

# Champs et ondes GSM et santé : revue actualisée de la littérature

## *GSM fields and health : an updated literature review*

**J. Vanderstraeten**

Unité de Recherche en Santé au Travail et Toxicologie Environnementale, Ecole de Santé Publique, U.L.B.

### RESUME

*Les champs et ondes qui servent de support aux techniques de téléphonie (dont le GSM ou Global System for Mobile communication) et de communication Internet sans fil, sont par nature non ionisants. A ces fréquences, le seul mécanisme d'interaction identifié avec certitude à ce jour avec les tissus vivants, repose sur la transformation de l'énergie électromagnétique en énergie thermique au sein de ces tissus. Cependant, les données de la littérature actuellement disponibles ne permettent toujours pas d'exclure avec certitude la possibilité d'effets biologiques, voire sanitaires, pour des intensités d'exposition inférieures aux niveaux susceptibles de causer l'apparition des effets connus pour être thermoactivables. En termes de situation équivalente d'exposition aux champs et ondes GSM, les plus basses intensités éventuellement en cause correspondent en principe aux maxima auxquels l'utilisateur d'un téléphone cellulaire peut être exposé. Ces valeurs sont elles-mêmes supérieures d'au moins 3 à 4 ordres de grandeur à celles typiques de l'exposition à proximité d'antennes GSM. Enfin, des études épidémiologiques sont toujours en cours et devraient permettre, dans les années à venir, de lever les incertitudes évoquées quant à une possible augmentation du risque de certaines tumeurs de la tête chez l'utilisateur régulier et sur le long terme du téléphone mobile, en ce compris le GSM.*

*Rev Med Brux 2009 ; 30 : 416-24*

### ABSTRACT

*The fields and waves of wireless technologies (GSM or Global System for Mobile communication, Internet, etc.) are by nature not ionizing. At their frequencies, the only mechanism of interaction established to date with living tissues is the transformation of electromagnetic energy in thermal energy in tissues. However, the data of the currently available literature still do not allow to exclude with certainty the possibility of biological effects, and possibly health effects, for exposure intensities lower than the levels likely to cause effects known to be heat activable. In term of equivalent situation of exposure to the GSM fields and waves, the lowest intensities possibly in question correspond in theory to the maxima to which the GSM user can be exposed. These values themselves are at least 3 to 4 orders of magnitude above those commonly encountered in the vicinity of GSM base stations. Finally, epidemiological studies are always in hand and should allow, in the years to come, to raise the uncertainties evoked as for a possible increase in the risk of certain tumours of the head in regular user of the mobile phone, including the GSM.*

*Rev Med Brux 2009 ; 30 : 416-24*

*Key words : radiofrequency fields, microwaves, mobile phones*

### INTRODUCTION

Depuis plusieurs années déjà, l'utilisation sans cesse croissante des moyens de communication sans fil (téléphonie, Internet, etc.) pose la question du risque sur la santé que pourrait causer l'exposition aux ondes qui leur sert de support. En effet, l'"électrosmog" des

pays industrialisés expose régulièrement l'individu moyen à des niveaux d'intensité proches du milliwatt par mètre carré ( $\text{mW}/\text{m}^2$ )\* pour les seules fréquences de la bande UHF (*Ultra High Frequency*), soit entre

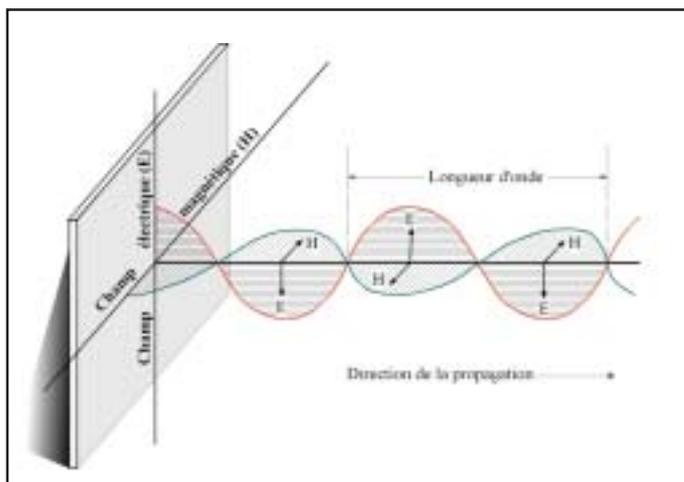
\* L'intensité d'exposition aux ondes électromagnétiques s'exprime en densité de puissance dont l'unité est le watt par mètre carré ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

300 mégahertz (MHz)\* et 3 gigahertz (GHz)<sup>1</sup>. En comparaison, l'intensité de l'exposition naturelle, essentiellement d'origine solaire, est de l'ordre de  $0,1 \mu\text{W}/\text{m}^2$  pour toutes les fréquences micro-ondes cumulées (300 MHz à 300 GHz). L'usage du téléphone cellulaire de type GSM (*Global System for Mobile communication*) quant à lui, expose l'utilisateur à l'équivalent de 1 à  $10 \text{ W}/\text{m}^2$  en moyenne. Depuis le début des années 80 déjà, cette question environnementale a motivé la réalisation de très nombreuses études, expérimentales d'abord, épidémiologiques ensuite. Parallèlement, les connaissances sur la biophysique d'interaction entre champs et ondes électromagnétiques et tissu vivant se sont affinées. Le présent article se propose de faire le point sur la situation actuelle des connaissances acquises en cette matière.

## QUELQUES DEFINITIONS

### Champs et ondes électromagnétiques

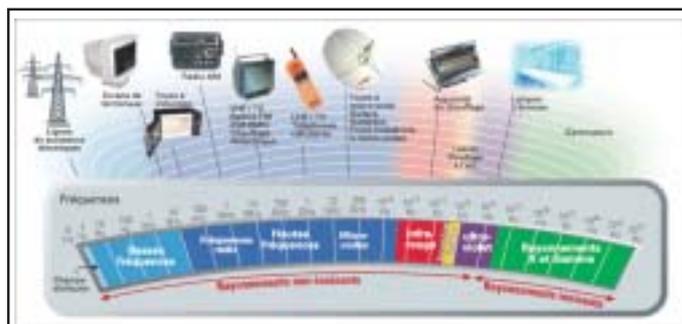
Les champs et ondes GSM s'inscrivent dans la partie infra-optique du spectre électromagnétique et sont donc non ionisants. L'onde ou rayonnement est constitué(e) des champs électrique (E) et magnétique (H) dont l'alternance dans le temps assure la propagation dans l'espace par un phénomène d'induction mutuelle (figure 1). Selon la distance à l'antenne émettrice et selon les dimensions relatives de celle-ci par rapport à la longueur d'onde du rayonnement, l'intensité d'une exposition donnée s'exprime soit en champ E dont l'unité est le volt/mètre (V/m) - c'est le cas de l'usage du combiné GSM, l'utilisateur étant alors dans la zone dite des "champs proches" - soit indifféremment en champ E ou en densité de puissance ( $\sim E \times H$ , en  $\text{W}/\text{m}^2$ ) - c'est le cas général de l'exposition à distance des antennes GSM, l'onde étant constituée. L'éloignement à la source détermine une décroissance de la densité de puissance en  $1/R^2$  et du champ E en  $1/R$ .



**Figure 1 :** L'onde électromagnétique est constituée des champs électrique et magnétique dont l'alternance dans le temps assure la propagation de l'onde dans l'espace par induction mutuelle. La longueur d'onde du rayonnement est inversement proportionnelle à sa fréquence. En 900 MHz, par exemple, elle est égale à 33 cm (d'après W. Pirard, ISSeP).

## Les fréquences GSM

Les champs et ondes qui servent de support au système GSM font partie de la bande UHF des radiofréquences. Celle-ci représente plus précisément la partie basse des fréquences micro-ondes (MO) qui s'étendent, elles, jusqu'à la limite inférieure des fréquences infrarouges, soit 300 GHz (figure 2). Les principales applications qui utilisent la bande des fréquences UHF dans notre pays sont : le réseau Astrid (400 MHz), la télévision analogique ( $\geq 45$  MHz) et numérique (jusqu'à 800 MHz), les systèmes GSM 900 et 1.800 (autour de 900 et 1.800 MHz), le téléphone domestique sans fil DECT (*Digital Enhanced Cordless Telephone* : autour de 1.900 MHz), l'UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System* : environ 2 GHz), les routeurs sans fil Wifi (*Wireless Fidelity* : 2,4 GHz) et, plus récemment, l'Internet par ondes (Wimax ou *Worldwide Interoperability for Microwave Access* : 3,5 GHz). On le voit donc, les fréquences UHF sont de plus en plus utilisées à l'heure actuelle. Or, parmi les radiofréquences, ce sont elles précisément qui posent le plus de questions quant à de possibles effets sur la santé. En effet, alors que nous sommes à peu près " transparents " au rayonnement de quelque 1 à 10 MHz du radio-amateur ou de l'émission radio dans un appareil de RMN, nous faisons par contre écran au rayonnement 10 GHz d'un faisceau hertzien (liaison grande distance par antennes paraboliques entre antennes GSM) dont l'énergie est totalement absorbée dans les tout premiers millimètres de la surface corporelle. Entre les deux se situe la bande UHF où l'absorption de l'énergie de l'onde a lieu précisément dans l'épaisseur de nos tissus. Ainsi, 99 % de la puissance totale du rayonnement GSM pénétrant sont absorbées dans les 3 et les 2 premiers centimètres d'épaisseur de nos tissus aux fréquences respectives de 900 et 1.800 MHz.



**Figure 2 :** Représentation du spectre électromagnétique avec quelques applications classiques des fréquences non ionisantes (copyright INRS).

## BIOPHYSIQUE D'INTERACTION

De nombreuses hypothèses ont été formulées quant à l'existence de mécanismes d'interaction autres que la transformation de l'énergie électromagnétique (EM) en énergie thermique, seul mécanisme établi à

\* La fréquence d'une onde s'exprime en hertz (Hz) ou nombre de cycles par seconde.

ce jour. Il semble donc utile de faire le point à ce sujet, au préalable.

## Absorption de l'énergie EM

Aux fréquences GSM, le champ EM pénètre le milieu intracellulaire, la membrane plasmique étant totalement transparente dès au-delà de quelque 10 MHz. A ces fréquences, les interactions du champ EM avec la matière vivante sont totalement caractérisées par celles du champ E. Celui-ci cause d'une part l'oscillation à même fréquence des charges mobiles à ces fréquences (ions) dans les milieux extra- et intra-cellulaires. Il s'ensuit un échauffement consécutif à l'effet Joule (pertes ohmiques), celui-ci existant d'ailleurs dès les plus basses fréquences et en champ statique. D'autre part, les molécules dipolaires mobiles à ces fréquences (l'eau essentiellement) voient leur dipole électrique osciller à même fréquence, mais avec déphasage et selon une amplitude d'oscillation nettement moindre que celle du champ E, de par l'effet freinateur du réseau moléculaire environnant (frictions, collisions). Il s'ensuit une transformation de l'énergie EM en chaleur, effective dès quelques centaines de MHz et qui va croissant avec la fréquence pour culminer vers 20 GHz à température corporelle. Ce phénomène dit de " pertes diélectriques " rend compte de l'absorption croissante de l'énergie EM avec la fréquence, elle-même responsable, à l'inverse, de la pénétration décroissante de l'onde avec la fréquence. L'énergie ainsi absorbée est exprimée en débit d'absorption spécifique ou " SAR " pour *specific absorption rate*, dont l'unité est le watt par kg de poids corporel (W/kg). Ainsi, en champ éloigné, une intensité d'exposition de 1 W/m<sup>2</sup> (champ E équivalent  $\sim 19$  V/m) détermine un SAR de 0,01 W/kg environ à la fréquence de 1 GHz. Par convention, toute valeur de SAR représente une valeur moyennée sur 10 grammes de tissus et sur 6 minutes de l'exposition considérée<sup>2</sup>.

## Mécanismes non thermiques ?

Motivés par la publication d'effets biologiques rapportés pour des valeurs de SAR inférieures à 4 W/kg, et donc susceptibles de ne générer qu'un faible échauffement tissulaire ( $< 1$  °C)<sup>2</sup>, de nombreux auteurs ont suggéré l'existence de mécanismes autres que la conversion de l'énergie EM en énergie thermique. Si de tels mécanismes existaient, ils remettraient également en cause la valeur du SAR comme seul et unique paramètre de dose reçue. Les principales hypothèses sont revues ici, sur base d'une revue exhaustive récemment publiée sur le sujet<sup>3</sup>.

### Effets directs des champs E et H ?

Sous exposition aux champs EM d'un téléphone cellulaire GSM en fonctionnement et tenu contre l'oreille, les champs E et H (exprimés en densité de flux magnétique) peuvent atteindre respectivement jusqu'à  $\geq 50$  V/m et  $\geq 0,1$  microtesla ( $\mu$ T)\* dans les tissus adjacents.

Hormis l'échauffement des tissus par les mécanismes de pertes évoqués ci-avant, aucun événement biologique significatif n'est attendu de par les mouvements de charges et de dipôles causés par l'oscillation d'un champ E aux intensités et fréquences considérées. En effet, d'une part, l'amplitude des oscillations ioniques causées est négligeable par rapport à celle due à l'agitation thermique à température corporelle. D'autre part, aucun impact de telles oscillations ne pourrait exister au niveau de la membrane plasmique (passage ionique transmembranaire, en particulier), tant de par leur fréquence élevée que de par l'intensité locale de champ nécessaire pour un tel événement, soit plus de 10<sup>4</sup> V/m en champ statique. Enfin, aucun impact n'est possible sur les interactions tant inter- qu'intramoléculaires par la quasi immobilité de tout dipôle moléculaire autre que celui de l'eau au-delà de quelques 10 MHz, et de par l'intensité des champs E en présence, supérieurs de plusieurs ordres de grandeur au champ E émis par le GSM.

Quant au champ H, il a été suggéré qu'aux fréquences UHF, il puisse avoir un impact sur les mécanismes retenus à ce jour pour la magnéto-réception animale, phénomène qui permet l'utilisation du champ géomagnétique pour l'orientation dans l'espace de certains animaux, et dont les substrats paraissent aussi exister chez l'Homme. D'une part, certaines réactions particulières avec intermédiaires radicaux libres voient leur cinétique influencée par des intensités de champ aussi faibles que celle du champ géomagnétique ( $\sim 50$   $\mu$ T sous nos latitudes). Or il a été montré que, par un mécanisme de résonance, des champs très faibles ( $< 1$   $\mu$ T) et de fréquence radio (1-10 MHz) perturbent l'impact du champ géomagnétique sur ces réactions et désorientent ainsi certains animaux magnétosensibles. Certains auteurs ont proposé que les fréquences GSM puissent ainsi causer une production accrue de radicaux libres. Mais c'est sans compter avec le fait que les radicaux considérés ici ne constituent que des produits intermédiaires nécessairement appariés<sup>4</sup>. Un impact serait éventuellement possible jusqu'à  $\sim 100$  MHz sur certains modèles théoriques de réactions productrices de radicaux libres, mais dont la réalité paraît improbable au sein de nos tissus. D'autre part, la magnéto-réception repose également sur des mécanismes liés à l'existence de cristaux de magnétite biogénique dans les tissus. De tels cristaux ont aussi été identifiés chez l'homme (cerveau notamment), et tout champ magnétique alternatif pourra, jusqu'à une certaine fréquence, causer une oscillation des dipôles magnétiques constitutifs des microcristaux et générer ainsi un échauffement local. Sous exposition à un GSM cependant, il a été évalué que cet échauffement ne dépasserait jamais quelque 10<sup>-5</sup> à 10<sup>-4</sup> °C<sup>3</sup>.

## Effets non linéaires ?

Les mécanismes responsables de la

\* L'unité de champ magnétique dans la matière, ou encore de densité de flux magnétique, est le tesla (T).

transformation de l'énergie EM en énergie thermique font appel à une dépendance directe et de premier ordre aux paramètres du rayonnement EM. Toute dépendance d'un autre ordre, si elle existait, pourrait rendre compte d'effets biologiques insuffisamment caractérisés par le seul SAR.

Un premier effet non linéaire, plausible, est la génération de fréquences dites "harmoniques" (multiples de la fréquence fondamentale) au sein des tissus, mais ceci est sans impact sur la validité du SAR en tant qu'unique paramètre de dose absorbée.

Un autre mécanisme non linéaire, souvent évoqué, est représenté par l'absorption moléculaire résonante. Si elle existait, elle pourrait rendre compte de l'existence d'effets pour des seuils de dose bien inférieurs à ceux propres aux effets strictement linéaires. Cependant, les fréquences vibratoires et rotationnelles moléculaires les plus basses se situent dans le spectre infrarouge ( $\geq 300$  GHz) et en tout cas, toujours  $> 150-180$  GHz.

Un troisième phénomène non linéaire, encore toujours évoqué par certains auteurs, est l'"extraction" (la démodulation) par nos tissus des basses fréquences contenues dans le signal GSM. Celui-ci est en effet constitué de "paquets" d'ondes 900 ou 1.800 MHz (fréquence fondamentale) pulsées ou modulées en amplitude à des fréquences plus basses (en particulier le 217 Hz). Cette hypothèse a été motivée par l'observation par certains auteurs d'effets biologiques plus marqués (pour un même SAR) sous exposition à des ondes pulsées comme celles du GSM, que sous exposition à des ondes dites "continues" (non pulsées). Cette hypothèse a également retenu l'attention de par la notion qu'aux basses fréquences (dont le 217 Hz), des champs E aussi faibles que 0,1 à 1 V/m pourraient dans certaines conditions influencer le comportement des neurones s'ils existent à proximité immédiate de la membrane plasmique<sup>5</sup>. Cependant, divers arguments rendent cette hypothèse caduque. D'une part, la membrane plasmique présente un comportement totalement linéaire dès au-delà de 10 MHz environ, or c'est à son niveau précisément que devraient à la fois pouvoir être démodulées et agir d'éventuelles basses fréquences. D'autre part, dans l'hypothèse où ils le pourraient quand même, nos tissus n'extrairaient au mieux que l'équivalent de  $\pm 0,01$  V/m en 217 Hz à partir de 50 V/m en micro-ondes modulées en amplitude à cette fréquence ( $\sim 0,25$  V/m pour une diode parfaite, c'est-à-dire sans pertes)<sup>3</sup>. Enfin, dans le cas du rayonnement à proximité d'antennes GSM, cette question est non pertinente puisque la part de puissance contenue dans les basses fréquences (217 à 650 Hz) ne représente que moins de 2 % de la puissance totale du signal<sup>6</sup>.

#### *SAR "hot spots"*

En certaines localisations particulières et de première importance biologique (membrane, ADN libre), le SAR est très localement jusqu'à 10 fois plus élevé

que dans le milieu environnant<sup>7</sup>. Ce phénomène est lié à la nature même de l'échauffement dû aux micro-ondes, celui-ci étant généré au sein des tissus en fonction des caractéristiques physico-chimiques de leurs divers éléments constitutifs. De par la conductivité thermique très élevée de nos tissus, ce phénomène n'induit cependant pas de gradient thermique local significatif. Pourtant la possibilité n'est pas exclue que l'impact éventuel de l'exposition sur les réactions biochimiques en cours soit plus important que ce que ne laisserait prédire la seule élévation de température causée<sup>8</sup>. C'est, en effet, ce que semblent indiquer les observations faites dans le cadre de la chimie assistée par micro-ondes, où pour une même élévation de température, la cinétique de réaction est supérieure si l'échauffement est obtenu par micro-ondes que par toute autre méthode. Cependant un tel effet, qui n'a d'ailleurs pas encore reçu d'explication, ne serait susceptible que d'abaisser quelque peu la valeur du SAR à partir de laquelle des effets thermoactivables peuvent être générés et donc n'aurait pas d'impact possible pour les intensités auxquelles nous sommes habituellement exposés.

#### *Effet spécifique au combiné GSM*

Il a été évalué que les champs magnétiques pulsés émis par la batterie des combinés GSM causent l'apparition de densités de courants induits qui peuvent transitoirement dépasser 1 ampère par mètre carré dans les tissus exposés. Bien que ce phénomène puisse générer certains effets biologiques, son impact possible n'a pas encore été réellement évalué<sup>9</sup>.

#### *En conclusion*

Bien que de nombreuses autres hypothèses aient été également formulées (solitons, résonance stochastique, oscillations cohérentes, etc.), aucun mécanisme d'interaction non thermique n'a pu être validé à ce jour, à tout le moins pour les intensités auxquelles l'individu de nos sociétés industrialisées est habituellement exposé.

## **EXPOSITIONS REPRESENTATIVES**

L'utilisateur du GSM qui tient son combiné contre l'oreille, reçoit au niveau de la tête un SAR qui dépend à la fois des caractéristiques d'antenne (facteur invariable qui dépend du modèle de GSM) et de la puissance émise (facteur variable qui dépend des conditions de communication). Ainsi, le SAR peut être inférieur à 0,01 W/kg en bonnes conditions de communication et peut atteindre 0,5 à 1 W/kg en mauvaises conditions<sup>10</sup>. Une indication approximative de la valeur maximale du SAR selon le modèle peut être obtenue sur l'un ou l'autre site Internet, pour les différents appareils GSM disponibles sur le marché<sup>11</sup>. La répartition du SAR en intracrânien se fait préférentiellement dans la région du lobe temporal homolatéral (50 à 60 %) ainsi que dans la région du cervelet<sup>12</sup>. A noter que l'élévation thermique au sein des tissus exposés est évaluée à 0,11 °C (valeur

obtenue pour 1,6 W/kg) en cours d'une communication, même prolongée, la sensation d'échauffement cutané étant en fait due au contact de la batterie de l'appareil et non pas au rayonnement de celui-ci<sup>13</sup>.

L'utilisateur de téléphone portable DECT reçoit en moyenne 0,02 à 0,05 W/kg. Quant à la station de base de ce même téléphone DECT, elle soumet un sujet distant d'un mètre et sans obstacle interposé à moins de 0,01 mW/kg. Dans les mêmes circonstances, le routeur d'un système Wifi soumet à moins de 0,1 mW/kg<sup>14</sup>. Enfin, dans le voisinage d'antennes GSM, il est rare de recevoir plus de 0,1 mW/kg<sup>15</sup>. A noter qu'un outil d'évaluation calculée de l'exposition à proximité d'antennes (GSM et autres) est disponible sur le portail Santé-Environnement du site Internet de la Fédération Inter-Environnement Wallonie<sup>16</sup>.

## EFFETS BIOLOGIQUES

Depuis le début des années 80, quantité d'études ont été réalisées sur les effets biologiques, et au-delà, les conséquences éventuelles sur la santé de l'exposition aux champs et ondes radiofréquence, dont en particulier ceux des fréquences de la bande UHF. Parallèlement, le débat a débarqué sur la place publique, entraînant souvent la dérive inévitable d'une lecture partisane et sélective des résultats publiés. Il en est ainsi du rapport *Bioinitiative*<sup>17</sup>, récemment paru sur Internet et dont les conclusions résolument alarmistes ont été abondamment relayées par les médias auprès de la population et du monde politique : tandis que certains chapitres présentent un contenu pondéré et critique, d'autres sont soit nettement orientés selon les convictions d'auteurs éventuellement en marge de la communauté scientifique, soit ne sont qu'une revue linéaire et non critique de la littérature publiée sur le sujet. A l'inverse, alors que le biais de non-publication d'études négatives est bien connu en sciences médicales, certains ont évoqué, dans le cas présent, une tendance systématique à la publication préférentielle de résultats négatifs lorsque l'étude a été financée par l'industrie<sup>18</sup>.

La présente revue de littérature est basée, par ordre de priorité et selon leur disponibilité respective, sur les données récentes suivantes : méta-analyse ; sinon revue critique de la littérature publiée dans un journal avec *peer review* ; revue critique publiée sur le site *Internet* d'une organisation scientifique reconnue et faisant autorité en la matière (exemple : site de l'IARC pour l'étude Interphone) ; base de données *EMF Portal*<sup>19</sup>, régulièrement actualisée quant aux publications relatives à cette matière.

### Effets génétiques

De nombreuses études ont été réalisées sur l'impact éventuel de l'exposition aux micro-ondes UHF sur l'intégrité du génome et sur l'expression génique en particulier, aussi bien *in vitro* (cellules humaines surtout) qu'*in vivo* (animaux surtout). Bien que constituant des méthodes très sensibles pour la

détection d'une éventuelle toxicité environnementale, ces types d'étude ne permettent pas d'appréhender les cascades successives d'événements biologiques et cellulaires et donc les éventuelles conséquences, *in fine*, sur la santé. Ces méthodes d'investigation permettent donc au mieux de formuler des hypothèses et d'orienter la recherche.

### Effets génotoxiques

Les effets étudiés repris ici ont été essentiellement les suivants : lésions de l'ADN, aberrations chromosomiques, micronoyaux (MN) et échange de chromatides sœurs (SCE). Sur base d'une revue critique publiée en 2005, Verschaeve<sup>20</sup> avait conclu à la possible fréquence accrue de MN et SCE à partir de 1 à 2 W/kg, en faisant remarquer au passage le caractère difficilement interprétable des résultats de nombreuses études. Dans une méta-analyse récente, sur 63 études publiées entre 1990 et 2005 (SAR compris entre 0,1 et > 10 W/kg), Vijayalaxmi et Prihoda<sup>21</sup> retrouvent 12 études non conclusives et 14 positives, mais ils notent que les résultats positifs ne dépassent jamais en intensité le taux de variation spontanée des lésions constatées et concluent donc à l'absence globale d'indication sérieuse pour de tels effets. Dans le cadre du projet européen REFLEX, Diem<sup>22</sup> a publié en 2005 des résultats qui reproduisent les observations faites de façon répétée par Lai<sup>23</sup> de lésions de l'ADN (SAR entre 0,6 à 2 W/kg) et qui n'avaient pas pu être reproduites de façon indépendante jusque-là. Cependant, des objections méthodologiques majeures ont été émises<sup>24</sup>, mettant sérieusement en doute la validité des résultats de Diem. Parmi les études relatives parues ensuite, soit depuis 2006, 12 portent sur les lésions d'ADN (étudiées par Comet Assay) et/ou sur les MN : une seule rapporte des résultats positifs pour ces deux points (SAR = 0,05 et 0,1 W/kg), tandis que les 11 autres sont négatives (SAR entre 0,08 à 2,2 W/kg)<sup>19</sup>. Globalement, un impact génotoxique paraît donc fort peu probable pour les niveaux d'exposition caractéristiques de l'usage d'un GSM. Aucun mécanisme plausible n'existe d'ailleurs pour expliquer un éventuel effet de ce type pour de telles valeurs de SAR.

### Expression génique

Dès 2000, de Pomerai<sup>25</sup> rapportait l'observation de l'induction de l'expression des gènes du système des protéines de choc thermique (*heath shock proteins* - HSP) sous exposition à des intensités très faibles, ou " athermiques ", de micro-ondes UHF<sup>25</sup>. En 2005, Cotgreaves<sup>26</sup> a revu les résultats des 31 études publiées depuis lors et traitant de l'expression de gènes spécifiques, dont ceux du HSP. Evoquant au passage le caractère souvent non interprétable des études positives (défauts méthodologiques, etc.), il conclut à l'absence d'indication sérieuse dans ce sens pour des intensités non thermiques. L'apparition de la génomique a permis depuis peu de procéder au *screening* simultané de plusieurs milliers à dizaines de milliers de gènes. Dans une récente revue critique<sup>8</sup>, sur 20 études publiées entre 1999 et 2007 (SAR entre 0,1 et

10 W/kg), huit jugées recevables rapportent des résultats positifs (augmentation de l'expression de certains gènes pour des valeurs de SAR = 0,4 à 10 W/kg). Malheureusement, aucun de ces résultats n'a pu faire l'objet de confirmation par tests complémentaires (étape jugée nécessaire en génomique) ni n'a montré de reproductibilité, même entre les mains d'un même auteur ou d'une même équipe. D'autre part, quelques auteurs ont simultanément étudié l'expression génique et certaines modifications phénotypiques qui en découlent, telles que l'expression protéique notamment. Ces dernières études n'ont généralement pas pu confirmer l'observation de modifications cohérentes telles qu'initialement rapportées par Leszczynski<sup>27</sup>. Enfin, la génomique n'a pas pu confirmer de réponse de type " stress " de la cellule aux micro-ondes telle qu'elle avait été suggérée auparavant. Une équipe de l'Université Blaise Pascal en France a récemment publié à quelques reprises l'observation d'une réponse de type " signal lésionnel " sous exposition à des champs 900 MHz pour des intensités d'exposition très faibles (5 et 40 V/m et donc SAR vraisemblablement < 0,1 W/kg)<sup>28</sup>. Mais il s'agit ici de plants de tomates et ces résultats n'ont pas été reproduits indépendamment à ce jour. En conclusion, l'ensemble des éléments disponibles à ce jour ne permet pas de supposer un impact sur l'expression génique pour des intensités d'exposition caractéristiques du GSM.

### Rongeurs exposés au long cours

Des rats et des souris ont été exposés durant des périodes prolongées et jusqu'à l'équivalent d'une durée de vie (1 à 22 heures/jour, 4 à 7 jours/semaine durant 4,5 mois à 2,5 ans). Les SAR étaient compris entre 0,01 W/kg et > 10 W/kg et divers signaux (dont celui du GSM) ont été utilisés. L'objectif ici est d'extrapoler à l'homme les éventuelles conséquences d'une exposition régulière, envisagée sur le très long terme.

Sur 32 études ayant investigué l'induction et la promotion de cancers et publiées entre 1982 et 2007, 3 ont rapporté des résultats positifs. Il s'agit en fait des 3 premières études à avoir été publiées sur le sujet, dont une étude par Repacholi<sup>29</sup>, qui fit beaucoup parler d'elle à l'époque de sa publication en 1997. Les résultats de ces études n'ont cependant jamais pu être reproduits depuis lors<sup>19,30,31</sup>. Par ailleurs, sur 20 études ayant investigué cette fois la mortalité, et publiées entre 1971 et 2007, 2 furent positives (mortalité accrue pour un SAR respectivement  $\geq 2$  et 6 W/kg). Mais les résultats de ces 2 études (de 1982 et 1994) n'ont pas pu être reproduits depuis lors<sup>19,30</sup>. En conclusion, les études disponibles à ce jour ne permettent pas de conclure à un impact sur la mortalité et l'incidence du cancer chez des rongeurs (rats, souris) exposés sur le long terme aux micro-ondes, en tout cas pour des niveaux de SAR inférieurs à quelques watts par kg. La question devrait cependant être posée du caractère extrapolable ou non à l'homme d'une valeur absolue de SAR pour ce qui concerne des résultats observés

sur des rongeurs. En effet, alors que le métabolisme basal chez l'homme est proche de 1 W/kg, celui du rat et de la souris atteint environ 8 W/kg.

### Etudes épidémiologiques

Tant pour des raisons historiques que d'intensité relative d'exposition, c'est la téléphonie mobile qui a le plus retenu l'attention des épidémiologistes parmi les sources d'exposition aux fréquences UHF. Alors que quelques études ont été publiées sur la prévalence de cancers, notamment, à proximité d'émetteurs radio, quelques-unes ont aussi été réalisées à proximité d'antennes de mobilophonie. Cependant, de telles études sont une gageure à proximité d'antennes GSM, de par l'impossibilité d'obtenir une dosimétrie satisfaisante, du moins de façon rétrospective. En effet, alors que l'exposition aux fréquences de l'ordre du MHz peut être modélisée assez simplement selon une loi en  $1/R^2$  par rapport à l'émetteur, il n'en va plus de même autour de 1 GHz où tout matériau génère atténuation, réfractions et/ou réflexions avec existence d'ondes stationnaires le cas échéant. Il s'ensuit une variabilité très importante de l'intensité d'exposition qui, en milieu intérieur, peut se voir sur des échelles de grandeur aussi petites qu'une demi-longueur d'onde du rayonnement (15 cm à 1 GHz). Par ailleurs, les intensités d'exposition typiques de ces situations (toujours < 0,1 à 1 mW/kg) en font une question non pertinente dans le présent débat, jusqu'à preuve du contraire.

### Tumeurs du cerveau chez les usagers du mobilophone

*Interphone* constitue une série multinationale d'études cas-témoins. C'est un projet qui a réuni des chercheurs dans plusieurs pays européens et extra-européens autour de la question de savoir si l'utilisateur régulier du téléphone mobile (dont le GSM, mais pas uniquement) est, ou non, plus à risque de développer une tumeur ou un cancer de la tête. La méthodologie suivie a été l'envoi de questionnaires d'une part à des sujets sains (population témoin) et d'autre part, à des sujets ayant présenté le type de tumeur étudiée (6.400 cas au total à ce jour), à savoir un méningiome ou un neurinome de l'acoustique (tumeurs bénignes), et un gliome ou une tumeur maligne de la glande salivaire parotide. Dans leurs méta-analyses respectives, Lahkola<sup>32</sup> et Schoemaker<sup>33</sup> concluent que dans les pays scandinaves (considérés dans leur ensemble), le risque relatif (RR), dérivé de l'*odd ratio* observé, est accru du côté de l'utilisation du téléphone après  $\geq 10$  années d'usage pour le schwannome de l'acoustique (RR = 1,8) et pour le gliome (RR = 1,4), respectivement. Dans une méta-analyse récente de 16 études cas-témoins appartenant ou non au projet *Interphone*, Hardell<sup>34</sup> se distingue en rapportant des chiffres plus élevés (RR = 2,4 et 2,0 respectivement). Dans une mise au point datant du 8 octobre 2008, l'IARC (*International Agency for Research against Cancer*)<sup>35</sup> relaie les résultats de toutes les études *Interphone* réalisées à ce jour et conclut que dans les pays non scandinaves et hormis une partie du

Royaume-Uni, aucune augmentation significative du risque n'apparaît pour l'ensemble des tumeurs investiguées. Des biais ont cependant été incriminés<sup>36</sup>, qui mettent en cause la validité des résultats obtenus, de par une possible sur- ou sous-évaluation. Ces biais sont liés à la sélection des individus de la population contrôle et à la mémorisation de l'usage du téléphone mobile par les sujets. Enfin, l'identification d'un éventuel niveau de SAR à risque, quant à elle, est non seulement prématurée, mais aussi extrêmement périlleuse à ce stade. En effet, d'une part, la méthodologie suivie par les études (enquêtes rétrospectives) ne permet pas d'estimer valablement une intensité moyenne d'exposition. D'autre part, les études qui rapportent des RR > 1, à savoir celles réalisées dans les pays scandinaves, reprennent notamment l'exposition liée à l'usage de téléphones mobiles au standard NMT (*Nordic Mobile Telephone*) qui génèrent des valeurs de SAR en moyenne plus élevées que les appareils GSM modernes, soit  $\geq 4$  W/kg environ<sup>37</sup>.

### Effets neuro-sensoriels chez l'homme

Plusieurs études ont tenté de mettre en évidence des signes objectifs ou subjectifs qui pourraient témoigner de l'existence de symptômes dus à l'exposition aux micro-ondes, voire d'une possible perception de celles-ci. Il a également été tenté de distinguer une éventuelle sensibilité accrue chez les personnes qui se déclarent " hypersensibles " à l'exposition aux micro-ondes. La prévalence de ce type de plaintes s'accroît en effet à l'heure actuelle, celles-ci étant essentiellement attribuées à la proximité d'antennes GSM. Les intensités d'exposition concernées font évoquer l'hypothèse de l'effet nocebo jusqu'à preuve du contraire.

#### *Perception des micro-ondes*

Dans une récente méta-analyse, Rööslä<sup>38</sup> a revu les études publiées entre 1998 et 2007, réalisées en double aveugle et qui ont investigué la capacité éventuelle des sujets en général et des sujets se déclarant " hypersensibles " de percevoir ou non la présence du rayonnement micro-ondes émis à proximité. Les SAR utilisés étaient compris entre 0,15 mW/kg et 12 W/kg. Parmi les 8 études publiées, 2 rapportent des résultats meilleurs que ceux obtenus par simple chance : d'une part, pour des sujets ne se déclarant pas hypersensibles (SAR = 0,3 W/kg) ; d'autre part, pour des sujets se déclarant hypersensibles (champ E = 10 V/m et donc, SAR vraisemblablement  $\leq 0,01$  W/kg). L'analyse des résultats par une méthode de méta-régression ne permet cependant pas de conclure à l'existence de résultats réellement significatifs. Ceci rejoint une conclusion identique faite précédemment par Rubin<sup>39</sup> sur base d'une méta-analyse de 31 études de provocation faites sur sujets " hypersensibles " aux champs électromagnétiques en général, toutes fréquences confondues. Rööslä<sup>38</sup> évoque cependant que les conditions d'un laboratoire (stress, environnement non

familier) ne sont pas idéales et pourraient influencer négativement les résultats de tels tests. Enfin, il n'exclut pas que certains sujets dans l'une ou l'autre étude puissent percevoir avec une probabilité assez supérieure à la chance. Enfin, il y a lieu de rappeler qu'à l'instar de l'exposition à d'autres facteurs physiques, si une capacité de perception existe pour un certain niveau d'exposition, celle-ci n'implique pas *de facto* que des effets délétères existent sur la santé dès un niveau équivalent.

#### *Symptômes liés à l'exposition aux micro-ondes*

Dans diverses études, les sujets exposés ont répondu à un questionnaire standardisé, les réponses permettant notamment de situer leur niveau de bien-être ou, au contraire, d'anxiété. Egalement des tests de capacités cognitives ont été réalisés et leurs résultats comparés entre sujets exposés et non exposés. Parmi 9 études publiées entre 2001 et 2007 (SAR 0,15 mW/kg à 1,5 W/kg), une seule rapporte une légère modification des scores d'anxiété et d'état d'éveil chez les sujets déclarés hypersensibles uniquement, sous exposition à un signal UMTS<sup>38</sup>. Par ailleurs, 3 études publiées entre 2006 et 2007 ont tenté d'évaluer l'incidence de symptômes en environnement réel à proximité de stations de base<sup>38</sup>. Les résultats de telles études sont cependant ininterprétables tant pour des raisons de biais de participation des personnes sollicitées et de suggestion (effet nocebo) que pour l'absence évoquée ci-avant de toute dosimétrie valide.

#### *Electrophysiologie cérébrale*

Ces études ont fait appel aux techniques de l'électroencéphalogramme, des potentiels évoqués, etc. Dans une récente revue, sur 29 études jugées " recevables " (réalisées au moins en simple aveugle), publiées entre 1995 et 2003, Valentini<sup>40</sup> retient 17 études avec résultats positifs (impact sur le rythme  $\alpha$  de l'EEG, notamment) pour des SAR compris entre 0,1 W/kg et 2 W/kg. Mais une absence de reproductibilité est notée, y compris entre différents résultats d'un même auteur. Egalement, 50 % des études sont réalisées en " simple aveugle ", et l'auteur note que le type d'effets étudiés nécessiterait en principe  $\geq 200$  sujets pour que les résultats atteignent une valeur statistique significative. Ainsi, si l'on ne retient que les études incluant  $\geq 20$  sujets et réalisées en double aveugle, seules deux sont positives. Par conséquent, aucune conclusion ferme ne peut être tirée à ce jour à cet égard.

### Effets divers et interférences

Plusieurs effets autres que ceux mentionnés ici ont été étudiés. La plupart ne modifient cependant pas les conclusions provisoires que l'on pourrait tenter de tirer à partir de la présente revue de la littérature.

#### *Effets sanitaires divers*

Un effet qui a notamment retenu l'attention est

l'augmentation possible de la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique, en particulier depuis les 4 publications dans ce sens de l'équipe de Salford où cet effet a été observé pour un SAR aussi bas que 0,02 W/kg<sup>41</sup>. Cependant, parmi 10 études publiées entre 2000 et 2007 par d'autres auteurs, 1 seule rapporte le même type d'observation tandis que les 9 autres (SAR = 0,25 à 5 W/kg) n'ont rien pu observer à cet égard<sup>19</sup>.

Divers autres effets ont été ou sont encore toujours étudiés, mais sans que des conclusions valides ne puissent être tirées. Ainsi, en interrogeant des mères de famille de façon rétrospective sur leur utilisation du GSM durant la grossesse, Divan<sup>42</sup> rapporte un risque accru (RR = 1,8) de troubles du comportement et d'hyperactivité chez les enfants des mères qui ont le plus utilisé leur GSM. Bien entendu, une telle observation doit faire l'objet de compléments d'études avant de pouvoir être soit confirmée, soit infirmée.

### Interférences

La norme de compatibilité électromagnétique IEC60601-1-2:2001 stipule que des appareils, tels que les appareils électro-médicaux supportant la vie, doivent pouvoir supporter des valeurs de champ électrique incident jusqu'à 10 V/m, entre 80 MHz et 2,5 GHz. Dans une revue de la littérature sur la question des interférences possibles entre téléphones cellulaires et pacemaker d'une part (14 études), et défibrillateurs implantables d'autres part (8 études), Francis<sup>43</sup> note qu'aucun dysfonctionnement péjoratif n'a été relevé. Mais certaines interférences ont malgré tout été rapportées lorsque le téléphone est en fonctionnement au voisinage immédiat de l'implant. Il en résulte que l'usage du GSM ne pose en principe pas de problème s'il se fait à l'oreille controlatérale, par exemple.

### CONCLUSIONS

Le seul mécanisme d'interaction confirmé à ce jour avec les tissus vivants à ces fréquences repose sur la transformation de l'énergie électromagnétique en énergie thermique au sein de ces tissus. Par ailleurs, les données de la littérature actuelle ne permettent pas non plus de supposer des effets spécifiques aux ondes pulsées du GSM, un SAR donné ayant même valeur quelles que soient la fréquence et l'application dans la bande UHF (300 MHz à 3 GHz).

Cependant, les données de la littérature actuellement disponibles ne permettent toujours pas d'exclure avec certitude la possibilité d'effets biologiques, voire sanitaires, pour des intensités d'exposition inférieures aux niveaux susceptibles de causer l'apparition des effets connus pour être thermo-activables. En termes de situation équivalente d'exposition aux champs et ondes GSM, les plus basses intensités éventuellement en cause correspondent en principe aux maxima auxquels

l'utilisateur d'un téléphone cellulaire peut être exposé. Ces valeurs sont elles-mêmes supérieures d'au moins 3 à 4 ordres de grandeur à celles typiques de l'exposition à proximité d'antennes GSM.

Egalement, certaines améliorations méthodologiques paraissent devoir être apportées pour l'étude de phénomène encore toujours hypothétique de "sensibilité" aux micro-ondes. Enfin, des études épidémiologiques sont toujours en cours et devraient permettre, dans les années à venir, de lever les incertitudes évoquées quant à une possible augmentation du risque de certaines tumeurs de la tête chez l'utilisateur régulier et sur le long terme du téléphone mobile, en ce compris le GSM. Entre-temps et depuis 2004 déjà, le Conseil Supérieur de la Santé recommande, en particulier aux enfants et adolescents, de suivre quelques règles simples pour un usage raisonnable du GSM<sup>44</sup>.

### BIBLIOGRAPHIE

1. Joseph W, Vermeeren G, Verloock L, Heredia MM, Martens L : Characterization of personal RF electromagnetic field exposure and actual absorption for the general public. *Health Phys* 2008 ; 95 : 317-30
2. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection 1998 : Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 1998 ; 74 : 494-522
3. Sheppard AR, Swicord ML, Balzano Q : Quantitative evaluations of mechanisms of radiofrequency interactions with biological molecules and processes. *Health Phys* 2008 ; 95 : 365-96
4. Timmel CR, Henbest KB : A study of spin chemistry in weak magnetic fields. *Phil Trans R Soc Lond A* 2004 ; 362 : 2573-89
5. Weaver JC, Vaughan TE, Adair RK, Astumian RD : Theoretical limits on the threshold for the response of long cells to weak extremely low frequency electric fields due to ionic and molecular flux rectification. *Biophys J* 1998 ; 75 : 2251-4
6. Stockbroeckx B : Les composantes à très basses fréquences dans les systèmes de radiocommunication. Annexe 1 à la publication du Conseil Supérieur de la Santé n° 8194, 2007
7. Vanderstraeten J, Vander Vorst A : Theoretical evaluation of dielectric absorption of microwave energy at the scale of nucleic acids. *Bioelectromagnetics* 2004 ; 25 : 380-9
8. Vandersaeten J, Verschaev L : Gene and protein expression following exposure to radiofrequency fields from mobile phones. *Environ Health Perspect* 2008 ; 116 : 1131-5
9. Jokela K, Puranen L, Sihvonen A : Assessment of the magnetic field exposure due to the battery current of digital mobile phones. *Health Phys* 2004 ; 86 : 56-66
10. Wiart J, Dale C, Bosisio AV, Le Cornec A : Analysis of the influence of the power control and discontinuous transmission on RF exposure with GSM mobile phones. *IEEE Trans Electromagn Compat* 2000 ; 42 : 376-84
11. <http://www.mobile-phones-uk.org.uk/sar.htm> ou <http://www.mmfa.org/public/sar.cfm> (consultés en date du 3 novembre 2008)
12. Cardis E, Deltour I, Mann S *et al.* : Distribution of RF energy emitted by mobile phones in anatomical structures of the brain. *Phys Med Biol* 2008 ; 53 : 2771-83

13. Van Leeuwen GMJ, Lagendijk JJW, Van Leersum BJAM, Zwamborn APM, Hornsleth SN, Kotte ANTJ : Calculation of change in brain temperature due to exposure to a mobile phone. *Phys Med Biol* 1999 ; 44 : 2367-79
14. Kühn S, Lott U, Kramer A, Kuster N : Assessment of human exposure to electromagnetic radiation from wireless devices in home and office environments. [http://www.who.int/peh-emf/meetings/archive/bsw\\_kuster.pdf](http://www.who.int/peh-emf/meetings/archive/bsw_kuster.pdf) (consulté en date du 3 novembre 2008)
15. Pirard W : Conclusion de l'étude menée par l'ISSEP concernant les champs électromagnétiques à proximité des antennes relais de mobilophonie. Institut Scientifique de Service Public, 2000
16. Vanderstraeten J : Evaluation de l'exposition aux micro-ondes à proximité d'antennes émettrices. Référence aux recommandations existantes. [http://www.sante-environnement.be/IMG/pdf\\_Calcul\\_expos\\_Micro-ondes.pdf](http://www.sante-environnement.be/IMG/pdf_Calcul_expos_Micro-ondes.pdf) (consulté en date du 3 novembre 2008)
17. BioInitiative Report : <http://www.bioinitiative.org/report/index.htm> consulté en date du 3 novembre 2008
18. Huss A, Egger M, Hug K, Huwiler-Müntener K, Rössli M : Source of funding and results of studies of health effects of mobile phone use : systematic review of experimental studies. *Environ Health Perspect* 2007 ; 115 : 1-4
19. <http://www.emf-portal.de> (consulté en date du 3 novembre 2008)
20. Verschaeve L : Genetic effects of radiofrequency radiation (RFR). *Toxicol Appl Pharmacol* 2005 ; 207 : S336-41
21. Vijayalaxmi, Prihoda TJ : Genetic damage in mammalian somatic cells exposed to radiofrequency radiation : a meta-analysis of data from 63 publications (1990-2005). *Radiat Res* 2008 ; 169 : 561-74
22. Diem E, Schwarz C, Adlkofer F, Jahn O, Rüdiger H : Non-thermal DNA breakage by mobile-phone radiation (1.800 MHz) in human fibroblasts and in transformed GFSH-R17 rat granulosa cells *in vitro*. *Mutat Res* 2005 ; 583 : 178-83
23. Lai H, Singh NP : Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int J Radiat Biol* 1996 ; 69 : 513-21
24. Vijayalaxmi, McNamee JP, Scarfi MR : Comments on : " DNA strand breaks " by Diem *et al.* [*Mutat Res* 2005 ; 583 : 178-83] and Ivancsits *et al.* [*Mutat Res* 2005 ; 583 : 184-8]. *Mutat Res* 2006 ; 603 : 104-6
25. de Pomerai D, Daniells C, David H *et al.* : Non-thermal heat-shock response to microwaves. *Nature* 2000 ; 405 : 417-8
26. Cotgreave IA : Biological stress responses to radio frequency electromagnetic radiation : are mobile phones really so (heat) shocking ? *Arch Biochem Biophys* 2005 ; 435 : 227-40
27. Leszczynski D, Joenväärä S, Reivinen J, Kuokka R : Non-thermal activation of the HSP27/p38MAPK stress pathway by mobile phone radiation in human endothelial cells : molecular mechanism for cancer- and blood-brain barrier-related effects. *Differentiation* 2002 ; 70 : 120-9
28. Beaubois E, Girard S, Lallechere S *et al.* : Intercellular communication in plants : evidence for two rapidly transmitted systemic signals generated in response to electromagnetic field stimulation in tomato. *Plant Cell Environ* 2007 ; 30 : 834-44
29. Repacholi MH, Basten A, Gebiski V, Noona D, Finnie J, Harris AW : Lymphomas in  $E\mu$ -Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiat Res* 1997 ; 147 : 631-40
30. Elder JA : Survival and cancer in laboratory mammals exposed to radiofrequency energy. *Bioelectromagnetics* 2003 ; S6 : S101-6
31. Dasenbrock C : Animal carcinogenicity studies on radiofrequency fields related to mobile phones and base stations. *Toxicol Appl Pharmacol* 2005 ; 207 : S342-6
32. Lahkola A, Salminen T, Raitanen J *et al.* : Meningioma and mobile phone use - a collaborative case-control study in five North European countries. *Int J Epidemiol* 2008 ; 37 : 1304-13
33. Schoemaker MJ, Swerdlow AJ, Ahlbom A *et al.* : Mobile phone use and risk of acoustic neuroma : results of the Interphone case-control study in five North European countries. *Br J Cancer* 2005 ; 93 : 842-8
34. Hardell L, Carlberg M, Söderqvist F, Mild H, Morgan LL : Long-term use of cellular phones and brain tumours : increased risk associated with use for  $\geq 10$  years. *Occup Environ Med* 2007 ; 64 : 626-32
35. International Agency for Research against Cancer : Etude Interphone. Mise à jour des résultats - 8 octobre 2008. <http://www.iarc.fr> (consulté en date du 10 octobre 2008)
36. Cardis E, Richardson L, Deltour I *et al.* : The Interphone study : design, epidemiological methods and description of the study population. *Eur J Epidemiol* 2007 ; 22 : 647-64
37. Mild H, Carlberg M, Wilén J, Hardell L : How to combine the use of different mobile and cordless telephones in epidemiological studies on brain tumours ? *Eur J Cancer Prev* 2005 ; 14 : 285-8
38. Rössli M : Radiofrequency electromagnetic field exposure and non-specific symptoms of ill health : a systematic review. *Environ Res* 2008 ; 107 : 277-87
39. Rubin GJ, Munshi JD, Wessely S : Electromagnetic hypersensitivity : a systematic review of provocation studies. *Psychosom Med* 2005 ; 67 : 224-32
40. Valentini E, Curcio G, Moroni F, Ferrara M, De Gennaro L, Bertini M : Neurophysiological effects of mobile phone electromagnetic fields on humans : a comprehensive review. *Bioelectromagnetics* 2007 ; 28 : 415-32
41. Salford LG, Brun AE, Eberhardt JL, Malmgren L, Persson BR : Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Environ Health Perspect* 2003 ; 111 : 881-3
42. Divan HA, Kheifets L, Obel C, Olsen J : Prenatal and postnatal exposure to cell phone use and behavioral problems in children. *Epidemiology* 2008 ; 19 : 523-9
43. Francis J, Niehaus M : Interference between cellular telephones and implantable rhythm devices : a review on recent papers. *Ind Pacing Electrophysiol J* 2006 ; 6 : 226-33
44. Recommandation du 12 mars 2004 du Conseil Supérieur d'Hygiène concernant l'usage du téléphone mobile (GSM) par la population générale (CSH 6.605/5)

#### Correspondance et tirés à part :

J. VANDERSTRAETEN  
 Ecole de Santé Publique, U.L.B.  
 Unité de Recherche en Santé au Travail et Toxicologie  
 Environnementale  
 Route de Lennik 808  
 1070 Bruxelles  
 E-mail : jacques.vanderstraeten@ulb.ac.be

Travail reçu le 30 avril 2009 ; accepté dans sa version définitive le 19 mai 2009.