures d'acclimatation, durée de l'exposition, nombre des expositions, mode d'exposition (animal entier ou partie), technique de prélèvement, temps écoulé entre exposition et prélèvement, période de l'exposition dans la journée, confinement des animaux, relation animal - chercheur

VIII.B. Danger lié à l'absorption diélectrique : brûlure par surexposition

Quelques accidents ont été provoqués par la mise en route inopinée d'un système d'émission en cours de maintenance ou de réparation ou par la déficience d'un système de sécurité. 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. Parmi les symptômes cliniques, la perception de chaleur est quasiment constamment retrouvée, de même que des céphalées lorsque la tête était située dans le faisceau d'exposition, et une neuropathie des territoires exposés est également fréquemment décrite. 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. Ces effets sont parfaitement bien expliqués par l'échauffement consécutif à l'absorption diélectrique des champs radiofréquences [de Seze et al., 1997].

VIII.C. Effets indirects : courants induits par l'intermédiaire d'une masse métallique exposée à un champ électrique

Lorsqu'une masse métallique importante est soumise à un champ variable, elle peut se charger et provoquer lors du contact des décharges électriques responsables de douleurs ou de minima de sensations désagréables. Pour une voiture, le niveau de champ à l'origine de cet effet est environ de 200 V/m entre 10 kHz et 300 MHz [Chatterjee, 1986]. De telles situations dans l'industrie peuvent provoquer des lâchers d'objets et être à l'origine d'accidents.

VIII.D. Effets biologiques des champs RF non expliqués par les mécanismes classiques

Les effets obtenus après l'exposition d'animaux à de faibles densités de puissance paraissent suivre les règles suivantes :

- les effets sont fonctionnels et transitoires
- les modifications portent sur la cinétique des phénomènes et non sur leur déclenchement
- nombre des effets ne surviennent que dans une « fenêtre » avec réponses variables pour chaque paramètre en fonction des autres paramètres

Une modification du flux calcique dans le tissu cérébral de poulet soumis à des OEM a été montrée, qui présente une dépendance fréquentielle. Étant donné le rôle ubiquitaire 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 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 font l'objet de tentatives de validation ;
- il n'a cependant 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. Seule la poursuite de recherches pertinentes (avec des expositions et des mesurages maîtrisés) permettra de préciser les paramètres qui les régissent pour mieux comprendre l'action biologique des OEM. Dans l'état actuel de nos connaissances, il n'existe pas de théorie qui permette d'expliquer les résultats observés avec des expositions de faible intensité à l'aide des paramètres mesurables énoncés (taille, orientation, profondeur de pénétration), et qui soit validée par

des expériences.

IX. CONCLUSION

De nombreux effets biologiques des champs électromagnétiques de faible intensité ont été décrits dans la littérature scientifique. L'interprétation de la littérature sur les effets biologiques des champs électromagnétiques en termes de risques pour la santé nécessite d'appréhender les paramètres concernant l'exposition, les systèmes biologiques impliqués, les conséquences éventuelles pour la santé des effets biologiques observés. Il ne suffit pas que des mécanismes d'interaction soient possibles pour qu'ils se produisent en réalité, et il est indispensable pour faire la part des choses de quantifier les phénomènes et leurs répercussions en les comparant aux réalités de l'exposition environnementale.

En conclusion, les mécanismes connus des études expérimentales reproductibles ne se traduisent pas par des effets nocifs pour la santé des champs électromagnétiques de faible intensité. Si un risque existe, il est trop faible pour être mis en évidence par les travaux actuellement réalisés.

Cependant, pour les champs statiques et ELF, il convient de rester prudent ou tout au moins vigilant pour tenter de comprendre les mécanismes prévalant aux observations suivantes :

1. Plusieurs études épidémiologiques montrent une incidence augmentée de leucémies chez l'enfant lors de l'exposition aux champs ELF.
2. Une inhibition de la sécrétion de mélatonine chez les rongeurs a fréquemment été retrouvée sous exposition à des champs ELF.
3. Un mécanisme biologique quantitativement peu plausible a été décrit de facilitation de la cancérisation par l'intermédiaire d'une inhibition de la sécrétion de mélatonine chez les rongeurs.
4. Des mécanismes d'interaction primaire sont en cours d'élaboration, dont certains ont fait l'objet de confirmations expérimentales : résonance paramétrique électronique, modification de réactions radicalaires

Pour les champs RF, on peut distinguer :

1. Un risque identifié de surexposition qui fait intervenir les processus physiologiques de thermorégulation, voire dans certains cas physiopathologiques.
2. Un risque non démontré d'une exposition chronique ou répétée à de faibles intensités.

X. BIBLIOGRAPHIE

Adair R.K. (1992) Criticism of Lednev's mechanism for the influence of weak magnetic fields

- on biological systems. *Bioelectromagnetics* 13 :231-235
- Bard D. (1995) Santé et environnement. Actualité et dossier en santé publique. 13, 18-19
- Blackman C.F., Benane S.G., House D.E. et Joines W.T. (1985a) Effects of ELF (1-120 Hz) and modulated (50 Hz) RF fields on the efflux of calcium ions from brain tissue in vitro. *Bioelectromagnetics* 6 :1-11
- Blackman C.F., Benane S.G., Rabinowitz J.R., House D.E., et Joines W.T. (1985b) A role for the magnetic field in the radiation-induced efflux of calcium ions from brain tissue in vitro. *Bioelectromagnetics* 6 :327-337
- Blackman C.F., Blanchard J.P., Benane S.G., et House D.E. (1994) Empirical test of an ion parametric resonance model for magnetic field interactions with PC-12 cells. *Bioelectromagnetics* 15 :239-260
- Blakemore RP (1975) Magnetotactic bacteria. *Science* 190, 377-379
- Blanchard J.P., et Blackman C.F. (1994) Clarification and application of an ion parametric resonance model for magnetic field interactions with biological systems. *Bioelectromagnetics* 15 :217-238
- Boroske E and Helfrich W (1978) Magnetic anisotropy of egg lecithin membranes. *Biophys. J.* 24, 863-868
- Chabre M (1986) Diamagnetic anisotropy of proteins and magnetic orientation of biological membranes and protein assemblies in : *Biophysical effects of steady magnetic fields*. Ed. Maret, Boccarda and Kiepenheuer, Workshop Les Houches, Springer Verlag, 28-33
- Chagneux R., Chagneux N., and Chalazonitis N. (1977) "Decrease in magnetic anisotropy of external segments of the retinal rods after total photolysis. *Biophys. J.*, 18, 125
- Chalazonitis N., Chagneux R., and Arvanitaki A. (1970) « Rotation des segments externes des photorécepteurs dans un champ magnétique constant. » *C. R. Acad. Sci. (Paris) Ser D*, 271, 130
- Chatterjee I., Wu D. et Gandhi O.P. (1986) Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contact hazard analysis in the VLF-MF band. *IEEE Trans. on Biomed Eng.*, BME-33, 5, 486-494
- Chiabrera A., Bianco B., Kaufmann J.J. et Pilla A.A. (1991) in : *Electromagnetics in medicine and biology*, édité par C.T. Brighton and S.R. Pollack, San Francisco Press, 21-26 et 27-31
- de Seze René, Luis Miro, M.O. Wehr (1997) What do we know about accidents related to EMFs exposure ? 2nd MCM and 1st Workshop on « Electromagnetic Fields in Occupational Medicine » COST 244bis/cinquantenaire INRS, Nîmes, 27-28 Sept 1997
- Gagny C (1994) Immunité des stimulateurs cardiaques aux perturbations électromagnétiques. DEA Instrumentation et Microélectronique Université de Nancy I - 2^{ème} partie.

- Lednev V.V. (1991) Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems. *Bioelectromagnetics* 12 :71-75
- Liboff A.R. et McLeod B.R. (1988) Kinetics of channelized membrane ions in magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 9 :39-51
- Maes A, Verschaeve L, Arroyo A, De Wagter C and Vercruyssen L (1993) In vitro cytogenetic effects of 2450 MHz waves on human peripheral blood lymphocytes. *Bioelectromagnetics* 14(6) :495-501
- McLeod B.R. et Liboff A.R. (1987) dans : Mechanistic approaches to interactions of EMF with living systems, Plenum Press, Ed. Blank & Findl, Plenum Press, 97-108.
- Polk C (1987) Penetration of DC and low frequency electric fields into tissue. in : Polk C and Postow E (1987) CRC handbook of biological effects of electromagnetic fields. CRC Press, Boca Raton, (U.S.A.) p 5-7

XI. GLOSSAIRE

Sigle	Unité	Quantité	
$A.m^{-1}$ ou A/m	ampère par mètre	H	champ magnétique
$A.m^{-2}$ ou A/m ²	ampère par mètre carré	j	densité de courant
A.m ² ou J/T	ampère - mètre carré ou joule par tesla	m	moment magnétique
°C	degré Celsius	T	température
cal/g.°C	calorie par gramme et par degré Celsius	c	chaleur massique
Cb	coulomb	q	charge
cm/s	centimètre par seconde	v	vitesse
e ⁻ V	électron-volt	E	énergie
F/m	farad par mètre		
GHz	gigahertz	f ou ν	fréquence
J/kg.°C	joule par kilogramme et par degré Celsius	c	chaleur massique
°K	degré Kelvin	T	température
kcal/mol	kilocalorie par mole		
kHz	kilohertz	f ou ν	fréquence
$kV.m^{-1}$ ou kV/m	kilovolt par mètre	E	champ électrique
m	mètre	L	longueur
$m^2 V^{-1} s^{-1}$	mètre carré par volt et par seconde	μ_i	mobilité ionique de l'ion i
mA/m ²	milliampère par mètre carré	j	densité de courant
MHz	mégahertz	f ou ν	fréquence
mM/l	millimole par litre	C	concentration molaire
mT	millitesla	B	induction magnétique
mV	millivolt	V	potentiel
mV/m	millivolt par mètre	E	champ électrique
μF	microfarad	C	capacité
μm	micromètre	L	longueur
μs	microseconde	T	temps
μT	microtesla	B	induction magnétique
N	newton	F	force

Sigle	Unité	Quantité	
nm	nanomètre	L	longueur
S	siemens	Γ	conductance
S/m	siemens par mètre	σ	conductivité
T	tesla	B	induction magnétique
T/s	tesla par seconde	dB/dt	gradient temporel de champ
V	volt	U	tension ou potentiel
V/cm	volt par centimètre	E	champ électrique
V/m	volt par mètre	E	champ électrique
W.kg ⁻¹ ou W/kg	watt par kilogramme	DAS ou SAR	débit d'absorption spécifique (en anglais : « Specific Absorption Rate »)

Tableau 1. Unités, sigles et quantités correspondantes

Sigle	Quantité	Unité ou valeur (en Unités du Système International : USI)	
B	induction magnétique, communément appelée « champ magnétique »	T	tesla
B (t)	Champ magnétique variable en fonction du temps		
B _{ac}	champ magnétique variable (de l'anglais « alternative current »)		
B _{dc}	champ magnétique constant (de l'anglais « direct current »)		
C _i	concentration de l'ion i	mole/l	mole par litre
δ	profondeur de pénétration	m	mètre
DAS ou SAR	débit d'absorption spécifique (en anglais : « Specific Absorption Rate »)	W/kg	watt par kilogramme
dB/dt	gradient temporel de champ	T/s	tesla par seconde
dB/dx	gradient spatial de champ	T/m	tesla par mètre
ddp	différence de potentiel	V	volt
Δφ	différence de potentiel transmembranaire	V	volt
ΔT/dt	gradient temporel de température	°C/s ou °K/s	degré Celsius par seconde ou degré Kelvin par seconde
E	champ électrique ou énergie	V/m ou J	volt par mètre ou joule
E(t)	champ électrique variable en fonction du temps		
ε ₀	permittivité du vide, assimilée à celle de l'air (milieu ambiant)		
ε _{int}	permittivité de l'organisme biologique (milieu « interne »)	16	
f	fréquence	Hz	hertz
F	force	N	newton
j	densité de courant	A.m ⁻² ou A/m ²	ampère par mètre carré
λ	lambda : longueur d'onde	m	mètre
m	masse ou moment magnétique	kg ou A.m ²	kilogramme ou ampère x mètre carré
μ _i	mobilité ionique de l'ion i	m ² V ⁻¹ s ⁻¹	mètre carré par volt et par seconde
μ _r	perméabilité magnétique relative	m ² V ⁻¹ s ⁻¹	mètre carré par volt et par seconde

Sigle	Quantité	Unité ou valeur (en Unités du Système International : USI)	
q	charge d'un ion	Cb	coulomb
qi	charge d'un ion i		
σ_0	conductivité du vide, assimilée à celle de l'air (milieu ambiant ou « extérieur »)	S/m	conductivité
σ_{int}	conductivité de l'organisme biologique (milieu « interne »)	S/m	conductivité
SAR	Voir DAS		
ω	fréquence angulaire	rd/s	radian par seconde

Tableau 2. Quantités, désignations et unités

Abréviation	Signification	Définition
ADN	A cide D ésoxyribo N ucléique	molécule des chromosomes
AM	A mplitude M odulation	émission codée par modulation d'amplitude
Ca ⁺⁺ ou Ca ²⁺	ion calcium	
CW	émission continue (de l'anglais « C ontinuous W ave »)	une émission peut être continue (CW) ou pulsée (PW)
EBF ou ELF	E xtrêmement B asse(s) F réquence(s) (en anglais E xtrremely L ow F requency)	fréquences comprises entre 0 et 300 Hz, comprenant principalement la fréquence industrielle et domestique, 50 Hz en Europe et 60 Hz en Amérique du Nord
ELF	Voir EBF	
Etm	Champ électrique transmembranaire	
FDTD	F inite D ifferences in the T ime D omain	méthode de modélisation de l'interaction champ matière, bien adaptée aux tissus biologiques
FM	F requency M odulation	émission codée par modulation de la fréquence
grad	gradient	opérateur mathématique
ICNIRP	I nternational C ommission on N on I onizing R adiation P rotection	commission de référence pour l'établissement des normes sur les rayonnements non ionisants
OEM	O nde(s) E lectro M agnétique(s)	
PW	émission par impulsions (de l'anglais « P ulsed W ave »)	une émission peut être continue (CW) ou pulsée (PW)
RF	R adio F réquence	

Tableau 3. Abréviations, signification et définition