

Les effets biologiques des radiofréquences

Conférence invitée

Bernard Veyret,
avec la participation de
Bernard Després et
Joe Wiart

Bernard Veyret, ingénieur ESPCI, directeur de recherche au CNRS, anime l'équipe de bioélectromagnétisme en physique des interactions ondes-matière à l'ENSPC de Bordeaux. Cette équipe étudie les effets des micro-ondes sur des modèles animaux ou cellulaires.

Bernard Després, ISEP 90, est chargé d'études sur l'exposition humaine et la compatibilité électromagnétique au centre Paris B du CNET. Il participe à la normalisation internationale dans ces domaines.

Joe Wiart, ENST 92, est docteur en physique. Au centre Paris B du CNET, il est chargé des études de modélisation électromagnétique appliquées à l'ingénierie des fréquences et à la compatibilité électromagnétique. Il participe à des groupes de travail du CENELEC et de la CEI et est expert européen au sein du COST 244.

[26 octobre 1995]

Les effets biologiques des radio fréquences

Cet article invité soulève la question des possibles effets biologiques des rayonnements micro-ondes à faible niveau. Aucune preuve n'en a été apportée jusqu'à présent.

Des questions sont posées de plus en plus fréquemment sur l'existence éventuelle d'effets biologiques des radiofréquences (RF) et sur leurs conséquences en santé publique. Déjà, à partir de questions posées par l'utilisation de radars, la recherche avait été initiée et le "bioélectromagnétisme" s'est ensuite largement développé dans le domaine des fréquences extrêmement basses (ELF en anglais) et en particulier à 50/60 Hz correspondant à la production et au transport de l'énergie électrique.

Dans l'environnement électromagnétique artificiel, la place des micro-ondes servant à la communication mobile ne cesse d'augmenter. La téléphonie mobile en particulier a généré les craintes des utilisateurs à cause de la proximité entre l'émetteur et la tête. Dans la gamme des radiofréquences, l'essentiel de la recherche mondiale porte ainsi actuellement sur cette interaction onde émise par le téléphone mobile-corps humain et sur les effets éventuels sur la santé.

Cette recherche pluridisciplinaire qui vient de démarrer n'a pas encore permis de répondre aux questions posées initialement.

Cet article décrit brièvement le mode d'interaction des RF avec la matière vivante, la modélisation de cette interaction, les effets biologiques connus et enfin l'état des normes d'exposition. Par contre, les effets indirects tels que l'action des RF sur des implants ne seront pas décrits.

Interaction des RF avec les organismes biologiques

Quand des ondes électromagnétiques rencontrent un organisme vivant, une interaction a lieu : la matière vivante se comporte comme un diélectrique non homogène faiblement conducteur. L'onde est absorbée, réfractée et diffractée. La modification physique de la matière issue de l'interaction peut avoir pour conséquence des effets biologiques. Ainsi, l'échauffement par des micro-ondes d'un tissu vivant, constitué en majeure partie d'eau, donne lieu à une thermorégulation et éventuellement à un dommage du tissu si l'élévation de température est trop intense ou prolongée.

L'interaction dépend des propriétés diélectriques de la matière vivante (conductivité et permittivité) mais aussi de la longueur d'onde par rapport aux dimensions de l'organisme, de la forme de celui-ci, de la polarisation, etc.

Des études de dosimétrie théorique (modélisation) et expérimentale (mesure sur fantômes) permettent de quantifier l'interaction en terme de champs électrique et magnétique locaux ou de puissance déposée (voir encadré 1).

Aux fréquences radio, la mesure non destructive du champ électromagnétique qui est induit à l'intérieur d'une structure biologique n'est pas pour l'instant facile à mettre en œuvre. Il est donc souvent indispensable de recourir à la modélisation.

Encadré 1 - Puissance absorbée : définition du SAR

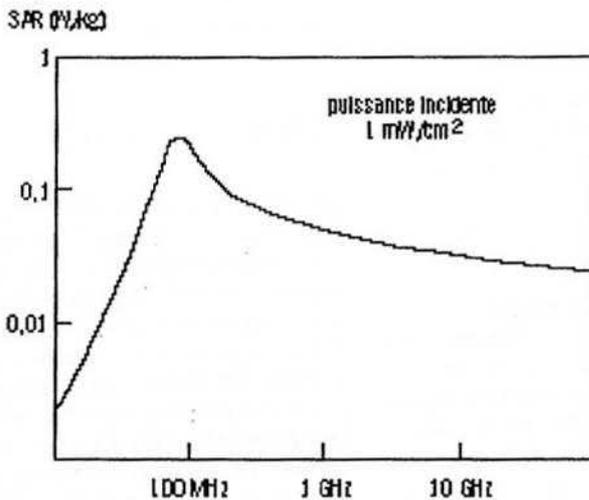
Une grandeur dosimétrique a été choisie pour quantifier la déposition ou dissipation d'énergie dans la matière : le DAM, débit d'absorption massique (ou spécifique) appelé en anglais SAR (specific absorption rate).

$$\text{SAR} = d/dt (dW/dm) = d/dt (dW/\rho (dv))$$

où dW est l'incrément d'énergie déposé dans l'élément de masse dm de volume dv et densité ρ , dans le temps dt :

$$\text{DAM} = \frac{\sigma}{2\rho} |E_{\text{int}}|^2 = \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon''}{2\rho} |E_{\text{int}}|^2$$

où σ est la conductivité en S/m, ϵ_0 est la constante diélectrique du vide, ϵ'' est la perte diélectrique, $\omega = 2\pi f$ avec f en Hz, et E_{int} la valeur crête du champ électrique en V/m. Le SAR est exprimé en W/kg. Il s'agit d'une valeur locale. Le SAR "moyen" est défini comme le rapport de la puissance absorbée sur la masse du corps exposé. Il est clair que la connaissance du SAR ne renseigne que sur l'apport de chaleur et ne prend pas en compte des effets dépendant de la direction du champ par exemple. La valeur du SAR ne renseigne pas non plus sur la répartition en profondeur de l'énergie qui est inhomogène à cause de la loi exponentielle de Beer-Lambert. Néanmoins le concept du SAR est très utile pour la quantification des interactions et permet des comparaisons d'effets biologiques obtenus avec des espèces différentes dans des conditions d'expositions différentes. Il permet de définir des normes d'exposition soit en santé publique, soit dans les applications thérapeutiques telles que l'hyperthermie. En définissant le SAR, on ne prétend pas relier cette grandeur à une augmentation de température locale prévisible et a fortiori on ne fait pas d'hypothèse sur les effets biologiques induits ni sur leur conséquences éventuelles.



Comme l'indique la figure ci-dessus, le SAR moyen pour l'homme dépend de la fréquence, à puissance incidente constante : le maximum est atteint pour l'homme standard autour de 70 MHz, fréquence dite de résonance.

Modélisation

Elle consiste à évaluer par le calcul les valeurs des champs à l'intérieur de la matière vivante dans des conditions d'exposition RF données. Une approche totalement analytique est impossible car les objets en questions sont de forme complexe et se trouvent souvent en champ proche. Seules des méthodes numériques peuvent donner des résultats acceptables.

Méthodes numériques

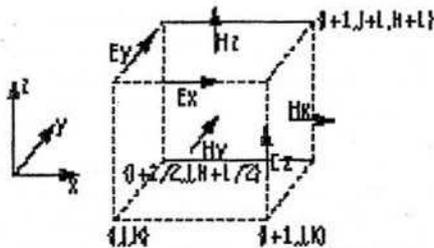
Avec l'évolution des moyens informatiques, les méthodes numériques ont pris une part prédominante dans le calcul électromagnétique. Dans ce domaine, nous pouvons classer les méthodes en deux groupes : d'une part, celles qui, comme la méthode des moments (MM), ne nécessitent pas le maillage de l'espace entourant l'objet et, d'autre part, celles qui, comme les méthodes des différences finies (FDTD : finite difference in time domain ; voir encadré 2) ou des éléments finis (FEM : finite element method), doivent mailler l'espace.

Dans le cas de la méthode des moments ou dans celle du gradient conjugué (CG-FFT), la prise en compte de l'espace libre entourant l'objet analysé est parfaite. Ce type de méthode pose néanmoins des problèmes difficiles dans le cas d'un objet fortement inhomogène. Les méthodes telles que la FDTD ou la FEM utilisent les équations de Maxwell et ceci dans l'espace entièrement discrétisé. Leur intérêt est qu'elles sont à même de prendre en compte des objets inhomogènes. Leur problème est lié à la taille du maillage de l'espace. De multiples études ont été menées et de nombreuses méthodes (Mur, Béranger) permettent la réduction, sans perte sensible de précision, de l'espace à discrétiser. En plus de ces deux groupes, des recherches sont menées actuellement autour des méthodes "hybrides" qui cherchent à mélanger ces deux approches.

Encadré 2 - La FDTD : principe et limites

Au regard des contraintes liées aux inhomogénéités de la source et de la matière vivante, les méthodes qui semblent les plus adaptées au problème des interactions semblent être la FEM (Finite element method) et la FDTD (Finite difference in time domain). Cette dernière est la plus utilisée dans le domaine du bioélectromagnétisme. Le principe, basé sur les travaux de Yee, est relativement simple puisqu'il consiste à discrétiser l'espace et le temps et à approcher les équations de Maxwell à l'aide de différences finies. Dans un système à une dimension, cela se traduit par :

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \Rightarrow \frac{E_{i\Delta x}^{n\Delta t} - E_{(i+1)\Delta x}^{n\Delta t}}{\Delta x} = \mu \frac{H_{(i+1/2)\Delta t}^{(n-1/2)\Delta t} - H_{(i+1/2)\Delta t}^{(n+1/2)\Delta t}}{\Delta t}$$



Position de E et H dans une maille élémentaire

L'espace est découpé en cubes élémentaires, les composantes des champs E et H se trouvant comme indiqué sur la figure 1. La stabilité de la méthode impose, d'une part, que les mailles des cubes élémentaires soient de dimensions inférieures à $\lambda/10$ et, d'autre part, que l'incrément temporel soit tel que :

$$\Delta t \leq \left(\frac{1}{v_{\min}} \right) \left[\left(\frac{1}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y} \right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

L'objet étudié est positionné dans un volume de calcul. Sur les bords de celui-ci, des conditions d'absorptions aux limites (ABC : absorbing boundary conditions) sont imposées aux champs. Ces contraintes numériques garantissent une absorption des champs et évitent ainsi les "réflexions" sur les faces du volume fini.

Etat des recherches

Partout dans le monde [Gandhi (University of Utah, USA)] et particulièrement en Europe [Kuster (ETH, Zürich, CH), Bielli (CSELT, I), Dimbylow (NRPB, GB), Bach Andersen (Aalborg, DK)] des équipes de recherches travaillent sur l'estimation du champ induit par un radiotéléphone en champ proche. L'un des objectifs est la connaissance du SAR. Au travers de l'action européenne COST 244, les différents acteurs ont commencé à travailler et coopérer sur des modèles canoniques (sphères, cubes) afin de comparer les différentes approches. Dans la plupart des

cas, la méthode utilisée est la FDTD. Le stade suivant consiste en la complexification des modèles, d'une part, en utilisant l'imagerie médicale pour la partie biologique et, d'autre part, en modélisant les radiotéléphones de façon plus conforme.

La fiabilité de la modélisation repose sur la connaissance précise des caractéristiques diélectriques *in vivo* des tissus (permittivité, perméabilité et conductivité). Un travail important est mené dans ce domaine, notamment par C. Gabriel (Londres). La répartition des différents tissus peut être connue avec précision à l'aide de méthodes modernes telles que l'imagerie par résonance magnétique.

Dosimétrie

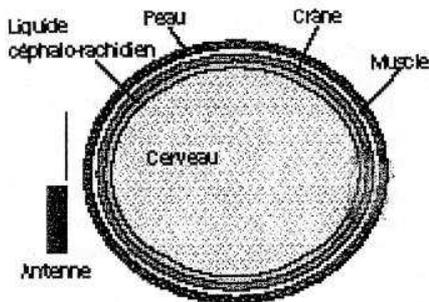
La réalité biologique étant d'une très grande complexité et d'une grande inhomogénéité, la comparaison des résultats de la modélisation avec les mesures est indispensable (voir encadré 3). Etant donné la difficulté de mesure du champ *in vivo*, on préfère mesurer le champ dans des fantômes. Un nombre réduit d'équipes travaille sur cette question. En France, l'équipe de J.-C. Bolomey à l'Ecole supérieure d'électricité, en collaboration avec le CNET, dispose d'un système de mesure non perturbant basé sur la diffusion modulée et piloté par une fibre optique. En Suisse, N. Kuster travaille depuis plusieurs années sur ce problème et a mis au point, avec Motorola, une sonde performante. D'autres équipes [CSELT, I; RPB : Radiation Protection Bureau, Canada; Université du Sussex, GB] travaillent également dans ce domaine mais, de façon générale, les recherches sont moins avancées qu'en modélisation et sont confrontées à de gros problèmes techniques tels que la réalisation de fantômes représentatifs de la variété des caractéristiques diélectriques.

Effets biologiques

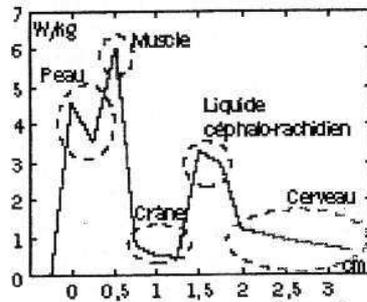
Un effet biologique de champs électromagnétiques correspond à des modifications biochimique et biologique de la matière vivante. Cet effet peut être recherché lors d'une exposition *in vitro* de cellules en culture ou *in vivo* sur un groupe d'animaux exposés aux champs. La variété des conditions d'expérience et des effets biologiques observés est extrêmement grande : modification de l'activité d'une enzyme ou d'un comportement d'apprentissage, etc. Une revue extrêmement complète vient d'être publiée par Polson et Heynick [1995], qui couvre tous les aspects des résultats de recherche sur les effets biologiques des micro-ondes.

Encadré 3 - Résultats en dosimétrie

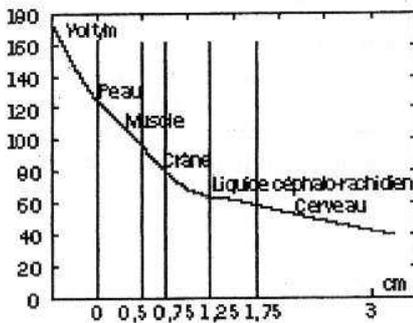
A l'aide de la FDTD, le CNET travaille avec un groupe de l'université d'Illinois sur la modélisation et l'estimation du champ induit par un radiotéléphone. Le premier modèle consiste en un téléphone représenté par un parallélépipède surmonté d'une antenne quart d'onde, la tête étant modélisée par le biais de sphères concentriques. Le maillage est composé de cubes de 2,5 mm de côté. Le volume complet comprend 1,16 million de cubes.



Modèle de tête et de téléphone.



Valeur du SAR dans les tissus sur l'axe reliant le milieu de l'antenne au centre des sphères.



Valeur du champ électrique sur le même axe et avec le même type d'antenne (cas d'une antenne $\lambda/2$)

L'utilisation de la FDTD montre que le champ décroît très vite, la conductivité des tissus engendrant des pertes et effaçant toute résonance. Des résultats récents obtenus sur des fantômes par les équipes de J.-C. Bolomey et N. Kuster confirment ce comportement des champs à l'intérieur de la tête et en particulier l'absence de "points chauds".

"isothermique") est présent quand le système de thermorégulation de l'organisme exposé est capable de maintenir la température corporelle à une valeur très proche de sa valeur nominale. Dans ce cas, la mise en route du système de régulation peut générer un stress. Enfin, un effet est "spécifique" quand il est créé par l'interaction d'une onde ne créant aucun échauffement et ne déclenchant pas la mise en route de la thermorégulation.

Une des applications classiques des micro-ondes, qui ne sera pas traitée ici, concerne l'échauffement délibéré des tissus comme dans le cas de l'hyperthermie anticancéreuse dans laquelle les tumeurs sont préférentiellement chauffées. Il s'agit là clairement d'un effet thermique.

Les principaux résultats publiés sont présentés ci-dessous. Il est bon de garder à l'esprit la difficulté de réalisation des expériences pour lesquelles le choix du modèle biologique (espèce, nombre d'animaux, exposition aiguë ou chronique, facteurs de stress, etc.) et la conception du système d'exposition (champ proche ou lointain, dosimétrie, fréquence, modulation, etc.) sont critiques. De nombreuses études spécifiques sur les effets éventuels des téléphones mobiles sont en cours mais les résultats ne seront disponibles que dans plusieurs mois. Ainsi, chez l'homme, des expositions de volontaires sont effectuées à Nîmes (en collaboration avec le CNET) en Allemagne et en Finlande.

Effets sur l'œil

Tous les résultats obtenus chez l'animal ont montré que l'œil était bien l'un des organes les plus sensibles aux RF en raison de sa faible irrigation sanguine. L'effet thermique résultant de l'exposition provoque à terme une cataracte mais ce à des valeurs élevées de puissance incidente (SAR local d'au moins 100 W/kg).

Neurologie

Durant ces dix dernières années, les expériences conduites par H. Lai de l'Université de Washington à Seattle, ont mis en évidence des effets d'exposition aiguës sur le système nerveux du rat.

Effets biologiques in vivo

Une des questions majeures concernant les effets étudiés *in vivo* est la distinction entre effets thermiques et non thermiques.

En effet, les normes d'exposition ont été établies en ne tenant compte que des effets thermiques connus et une polémique subsiste quant à l'existence même d'effets non thermiques. Il est donc souhaitable de définir les différents types d'effets et

d'examiner comment les résultats expérimentaux acquis se classent dans ces catégories.

Un effet "thermique" correspond à une élévation substantielle de la température corporelle au-delà de sa valeur nominale. Le seuil thermique correspondant à une élévation de 1 °C de la température corporelle chez l'homme correspond à un SAR de 4 W/kg environ. Un effet "non thermique" (ou "athermique" ou encore

En particulier, des modifications étaient apportées par l'exposition à des micro-ondes pulsées de faible puissance (2,45 GHz, pulses de 2 μ s, 500 pulses/s, 1,2 W/kg) sur l'action pharmacologique de certaines substances. D'autres résultats obtenus en l'absence de ces molécules exogènes sur l'apprentissage et la mémoire des rats exposés ont montré une activation des endorphines produits par le cerveau.

Un autre effet sur le même système biologique a été observé par Kolomitkin en Russie sur des rats exposés à des micro-ondes pulsées à 16 Hz : une heure d'irradiation à très faible puissance incidente (50 μ W/cm²), conduisait à une augmentation de 25 % de l'activité d'une enzyme (acétylcholinestérase) dans le néocortex des animaux. Cet effet n'était pas obtenu à d'autres fréquences de modulation ELF. Il apparaît donc que des effets existent sur le fonctionnement du système nerveux, sans que l'on puisse actuellement envisager une extrapolation chez l'homme.

À Nîmes, l'équipe de R. de Seze et L. Miro, en collaboration avec le CNET, étudie l'effet d'une exposition micro-onde (900 MHz pulsé, SAR : 0,6 W/kg) sur le niveau de neurotransmetteurs chez le rat. Jusqu'à présent les résultats ont été négatifs.

Un autre aspect important du fonctionnement du système nerveux central concerne la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique, qui protège le cerveau de l'intrusion de molécules provenant de la circulation sanguine. Des expériences récentes de Salford en Suède ont montré que, chez le rat, une exposition à des micro-ondes pulsées ou continues à faible puissance (< 5 W/kg) induisait une augmentation de la "fuite" d'albumine de 30 %.

Génotoxicité

Les résultats obtenus durant ces dernières années avaient permis de conclure que les micro-ondes n'avaient pas d'effets génotoxiques chez l'animal. Pourtant Lai et Singh à Seattle ont obtenu en 1995 des résultats qui remettent en cause ces conclusions : des rats étaient exposés

pendant 2 heures à des micro-ondes pulsées ou bien à un rayonnement continu de même puissance moyenne. Quatre heures après la fin de l'exposition, le test dit de "comète" était pratiqué sur les cellules du cerveau pour déterminer le nombre de ruptures de l'ADN. Dans ce test les fragments d'ADN s'étaient étalés sur la plaque comme la queue d'une comète. Le nombre de ruptures "simple-brin" était augmenté de 30 % chez les animaux exposés aux micro-ondes pulsées et de 20 % dans le cas des micro-ondes continues. Aucun effet n'était observé immédiatement après l'exposition. L'effet observé paraissait augmenter avec la puissance utilisée. Les conséquences biologiques de cet effet ne sont pas connues avec précision, alors que l'on connaît la gravité des mutations stables. Le mécanisme de l'effet n'est pas non plus connu, les micro-ondes pouvant agir, soit pour provoquer les ruptures, soit pour bloquer le fonctionnement de l'enzyme capable de réparer l'ADN.

Il paraît donc nécessaire de continuer l'évaluation du potentiel mutagénique de micro-ondes de niveau modéré (SAR d'environ 1 W/kg), niveau qui, jusqu'à présent, était considéré comme ne présentant pas de problème de génotoxicité.

Cancer

Aucune des études récentes réalisées en Suède et aux USA sur des modèles de cancer chez l'animal n'ont montré d'effets significatifs sur le développement de tumeurs sous exposition à des micro-ondes continues ou pulsées. Une étude, menée en collaboration avec le CNET, est actuellement en cours au laboratoire PIOM de Bordeaux où des rats porteurs de tumeurs sont exposés 2 heures/jour en champ lointain à des micro-ondes pulsées (55 ou 200 μ W/cm²). Jusqu'à présent, aucun effet n'a été observé sur la croissance des tumeurs et sur la survie des animaux.

Effets biologiques *in vitro*

Les avantages majeurs que présente l'expérimentation *in vitro* résident dans la moindre complexité du modèle par rapport à un organisme, et au nombre élevé de cellules mises en jeu permettant d'améliorer la base statistique. Par contre, l'extrapolation à l'animal (et a fortiori à l'homme) n'est pas simple en raison de tous les systèmes de régulation existant *in vivo*. Les conditions d'expériences et, en particulier l'exposition RF, sont mieux contrôlable qu'en expérimentation animale mais il reste capital d'effectuer une régulation de température draconienne pour éviter des effets thermiques qui ne manquent pas de se produire car la physiologie de cellules en culture est extrêmement sensible aux variations de température. Les principaux résultats connus de l'expérimentation *in vitro* sont décrits ci-après :

Neurologie

Seuls quelques effets sur des cellules cardiaques d'embryon de poulet ont été observés par Seeman et DeHaan en 1993 : des variations de rythme des pulsations avaient lieu après quelques minutes d'irradiation aux micro-ondes (2,45 GHz, continues ou pulsées, SAR < 12 W/kg).

Génotoxicité

L'absence d'effets génotoxiques des RF a été récemment remise en cause par d'Ambrosio à Naples qui a irradié du sang humain entier à l'aide de micro-ondes modulées (9 GHz, modulation à 50 Hz, SAR de 100 W/kg). Le nombre de cellules présentant des micronoyaux, indiquant une altération du matériel génétique, était nettement augmentée dans les échantillons exposés. Néanmoins, l'augmentation de température de 5 °C a pu être en partie cause de l'effet. Dans une expérience similaire, Maes, en Belgique, a constaté une augmentation de la fréquence des aberrations chromosomiques et des micronoyaux dans des cellules du sang exposé à 2,45 GHz à une température constante de 36,1 °C, sans pourtant que la prolifération des cellules ne soit affectée. Cette même équipe a placé

les échantillons près de l'antenne d'une station de base GSM (49 V/m) et a également observé des aberrations chromosomiques. Ces auteurs concluaient que ces effets ne devraient pas être retrouvés dans la population soumises à des champs de niveau bien plus faible.

L'effet génotoxique d'ondes courtes (10-21 MHz) a été étudié par Haider et collaborateurs en 1994 sur des plantes (*Tradescantia*) placées près d'antennes de diffusion radio pendant 30 heures. La fréquence d'apparition de micronoyaux était doublée dans les échantillons exposés par rapport aux témoins. Le niveau de champ correspondant à cet effet était de 27,5 V/m et 0,073 A/m, ne pouvant pas donner lieu à un échauffement.

Dans un article de synthèse récent, Meltz a insisté sur la nécessité d'un contrôle rigoureux de la température dans les expériences *in vitro* et concluait que les micro-ondes ne peuvent donner d'effet génotoxique que si la température de l'échantillon atteint des valeurs importantes. Malgré cet avis autorisé, il est certain que des résultats récents ont montré qu'aucune certitude n'était acquise *in vitro* quant aux effets génotoxiques des micro-ondes.

Rôle éventuel de la modulation basse fréquence

Quelques hypothèses ont été proposées pour rendre compte des effets observés expérimentalement. Pour ce qui est des expositions au dessus du seuil thermique (environ 4 W/kg), la distinction entre puissance moyenne et puissance crête est importante car, d'une part, une puissance crête importante peut produire un effet de type thermo-acoustique et, d'autre part, l'arrêt temporaire du signal peut permettre une dissipation de la chaleur accumulée durant le pulse.

Par contre, dans le cas "non thermique", l'observation d'effets d'exposition de micro-ondes modulées de faible puissance

n'a pas, à l'heure actuelle, d'explication satisfaisante. Les résultats initiaux portaient sur des effets sur le système nerveux central et sur l'efflux de calcium d'échantillon de cerveau soumis à des micro-ondes modulées autour de 16 Hz. Un examen attentif de la littérature mondiale montre que les résultats publiés sur les effets biologiques de micro-ondes de faible puissance concernent essentiellement des micro-ondes modulées ou pulsées à extrêmement basse fréquence (< 300 Hz).

Depuis une dizaine d'années, des auteurs ont montré expérimentalement que des résultats pouvaient être obtenus aussi bien à l'aide de champs électriques (et/ou magnétiques) ELF qu'à l'aide de RF modulées à ces mêmes fréquences. Ainsi, Litovitz a invoqué le rôle de la "cohérence spatiale" : l'activité de l'enzyme ornithine décarboxylase étant augmentée sous exposition à des champs magnétiques ELF, cette équipe pluridisciplinaire a effectué le même type d'expérience à l'aide de micro-ondes modulées en ELF (60 Hz). L'effet étant retrouvé dans ces conditions, et non à l'aide de micro-ondes continues, l'hypothèse formulée était que l'ensemble des cellules "voyaient" le même champ incident alors que l'incohérence subsistait au niveau du bruit intrinsèque à chaque cellule ou partie de cellule. Cette hypothèse nécessite également l'existence d'un processus de démodulation du signal à l'aide d'un phénomène non linéaire.

Durant les dernières années, deux types d'effets biologiques ont également retenu l'attention :

- l'effet de champs magnétiques ELF sur la sécrétion nocturne de mélatonine par la glande pinéale de rongeurs et par les cellules de cette glande *in vitro* (sans que l'effet de micro-ondes pulsés n'ait encore été mis en évidence dans ce modèle),
- les modifications du transport de l'ion calcium à travers des membranes des cellules sous l'effet de champs pulsés ELF ou de micro-ondes modulées. Il s'agit là de deux modèles biologiques qu'il sera particulièrement intéressant d'étudier sous exposition à des signaux de type GSM.

Epidémiologie

Les études épidémiologiques consistent à déterminer s'il existe une corrélation entre un facteur de risque et une maladie. De très nombreuses études ont été effectuées dans la gamme des ELF sur les liens de causalité éventuels entre l'exposition 50/60 Hz et diverses formes de cancer sans qu'aucune conclusion n'ait pu être atteinte. Dans le cas des RF, quelques études ont été menées sur l'environnement créé par les radars, sans qu'aucun résultat probant n'ait été obtenu en raison de l'extrême difficulté présentée par ce type d'étude (nombre faible de sujets, mauvaise connaissance des doses, etc.). La seule étude actuelle d'envergure concernant les téléphones mobiles et le cancer est prévue aux USA. Elle est actuellement préparée par Dreyer et Rothman (Mass, USA). Ces chercheurs ont compilé des données sur 2 millions d'utilisateurs de téléphones mobiles et comptent l'étendre à 7 millions pour suivre la mortalité dans des études cas-témoins. Une évaluation est en cours sur 5500 personnes pour déterminer la latéralité de l'écoute téléphonique ainsi que l'intérêt que présente l'examen de la facturation des clients dans la détermination des niveaux d'exposition. Une étude à large échelle est également envisagée en Italie par le ministère de la Santé.

Ce type de recherche épidémiologique sera très difficile à réaliser dans le cas des téléphones mobiles en raison de la difficulté à définir les conditions d'utilisation et les doses associées. Les premiers résultats épidémiologiques ne seront disponibles que dans plusieurs années.

Normes d'exposition

La question de la limitation de l'exposition aux RF s'est posée dans les années 1950 avec le développement des radars, et les premiers projets de norme ont vu le jour. Aux longueurs d'onde des radars (environ 10 cm), l'exposition intervient toujours en champ lointain, ce qui fait que les premières valeurs limites étaient exprimées sur la densité de puissance incidente.

Plus tard, les recherches se sont étendues à d'autres fréquences, ce qui a permis de mettre en évidence le fait que l'absorption des ondes par les tissus dépendait grandement de la fréquence (voir figure de l'encadré 1). Ce n'est donc pas l'énergie incidente qui est le paramètre important, mais plutôt la quantité d'énergie effectivement absorbée par les tissus. C'est pourquoi, à partir des années 1970, le SAR est devenu la grandeur de base limitant l'exposition aux radiofréquences.

Normes génériques d'exposition existantes

De nombreuses normes nationales d'exposition existent depuis plusieurs années aux USA (ANSI/IEEE C95.1/1991), en Allemagne (DIN VDE 848) et des Recommandations existent en Grande-Bretagne (NRPB : national radiation protection board).

Parmi les nombreux autres pays possédant des normes nationales, on peut citer la Suède, le Canada, l'Autriche, la Suisse, l'Australie, etc. Précisons cependant que la plupart de ces normes nationales sont d'application volontaire et non obligatoire. Dans les pays tels que la France ne disposant pas de norme, on se base généralement sur les recommandations de l'IRPA (Association internationale de radioprotection), publiées en 1988. L'évolution des normes en Europe est décrite dans l'encadré 4.

Toutes ces normes sont établies sur des principes similaires et présentent donc des limites proches les unes des autres. Elles sont basées sur l'effet thermique des rayonnements avec une marge de sécurité.

Encadré 4 - Evolution récente des normes en Europe

Le comité technique 111 du CENELEC vient de finaliser une norme en deux parties sur l'exposition humaine aux champs, qui a été officiellement publiée en janvier 1995 : l'ENV 50166-1 traite des basses fréquences (0 Hz à 10 kHz) et l'ENV 50166-2 des hautes fréquences (10 kHz à 300 GHz). C'est une prénorme d'application volontaire (ENV), qui peut être transformée en norme européenne harmonisée (EN) au bout de 2 ans. Elle est en cours de publication comme prénorme française.

Dans le même temps, la DG 5 de la CEE prépare une directive européenne, qui doit être avalisée par le Parlement européen, sur la protection des travailleurs vis-à-vis des agents physiques, avec un chapitre sur les rayonnements non ionisants. Sa publication effective ne semble pas imminente mais, une fois finalisée, cette directive sera d'application obligatoire.

Les effets non thermiques n'y sont donc pour l'instant pas pris en compte. La raison en est l'absence de résultats avérés et confirmés montrant un impact négatif du champ chez l'homme.

Contenu des normes génériques d'exposition

Ces normes qui visent à protéger les personnes comportent deux classes de limites :

- limites supérieures pour les travailleurs (médicalement suivis et informés des risques),
- limites plus sévères pour le grand public (population incluant les malades, les jeunes enfants, personnes non informées de la présence de champ).

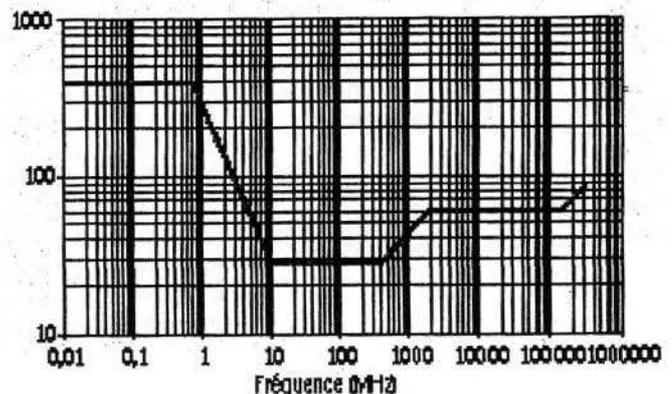
Restrictions de base

A partir du seuil thermique de 4 W/kg, un facteur de sécurité de 10 est appliqué pour les travailleurs et un facteur supplémentaire

de 5 pour le grand public. Les limites de base sont, pour le SAR moyen sur l'ensemble du corps, de 0,4 W/kg pour les travailleurs (ce qui correspond aux zones contrôlées dans la norme américaine) et de 0,08 W/kg pour le grand public (zones non contrôlées dans la norme américaine).

Limites dérivées

Les normes comportent des limites dérivées en grandeurs facilement mesurables (champ électrique, champ magnétique et densité surfacique de puissance incidente) qui, si elles sont respectées, garantissent la conformité aux restrictions de base. Ces limites variables selon la fréquence ont été déterminées expérimentalement sur des animaux exposés uniformément en champ lointain, puis extrapolées à l'homme. La figure ci-dessous donne, à titre d'exemple, la limite en champ électrique pour le grand public, contenue dans la norme européenne ENV 50166-2.



Limite dérivée en champ électrique pour le grand public de l'ENV 50166-2 (CENELEC).

Cependant, on s'aperçoit de plus en plus que ces limites dérivées définies en champ lointain ne sont utiles que pour déterminer le risque ou l'absence de risque, mais qu'elles sont inadaptées en champ proche (personne située près de l'appareil rayonnant).

Cas des téléphones mobiles

Par rapport aux autres sources généralement étudiées (radars, émetteurs de radiodiffusion, stations de base, etc.), les téléphones mobiles se caractérisent par une faible puissance d'émission, une exposition très inhomogène de l'utilisateur (importante près de la tête, nulle aux pieds) et une exposition en champ très proche.

Lorsqu'on leur applique les normes génériques citées précédemment, on constate qu'elles respectent largement la restriction de base du SAR moyenné sur le corps entier (0,08 W/kg pour le public) et que la restriction de base la plus critique est la limitation du SAR local. Il s'agit d'une limite en SAR moyenné dans tout élément d'une masse donnée de tissu. Elle vise à éviter un échauffement localisé des tissus. Cette notion de point chaud ("hot spot") est héritée des fréquences optiques (laser) et sa validité pour des fréquences inférieures n'est pas évidente.

Les restrictions existantes diffèrent grandement selon les normes :

	SAR max	masse de l'élément
Recommandations IRPA (1988)	1 W/kg	100 g
Norme US IEEE-ANSI (1991)	1,6 W/kg	1 g
Recommandation anglaise NRPB (1993)	10 W/kg	10 g
Norme CENELEC ENV 50166 (1995)	2 W/kg	10 g

A la fin de l'année 1993, la Commission européenne (DG 13) a donné mandat au TC 111 du CENELEC de rédiger une norme devant définir les "Prescriptions de sécurité concernant les effets thermiques des rayonnements pour les équipements mobiles de télécommunication de 30 MHz à 6 GHz", ce qui inclut bien évidemment les téléphones mobiles. Les travaux sont en cours et les premiers projets de norme devraient voir le jour fin 1995.

Conclusions

Le renouveau actuel des études concernant les effets sur la santé des micro-ondes est dû au développement rapide de la téléphonie mobile. Les résultats déjà publiés ne permettant pas de conclure sur l'innocuité d'expositions humaines, des expérimentations nouvelles ont été lancées. Ces études s'inscrivent dans le cadre du bioélectromagnétisme, discipline pluridisciplinaire récente dont le développement devrait continuer dans les prochaines années : la recherche de base sur les effets biologiques des RF est maintenant financée à un niveau élevé aux USA et à un moindre degré en Europe. Des progrès importants ont été enregistrés récemment en modélisation et en dosimétrie. Des données scientifiques seront progressivement produites qui permettront de vérifier le bien fondé des normes d'exposition.

Références

G. d'Ambrosio, R. Massa, M. B. Lioi, M. R. Scarfi, and O. Zeni [1993], "Genotoxicity of microwaves," in *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*, M. Blank Ed, San Francisco Press, pp. 646-648. O. Kolomytkin, V. Kusnetsov, M. Yurinska, S. Zharikov, and A. Zharikova [1994], "Response of brain receptor systems to microwave energy exposure," in *On the Nature of Electromagnetic Field Interactions with Biological Systems*, Frey Ed., Landes Co, pp. 194-206.

H. Lai [1994], "Neurological effects of radiofrequency electromagnetic radiation," in: *Advances in electromagnetic Fields in Living Systems*, Lin J. C. Ed, vol. 1, pp. 27-80.

H. Lai, and N. P. Singh [1995], "Acute low intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells," *Bioelectromagnetics*, **16**, pp. 207-210.

T. A. Litovitz, D. Krause, M. Penafiel, E. C. Elson, and J. M. Mullins [1993], "The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity," *Bioelectromagnetics*, **14**, pp. 395-403.

A. Maes, L. Verschaeve, A. Arroyo, C. Dewagter, and L. Vercruyssen [1993], "In vitro cytogenetic effects of 2 450 MHz waves on human peripheral blood lymphocytes," *Bioelectromagnetics*, **14**, pp. 495-501.

M. L. Meltz [1995], "Biological effects versus health effects: an investigation of the genotoxicity of microwave radiation," in *Radiofrequency Radiation Standards; Biological effects, Dosimetry, Epidemiology, and Public health policy*, Klauenberg, Grandolfo and Erwin Eds, Plenum Press Nato ASI series. Series A: Life Sciences **274**, pp. 235-241.

P. Polson and L. N. Heynick [1995],
"Overview of the RF radiation bioeffects
database," in *Radiofrequency Radiation
Standards; Biological effects, Dosimetry,
Epidemiology, and Public health policy*,
Klaunberg, Grandolfo and Erwin Eds,
Plenum Press, Nato ASI series. Series A:
Life Sciences **274**, pp. 311-326.

L. G. Salford, A. Brun, K. Stureson,
J. L. Eberhardt, and B. R. R. Persson [1994],
"Permeability of the blood brain barrier
induced by 915 MHz electromagnetic
radiation, continuous wave and modulated
at 8, 16, 50 and 200 Hz", *Microsc. Res.
Tech.*, **27**, pp. 535-542.

G. Mur "Absorbing boundary conditions
for the finite difference approximation of
the time domain electromagnetic field
equations" *IEEE transactions on
Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC
23, pp. 377-382, nov. 1981.

J. P. Berenger "A perfectly matched layer
for the absorption of electromagnetic
waves" *journal of computational physics*.
vol. 114, n° 2, p. 185-200, oct. 1994.

ENV 50166-2 European prestandard
"Human exposure to electromagnetic
fields - High frequency (10 kHz to 300
GHz)", January 1995.

Commission of the European Communities
"Proposal for a council directive on the
minimum health and safety requirements
regarding the exposure of workers to the
risks arising from physical agents",
December 23, 1992.

International radioprotection association
(IRPA), "Guidelines on limits of exposure to
radiofrequency electromagnetic fields in
the frequency range from 100 kHz to
300 GHz", *Health Physics* vol. 54, n° 1,
January 1988.

ANSIEEE C95.1, "IEEE standard for safety
levels with respect to human exposure
to radio frequency electromagnetic fields,
3 kHz to 300 GHz", 1991.