Les ondes de téléphonie mobile

I – Dosimétrie et exposition des personnes

Dossier établi par la rédaction de *Reflets de la physique* (sfp-bulletin@ihp.fr) et la commission « Culture scientifique » de la SFP.

Notre environnement est largement envahi par les ondes radiofréquence, dans les domiciles, lieux de travail et espaces publics. À l'heure actuelle, plus de trois milliards d'êtres humains disposent d'un téléphone portable.

Or, l'utilisation des ondes de téléphonie mobile présente deux caractéristiques qui suscitent des interrogations en matière de santé : la multiplication des antennes dans l'environnement proche, et le fait que le combiné et son antenne sont très près de la tête de l'utilisateur.

Cet article fait le point sur la méthodologie et les résultats des études d'évaluation des niveaux d'exposition induits par les téléphones portables et leurs antennes relais.

Les effets biologiques et sanitaires des ondes de téléphonie mobile seront approfondis dans un second article.

Les termes suivis d'un astérisque (*) sont définis dans le glossaire.

En 2010, 82 % des Français de 12 ans et plus sont équipés d'un téléphone mobile personnel ou professionnel, et la majorité de ces utilisateurs jugent que le mobile facilite leur vie quotidienne [1]. En contraste avec cet engouement, les sondages récents effectués par TNS Sofres pour l'Association française des opérateurs mobiles (AFOM) [1] montrent que ~ 30 % des Français sont convaincus que les téléphones portables et leurs antennes relais présentent des risques pour la santé. La majorité des autres personnes consultées pensent qu'on n'a pas aujourd'hui la preuve d'un danger, mais qu'on manque de recul. Seuls 5 % considèrent qu'il n'est pas dangereux de vivre près d'une antenne relais. Il est à noter que seulement 13 % des Français estiment que « la vérité est dite » sur les antennes relais de téléphonie mobile, et seulement 21 % font confiance aux autorités pour les protéger des risques liés à ces installations [2].

Il existe un débat scientifique sur les effets biologiques des ondes radiofréquence émises par les téléphones portables et leurs antennes relais, et sur leurs conséquences sanitaires éventuelles. Mais la controverse a récemment débordé de l'univers scientifique, impliquant de nouveaux acteurs (élus, juges, associations, industriels...). Deux opinions s'opposent sur l'innocuité de ces ondes, l'une s'appuyant sur l'absence d'effets sanitaires avérés pour souhaiter un maintien des niveaux de protection actuels, l'autre estimant qu'il est urgent de mettre en œuvre le principe de précaution en révisant ces niveaux à la baisse, pour éviter une catastrophe sanitaire [3, 4].

L'objectif de cet article est de fournir aux lecteurs de *Reflets de la physique* des éléments d'information objectifs sur l'exposition de la population, et de contribuer ainsi à une clarification du débat. Il s'appuie largement sur un article récent de J. Wiart et A. Bravo [5], ainsi que sur les rapports de l'AFSSET* [3], de l'OPEST* [4] et des Académies [6].

Les réseaux de téléphonie mobile

La téléphonie mobile repose sur la transmission de la voix ou d'informations, à l'aide d'ondes radiofréquence, entre le combiné (téléphone mobile de l'utilisateur) et une station de base (antenne relais). Cette dernière permet au mobile de se connecter au réseau. Les stations de base et les équipements terminaux sont à la fois émetteurs et récepteurs.

Afin de garantir une bonne couverture du territoire, les antennes relais sont implantées sur des zones, les cellules, qui en assurent un pavage imaginaire (fig. 1). La distance entre deux antennes varie de quelques centaines de mètres en zone dense à quelques kilomètres en zone peu dense.

Les systèmes de téléphones sans fil domestiques DECT* sont constitués d'une base fixe reliée au réseau et d'un ou plusieurs combinés. La technologie Wi-Fi* utilise aussi des bornes d'accès pour communiquer avec des ordinateurs portables.

La puissance rayonnée par les différents systèmes de téléphonie mobile est liée à la gestion du partage des ressources spectrales.

Quelques sources d'ondes radiofréquence.

De gauche à droite : antenne relais ; ordinateur portable (Wi-Fi) ; téléphone sans fil DECT ; four micro-onde ; téléphones mobiles 2G ou 3G.

Dans le cas du système de téléphonie mobile le plus employé, le GSM*, ou des téléphones DECT, plusieurs utilisateurs (8 pour le GSM) partagent la même bande de fréquence : un téléphone mobile de type GSM n'émet donc qu'un huitième du temps et, si sa puissance crête est de 1 watt, sa puissance moyenne émise est de 125 mW. Dans le cas du système mobile de 3^e génération UMTS*, le partage est réalisé par étalement du spectre. Dans le cas du Wi-Fi, le partage est beaucoup moins bien organisé : les systèmes écoutent, émettent s'il n'y a personne et recommencent s'il y a collision.

Un système de contrôle de puissance au niveau du mobile et de la station de base optimise les puissances émises afin d'éviter les interférences entre utilisateurs et de réduire les consommations énergétiques. Certains systèmes (par exemple le DECT et le Wi-Fi) n'ont pas de contrôle de puissance.

>>>

Glossaire

Organismes d'évaluation

AFSSET

Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail. Depuis juillet 2010, elle est intégrée dans l'ANSES (www.anses.fr).

ANFR

Agence nationale des fréquences (www.anfr.fr).

ICNIRP

International Commission for Non Ionizing Radiation Protection (www.icnirp.org). Organisme international non gouvernemental, composé d'experts scientifiques indépendants, chargé de faire des recommandations pour la sécurité de l'utilisation des rayonnements non ionisants.

OPECST

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

Systèmes de communication sans fil

DECT

Digital Enhanced Cordless Telephone. Norme de téléphonie sans fil numérique, de portée limitée (~ 100 m), largement utilisée en Europe pour les téléphones d'intérieur.

GSM (ou 2G)

Global System for Mobile Communications. C'est, en Europe, la principale norme numérique (dite de « 2^e génération ») pour la téléphonie mobile.

UMTS (ou 3G)

Universal Mobile Telecommunications System. Actuellement en cours de déploiement, c'est la principale norme cellulaire numérique européenne de troisième génération. Elle offre des débits de transmission nettement plus élevés que la technologie GSM.

Wi-Fi

Technologie qui permet de relier, sans fil, plusieurs appareils informatiques au sein d'un réseau à haut débit.

Deux cellules non adjacentes peuvent réutiliser les mêmes canaux de transmission (fréquences)

1. Réseau cellulaire de téléphonie mobile. (Source : AFSSET [3]).

Interaction des ondes de radiofréquence avec les tissus biologiques

Les ondes de téléphonie mobile se situent dans le domaine des radiofréquences (10 MHz – 10 GHz, voir encadré), ce qui est très inférieur au seuil d'ionisation des atomes ($> 10^{14}$ Hz) au-delà duquel les photons peuvent induire des mutations génétiques.

Quand un tissu biologique est exposé à une onde électromagnétique non ionisante, une partie de l'énergie transportée par cette onde est réfléchie et une autre est absorbée. C'est cette dernière qui est à l'origine d'éventuels effets biologiques et sanitaires. Pour des fréquences supérieures à 10 MHz, le principal effet macroscopique de cette absorption est un échauffement des tissus résultant de la perte diélectrique des molécules d'eau mises en oscillation par le champ électrique alternatif.

La grandeur physique caractérisant l'absorption des radiofréquences est le « débit d'absorption spécifique » (DAS), qui mesure la puissance absorbée par unité de masse. Le DAS dépend de la puissance totale reçue, ainsi que de la fréquence du rayonnement, car les tissus biologiques sont des matériaux dispersifs et à perte [7]. Exprimé en watts par kilogramme, il est proportionnel au carré du champ électrique E et à la conductivité électrique σ des tissus, et inversement proportionnel à leur masse volumique ρ :

$$\text{DAS} = \sigma E^2 / \rho.$$

Le DAS est une grandeur définie localement (en général, moyennée sur une masse de 10 grammes), qui dépend des propriétés du tissu concerné, en particulier de sa conductivité électrique. Mais on utilise également un DAS « corps entier », moyenné sur l'ensemble du corps humain.

Valeurs limites d'exposition recommandées

Les niveaux de protection applicables en France (décret 2002-775 du 3 mai 2002) ont été établis en 1998 et confirmés en 2009 [8] par la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP*). Tous les équipements de télécommunications mis sur le marché doivent respecter ces normes. L'ICNIRP a défini deux types de limites : les restrictions de base et les niveaux de référence.

Les « restrictions de base » sont des valeurs limites du DAS, qui garantissent l'absence d'effets biologiques néfastes pour la santé. Dans le domaine des radiofréquences, les seuls effets sanitaires avérés (altération du comportement chez les rats, par exemple) sont d'origine thermique. Chez l'homme, le seuil d'apparition d'un effet thermique correspond à une hausse de 1°C de la température corporelle, c'est-à-dire un DAS sur le corps entier de 4 W/kg environ. En dessous de cette valeur, le système de thermorégulation de l'organisme exposé est capable de maintenir la température corporelle, car la vascularisation des tissus biologiques permet l'évacuation de la chaleur [3]. Par mesure de sécurité, le niveau d'exposition maximal a été fixé pour le grand public à 1/50 de cette valeur, soit 0,08 W/kg pour le corps entier et, localement, 2 W/kg pour 10 grammes de tissu contigu. Pour les travailleurs, ces recommandations sont de 0,4 W/kg pour le corps entier et de 10 W/kg localement. Il s'agit là de valeurs moyennes obtenues sur un intervalle de 6 minutes, compte tenu du temps de réponse de l'organisme à un effet thermique.

En pratique, l'évaluation de l'exposition des personnes se fait différemment pour les téléphones mobiles et les antennes relais. Pour les mobiles, la distance à la

source est plus faible que la taille du corps : la répartition spatiale des champs électromagnétiques à l'intérieur du corps est hétérogène et l'analyse en DAS local s'impose. Mais pour les antennes, l'exposition se faisant à grande distance de la source, la puissance absorbée est faible et il devient très difficile d'évaluer le DAS. C'est pourquoi d'autres grandeurs, plus faciles à mesurer, comme le champ électrique qui est alors uniforme sur le corps, sont utilisées. On a ainsi pu définir des « niveaux de référence », en dessous desquels une personne exposée ne subira pas une exposition, en watts par kilogramme, supérieure aux restrictions de base. Par exemple, pour les antennes relais du système GSM 900*, la valeur limite d'exposition en champ électrique recommandée par l'ICNIRP est de 41 V/m.

Les valeurs limites d'exposition définies par l'ICNIRP ont été remises en cause par certaines associations (par exemple, en France, l'association Robin des Toits), au motif qu'elles ne prennent en compte ni les effets non thermiques, ni les effets à long terme des radiofréquences. Ces associations s'appuient en particulier sur le rapport BioInitiative [9], publié en 2007, qui plaide pour de nouvelles valeurs limites d'exposition révisées à la baisse, compte tenu de l'existence possible d'effets biologiques d'origine non thermique, pouvant par exemple entraîner des cancers. Plusieurs analyses approfondies de ce rapport par des groupes d'experts indépendants ou des organismes officiels montrent qu'il présente des faiblesses méthodologiques importantes, et que ses conclusions sont en contradiction avec la quasi-totalité des études scientifiques de qualité [3]. En particulier, la demande de réduction à 0,6 V/m de la valeur limite d'exposition aux ondes des antennes relais n'est, à l'heure actuelle, pas justifiée scientifiquement [5, 10].

Les effets sanitaires potentiels des ondes de radiofréquence ont donné lieu à plus de 600 études, indexées dans la base de données de l'Organisation Mondiale de la Santé, et dont les résultats sont évalués régulièrement par des groupes d'experts (AFSSET/ANSES en France). Aujourd'hui, « aucune preuve convaincante d'un effet [sanitaire] particulier des radiofréquences n'est apportée pour des niveaux d'exposition non thermiques, dans les conditions expérimentales testées » [3], donc en dessous des niveaux de protection recommandés par l'ICNIRP. Toutefois, les experts s'accordent pour

► Quelques chiffres

Fréquences des ondes de téléphonie mobile :

elles se situent dans le domaine des micro-ondes, de 0,9 et 1,8 GHz (téléphones cellulaires GSM) à 1,9 GHz (téléphones cellulaires UMTS et téléphones d'intérieur DECT) et 2,4 et 5 GHz (Wi-Fi). Les longueurs d'onde correspondantes sont de quelques centimètres (32 cm à 900 MHz).

Puissances émises :

0,01 W (DECT), 0,1 W (émetteur Wi-Fi), 0,25 W (UMTS), 1 à 2 W (GSM), 1 à quelques dizaines de watts (antennes relais).

Portées approximatives :

100 à 500 m (Wi-Fi et DECT), 10 km (téléphones cellulaires), 500 m à 10 km (antennes relais).

2. Rayonnement typique d'une antenne de téléphonie mobile. Les couleurs correspondent à des niveaux d'amplitude du champ émis. La couleur rouge foncé, très localisée, correspond à des niveaux de champ supérieurs aux limites ICNIRP. On voit que les lieux de vie les plus exposés se situent au niveau des étages supérieurs de l'immeuble B (Source : ANFR).

reconnaître que, s'agissant du téléphone mobile, l'absence de recul par rapport aux effets à long terme et aux expositions de très longue durée (> 10 ans) ne permet pas d'exclure l'hypothèse d'un risque sanitaire et justifie la poursuite des études.

Niveaux d'exposition induits par les stations de base (antennes relais)

Les antennes relais de téléphonie mobile sont au cœur de nombreuses discussions.

Pour permettre aux utilisateurs en limite de zone de recevoir un signal d'aussi bonne qualité que ceux se trouvant près des antennes, celles-ci sont très souvent directionnelles. Cette propriété est à l'origine de « l'effet parapluie » : quand une antenne est sur un toit d'immeuble, le niveau de champ en dessous ou au pied de l'immeuble est très faible (fig. 2). Le niveau d'exposition induit par les stations de base est usuellement exprimé en termes de champ électrique.

De nombreuses mesures de champ électrique ont été réalisées *in situ* selon le protocole de l'Agence nationale des fréquences (ANFR*). Tous les résultats sont publiés sur le site www.cartoradio.fr. Pour les antennes relais extérieures se trouvant sur les toits, les valeurs de champ deviennent inférieures aux limites de sécurité (41 V/m dans le cas du GSM 900) à des distances supérieures à quelques mètres devant les

antennes et quelques dizaines de centimètres sur les côtés. Des périmètres de sécurité sont donc installés pour éviter les surexpositions. Dans les lieux de vie, les niveaux d'exposition rencontrés sont en revanche très faibles. 97 % et 70 % des résultats de mesure sont inférieurs respectivement à 10 % et 2 % des valeurs limites d'exposition. Une étude récente [11] montre que l'exposition réelle est en moyenne de l'ordre du dixième de V/m. Ceci induit un DAS moyenné sur le corps entier de l'ordre de 100 000 fois inférieur aux recommandations de l'ICNIRP (la puissance étant proportionnelle au carré du champ).

Dans l'environnement domestique, les champs induits par les bornes d'accès DECT et Wi-Fi restent aussi en moyenne très faibles au regard des normes, même si à proximité de ces équipements le niveau d'exposition peut atteindre temporairement quelques V/m [5].

Niveaux d'exposition induits par les téléphones mobiles

Évaluation du débit d'absorption spécifique

Pour vérifier la conformité d'un téléphone mobile à la réglementation sanitaire, il est nécessaire de connaître le DAS maximal qu'il est susceptible d'induire dans un corps humain.

3. Simulation numérique du débit d'absorption spécifique sur un axe reliant les deux côtés d'une tête humaine, dans le cas de l'utilisation d'un téléphone mobile (en rouge : DAS moyen sur l'axe ; en vert : DAS $\pm$ écart type). (D'après J. Wiart et A. Bravo [5].)

Le DAS ne peut pas être mesuré directement *in vivo*. Il est donc évalué expérimentalement sur des mannequins en résine, selon une procédure encadrée par des normes internationales. Les mannequins sont remplis d'un liquide qui reproduit les propriétés électromagnétiques des tissus biologiques constituant la tête humaine. Une sonde plongée dans le liquide et pilotée par un robot mesure, en un ensemble de points localisés aux nœuds d'un maillage 3D, le champ électrique induit par le téléphone mobile émettant à puissance maximale dans les diverses positions représentatives de l'usage normal. À partir de ces mesures, il est ensuite possible de calculer le DAS. C'est le maximum des valeurs du DAS obtenues qui doit être comparé aux limites recommandées par l'ICNIRP, pour valider le mobile en cours de test.

Ces mesures expérimentales sont limitées aux milieux homogènes. Mais le corps humain est un milieu inhomogène complexe, que les progrès de l'informatique permettent maintenant de modéliser par simulation numérique avec une précision croissante.

La figure 3 montre que, dans le cas de l'utilisation d'un téléphone mobile, le DAS le plus important est localisé dans la peau, puis dans le lobe temporal, du côté où se trouve le téléphone ; il décroît au fur et à mesure de la pénétration dans la tête,

>>>

4. Variation absolue du DAS corps entier en fonction de la fréquence (20 MHz à 2400 MHz, onde plane incidente de $2,5 \text{ mW/m}^2$), calculé pour six modèles de corps humain adulte (un féminin et cinq masculins), différant par la taille, la morphologie et la proportion relative des types de tissus [13]. On notera que les fréquences utilisées en téléphonie mobile (900-2400 GHz) se situent nettement en dehors du pic d'absorption.

>>>

même si dans certains tissus, tel que le liquide céphalo-rachidien (LCR), la conductivité élevée peut induire des croissances locales de DAS.

Actuellement, la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) [12], basée sur la « discrétisation » volumique des tissus biologiques et des équations de Maxwell, est la plus utilisée pour évaluer les champs électromagnétiques et le DAS dans des environnements hétérogènes. La validité de tels calculs dépend essentiellement de la qualité, de la précision et de la représentativité des données d'entrée, c'est-à-dire du modèle anatomique (représentativité et niveau de discrétisation des tissus) [13] et du modèle de la source rayonnante.

Des modèles 3D du corps humain, ayant une résolution spatiale millimétrique, ont été utilisés pour évaluer la puissance absorbée par les différents tissus lors d'une exposition à une onde plane [13]. Comme le montre la figure 4, le DAS moyenné sur le corps entier dépend de la fréquence, et l'absorption est maximale autour de 70 MHz, c'est-à-dire lorsque la demi-longueur d'onde ($\sim 4 \text{ m}$) est du même ordre que la taille humaine.

La figure 4 montre aussi que l'absorption dépend de la morphologie. En particulier, pour un téléphone utilisé près de l'oreille, le cortex des enfants de moins de 10 ans est plus exposé que celui des adultes. Ceci est lié à un pavillon de l'oreille moins épais et à des épaisseurs de peau et de crâne plus petites chez ces enfants, comparativement aux adultes [5].

Connaissance actuelle de l'exposition [5]

Les mesures réalisées sur des mannequins en présence de téléphones portables, montrent que le DAS maximum sur 10 g est en moyenne inférieur à 1 W/kg (soit deux fois en dessous des limites recommandées par l'ICNIRP). Mais, quand le téléphone est utilisé dans un réseau, le contrôle de puissance fait que le téléphone portable n'émet pas en permanence au maximum : par exemple, la puissance émise est réduite afin de limiter le bruit radio. Le DAS réel de ces systèmes est donc plus bas que le DAS maximum [14]. Dans le cas du GSM, cette réduction est d'environ 40 % car, lors du passage d'une antenne relais à une autre au cours d'un déplacement, la puissance émise remonte au maximum pour redescendre ensuite. Dans le cas de l'UMTS, le DAS réel en usage près de l'oreille est de 1 % du DAS maximum, car le contrôle de puissance est très efficace et il n'y a pas de remontée à puissance maximum lors des changements de cellules.

Le DAS induit par les systèmes Wi-Fi dépend de l'occupation temporelle du canal, qui reste faible. Globalement le DECT, malgré sa puissance moyenne émise faible (10 mW), est une source d'exposition largement comparable à d'autres sources.

L'exposition dépend des usages. Par exemple, un mobile utilisé à 40 cm des yeux en position *walkie-talkie* induit une exposition 100 fois inférieure à celle résultant de l'utilisation de ce même mobile près de l'oreille.

Conclusion

Les situations des antennes relais et des téléphones mobiles sont très différentes. Il faut avoir à l'esprit que 10 minutes d'utilisation d'un téléphone portable GSM avec un DAS de $0,04 \text{ W/kg}$ correspondent à 15 jours d'exposition à une antenne relais à un niveau d'exposition de $0,6 \text{ V/m}$ [4].

Pour les stations de base et points d'accès, les mesures réalisées montrent que les niveaux d'exposition sont toujours très inférieurs (souvent des dizaines de milliers de fois) aux normes de protection : la plupart des experts ne retiennent donc pas l'hypothèse d'un risque pour la santé des populations. Il est à noter qu'une réduction de ces normes aurait pour conséquence paradoxale (et dommageable en termes de santé publique) une multiplication du nombre des antennes et/ou une augmentation de la puissance émise par les téléphones mobiles [2, 5].

Pour ces derniers, les études n'ont pas démontré l'existence d'effets sanitaires aux niveaux d'exposition rencontrés lors de l'utilisation. Cependant, pour des personnes ayant utilisé un mobile pendant plus de dix ans, les résultats actuels ne permettent pas d'exclure l'hypothèse d'un risque. Dans ces conditions, les experts recommandent des recherches complémentaires, notamment en direction des enfants [15]. Une mesure simple, comme l'établissement d'une distance de quelques dizaines de centimètres entre l'appareil et l'utilisateur, permettrait de réduire considérablement l'exposition. Le passage à la norme UMTS 3G est aussi un facteur favorable.

Il est essentiel que les recherches sur la dosimétrie des ondes de téléphonie mobile soient poursuivies, voire amplifiées, en collaboration avec les biologistes, en particulier pour les expositions de longue durée, y compris à faible dose. Les méthodes numériques doivent relever les défis liés à la diversité humaine et à la variabilité des morphologies, ainsi qu'à l'exposition à des sources et des ondes multiples. Il est nécessaire de mieux caractériser le lien entre exposition et puissance absorbée, c'est-à-dire entre les niveaux de référence et les restrictions de base. Par ailleurs, les experts auront de plus en plus à analyser la nature de risques émergents liés à l'utilisation conjointe de produits.

Enfin, pour rétablir la confiance de la population, il est indispensable de mettre en place une vigoureuse politique de communication sur les risques. Parmi les propositions de l'OPECST [4], on notera l'inscription du DAS sur les téléphones mobiles et la garantie de pouvoir faire procéder (rapidement et à titre gratuit) à la mesure des taux d'exposition. ■

Remerciements

Nous tenons à remercier Alain Bravo et Joe Wiart pour nous avoir permis de citer librement des passages de leur article, paru dans le numéro de mai 2010 de la *Revue de l'électricité et de l'électronique*.

Pour en savoir plus

- 1• Baromètre TNS Sofres 2010 pour l'AFOM, sur le téléphone mobile dans la société française : www.afom.fr/sites/default/files/CPTNS%20AFOM%2019%20octobre%202010%20.pdf
- 2• Baromètre IRSN 2010 sur la perception des risques et de la sécurité : www.irsn.fr/FR/base_de_connaissances/librairie/Publications-institutionnelles/Pages/barometre.aspx
- 3• « Les radiofréquences », rapport de l'AFSSET (2009) : www.afsset.fr/index.php?pageid=2456&parentid=424
- 4• « Les incidences éventuelles sur la santé de la téléphonie mobile », Rapport de l'OPECST (4 novembre 2009) : www.senat.fr/noticerap/2009/r09-084-1-notice.html
- 5• J. Wiart et A. Bravo, *Revue de l'électricité et de l'électronique* (mai 2010), pp. 111-117.
- 6• « Réduire l'exposition aux ondes des antennes relais n'est pas justifié scientifiquement », Rapport de l'Académie nationale de Médecine, de l'Académie des sciences et de l'Académie des Technologies : www.academie-sciences.fr/actualites/textes/ondes_17_12_2009.pdf
- 7• "Dielectric Properties of Body Tissues in the frequency range 10 Hz – 100 GHz" : <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>
- 8• "ICNIRP statement", *Health Physics* **97** (2009) 257-258.
- 9• "BioInitiative : A rationale for a biologically-based exposure standard for electromagnetic radiation" (31 août 2007), recueil d'articles indépendants, édité par D. Carpenter (Université d'Albany, USA) et C. Sage (Sage EMF Design) : www.bioinitiative.org/report/index.htm
- 10• J. Treiner, *Reflets de la physique*, **16** (2009) 23-24.
- 11• J.F. Viel *et al.*, *Environment International*, **35**, n°8 (2009).
- 12• http://en.wikipedia.org/wiki/Finite-difference_time-domain_method
- 13• E. Conil *et al.*, *Phys. Med. Biol.*, **53** (2008) 1511-1525.
- 14• J. Wiart *et al.*, *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, **42** (2000) 376-385.
- 15• En 2009, a été lancée une étude épidémiologique mondiale de 5 ans, « Mobi-Kids », dont le but est d'évaluer si les ondes de téléphonie mobile provoquent des tumeurs malignes dans le cerveau des jeunes ; voir le site : www.sante-radiofrquences.org