



## **PUBLICATION DU CONSEIL SUPERIEUR DE LA SANTE N° 8194**

### **Effets biologiques potentiels des micro-ondes modulées**

6 février 2008

#### **RESUME ET MOTS-CLES**

Le présent avis du Conseil Supérieur de la Santé répond à la question suivante: l'exposition à des ondes radiofréquences pulsées et modulées et à des micro-ondes peut-elle provoquer des effets néfastes sur la santé. Ces micro-ondes proviennent principalement de technologies de communication sans fil, auxquelles la population est exposée de manière sans cesse croissante. La variation lente due à une modulation d'amplitude est une propriété technique qui pourrait potentiellement exercer un effet sur des systèmes biologiques. Pour pouvoir exercer un effet, il est toutefois nécessaire que le signal modulé subisse une démodulation dans le système biologique. Bien que – à ce jour – l'approche mathématique utilisée dans les annexes n'ait pas été prouvée de manière expérimentale, elle montre qu'il est fort probable que les systèmes biologiques puissent démoduler et se trouver ainsi sous l'influence d'ELF (*Extreme Low Frequency*) provenant d'ondes pulsées et modulées.

Bien qu'au cours des dernières années, un nombre croissant d'études indiquent des effets biologiques, notamment au niveau des canaux calciques et de l'excitabilité cellulaire, on ne peut pas toujours parler d'évidence univoque. Différentes études montrent des effets, alors que d'autres études n'en montrent pas ou ne peuvent confirmer les effets démontrés dans les premières études citées. Des effets sur des systèmes biologiques complexes (modèles animaux, volontaires) sont sujets à interprétation notamment en raison de la diversité des mécanismes de défense neutralisants et de la difficulté à démontrer des effets cumulatifs à long terme. Des études au niveau de la population sont difficiles à mener en raison des exigences statistiques. Il est donc évident que l'évolution technologique en matière de communication sans fil a une sérieuse longueur d'avance sur la recherche scientifique concernant ses effets potentiels. L'existence d'un certain nombre d'indications d'effets biologiques voire de l'effet sur la santé incite toutefois à la prudence et rend nécessaire le suivi ultérieur et la recherche scientifique.

#### **Mots-clés**

Modulation – micro-ondes – modulé – pulsé – GSM – UMTS – rayonnement – WiFi – DECT – effets biologiques – effets cognitifs – démodulation – barrière hémato-encéphalique – précaution.

## TABLE DES MATIERES

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | INTRODUCTION ET QUESTION.....  | 3  |
| 2.     | ELABORATION ET ARGUMENTATION.....  | 5  |
| 2.1.   | Caractéristiques techniques des ondes moduleés.....  | 5  |
| 2.2.   | Mesure de l'exposition à des picocellules et des microcellules, à des stations DECT et au réseau Astrid..... | 8  |
| 2.3.   | Indicateurs de risque pour les effets biologiques et les problèmes de santé.....                             | 9  |
| 2.3.1. | Contexte général.....  | 9  |
| 2.3.2. | Etude de la littérature sur les effets biologiques et de santé.....  | 11 |
| 2.4.   | Liens possibles de cause à effet entre exposition et effet biologique.....                                   | 14 |
| 2.4.1. | Études TNO et suisse sur les effets de signaux modulés.....  | 14 |
| 2.4.2. | Effets sur la barrière hémato-encéphalique.....  | 18 |
| 2.4.3. | Démodulation et application aux systèmes biologiques.....  | 18 |
| 3.     | CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....   | 20 |
| 4.     | REFERENCES.....  | 21 |
| 5.     | ANNEXE(S).....   | 22 |
| 6.     | RECOMMANDATIONS POUR LA RECHERCHE.....   | 23 |
| 7.     | COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL.....  | 24 |

## ABREVIATIONS ET SYMBOLES

|          |   |
|----------|---|
| ASTRID   | <i>All-round Semi-cellular Trunking Radio communication system with Integrated Dispatchings</i> |
| CDMA     | <i>Code Division Multiple Access</i>  |
| DAB-T    | <i>Digital Audio Broadcasting – Terrestrial</i>   |
| DECT     | <i>Digital Enhanced Cordless Telecommunications</i>   |
| Champ E  | <i>Champ électrique</i>   |
| EEG      | <i>Electro-encéphalogramme</i>  |
| ELF      | <i>Extremely Low Frequency</i>  |
| EMF      | <i>Electromagnetic Field</i>  |
| GSM      | <i>Global System for Mobile Communications</i>  |
| HyperLAN | <i>Hyper Local Area Network</i>   |
| IARC     | <i>International Agency for Research on Cancer</i>  |
| ICNIRP   | <i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>                            |
| IRM      | <i>Imagerie par résonance magnétique</i>  |
| PET      | <i>Positron Emission Tomography</i>   |
| PSD      | <i>Power Spectral Density</i>   |
| RF       | <i>Radio Fréquence</i>  |
| SAR      | <i>Specific Absorption Rate</i>   |
| SPECT    | <i>Single photon emission computed tomography</i>   |
| TDM      | <i>Time Division Multiplexing</i>   |
| TDMA     | <i>Time Division Multiple Access</i>  |
| UMTS     | <i>Universal Mobile Communication Systems</i>   |
| UWB      | <i>Ultra Wideband</i>   |
| WiFi     | <i>Wireless Fidelity</i>  |
| WiMAX    | <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>  |
| WLAN     | <i>Wireless Local Area Network</i>  |

## 1. INTRODUCTION ET QUESTION

Suite à quelques annonces alarmantes parues dans la presse au sujet des effets néfastes de l'exposition aux champs radiofréquences de faible intensité (champs RF) à caractère pulsé et modulé des techniques de communications sans fil, le ministre de la Santé publique a demandé, le 28/06/06, au Conseil Supérieur de la Santé, d'évaluer les données scientifiques actuelles en la matière.

Le groupe de travail a interprété la question du ministre comme étant inspirée par le souci d'être informé des différences éventuelles en matière d'effets biologiques respectivement dus aux signaux numériques et analogues.

L'exposition du grand public aux champs RF n'a cessé d'augmenter au cours des dernières années. En premier lieu, les applications en télécommunication générant ces champs ont augmenté à la suite du développement plus poussé du réseau de téléphonie mobile (GSM, UMTS), d'une meilleure couverture de réseau et de la capacité croissante du réseau grâce aux micro- et picocellules. On assiste à un développement de nouvelles technologies telles que UMTS à larges bandes, ASTRID, WiMAX, et plus récemment HyperLAN et UWB. Par ailleurs, l'exposition du public est également caractérisée par une augmentation des technologies de communication sans fil à courte distance (WLAN, DECT, Bluetooth, réseaux d'ordinateurs sans fil) et autres appareils émettant des radio-ondes à usage domestique notamment (tels que les babyphones, écouteurs sans fil et systèmes de caméra-surveillance sans fil).

Afin de protéger la population contre les effets potentiellement nocifs des radio-ondes pour la santé, des recommandations internationales ont été émises. Celles-ci reposent sur l'effet thermique qui, actuellement, constitue le seul effet prouvé en relation avec la santé. En ce qui concerne les antennes, l'AR du 10 août 2005 a fixé des puissances de champ maximales à proximité de ces antennes (CSS, 2005; AR 10 août 2005). Des mesures montrent que la majorité des antennes émettant des radio-ondes satisfait aux normes de cet AR (IBPT, 2005).

Les inquiétudes du public au sujet des effets éventuels sur la santé augmentent en raison du nombre de sources visiblement présentes. Cette inquiétude est alimentée par des controverses scientifiques au sujet des effets biologiques des rayonnements RF faibles (effets non thermiques) et le caractère spécifique des radio-ondes avec lesquelles l'homme est en contact de plus en plus étroit. Les systèmes biologiques sont manifestement plus complexes que les systèmes sur lesquels l'effet thermique a pu être démontré précédemment. Des études relatives aux voies de transduction du signal et d'autres concernant les canaux calciques montrent des troubles du fonctionnement général des cellules (Lai & Singh, 1997; Aldinucci et al., 2000; Delimaris et al., 2006; Friedman et al., 2007; Gandhi, 2005). Un dysfonctionnement marqué et/ou persistant de la biologie cellulaire pourrait entraîner l'induction de pathologies (troubles fonctionnels, processus oncologiques) et mérite de faire l'objet d'études plus poussées.

Nous devons cependant faire une distinction entre l'exposition à des sources telles que les antennes émettrices que toute la population subit et l'exposition à des appareils à usage personnel tels que par exemple un GSM qui comportent un choix personnel. Il faut en outre faire une distinction entre la puissance moyenne et la puissance de crête et entre la valeur de crête et la valeur efficace (rms) lors de l'exposition aux radio-ondes pour laquelle il est important de mentionner la durée d'enregistrement du champ RF. Des effets à court terme peuvent être évalués relativement facilement tant *in vitro* que *in vivo*. Les effets à long terme sont eux plus difficiles à évaluer. Bien que des effets biologiques n'entraînent pas nécessairement des effets pathogènes, ils peuvent néanmoins constituer une indication de risque mais également aboutir à un effet positif sur la santé.

La première partie du présent rapport décrit les technologies sans fil les plus utilisées.

Une deuxième partie donne les résultats d'une évaluation expérimentale de l'exposition. Etant donné que nul ne sait encore quel aspect de l'exposition est le plus pertinent pour l'évaluation des effets non thermiques éventuels, des valeurs sont données pour différents paramètres (valeurs efficaces (rms) et valeurs de crête pour le champ E, valeurs SAR et intensité et fréquence des composants ELF). Le rapport analyse les composants ELF pouvant au maximum être générés par un signal RF et vérifie si celui-ci peut éventuellement générer des interactions biologiques.

La troisième partie examine enfin la littérature scientifique récente relative aux effets biologiques liés à des niveaux d'exposition bas (sur base d'un rapport d'experts suisses, 2006, et d'experts européens, SCENIHR, 2007).

La quatrième partie examine une hypothèse de travail établissant un lien causal possible entre exposition et effets biologiques.

Enfin, le rapport présente des conclusions et formule des recommandations pour la recherche.

## 2. ELABORATION ET ARGUMENTATION

### AVANT-PROPOS

Le domaine dans lequel les phénomènes physiques sont mesurables est appelé le domaine temporel (amplitude – temps). Il existe un lien mathématique entre le domaine temporel et le domaine fréquentiel (amplitude – fréquence). L'équivalent d'un signal lié au temps dans le domaine fréquentiel s'appelle le **spectre**. Le calcul montre que le spectre d'une sinusoïde pure (ou onde sinusoïdale) est très simple: il s'agit d'une ligne verticale, généralement appelée raie spectrale.

Une sinusoïde RF pure transporte une **densité de puissance**: elle ne transporte aucune **information**. Pour qu'un récepteur reconnaisse l'information comme telle, il doit recevoir un signal, superposé à la sinusoïde ou, en d'autres termes, le signal modulant. Lorsqu'une onde transporte un signal, elle est dite **onde porteuse** et sa fréquence est dite **fréquence porteuse**.

Si on modifie l'amplitude d'une sinusoïde pure en la rendant par exemple proportionnelle à l'amplitude d'une autre sinusoïde pure, de fréquence différente de celle de la première, on procède à ce qu'on appelle la **modulation d'amplitude** de la première par la deuxième et l'on obtient une **onde modulée**.

Le calcul (Annexe 1) montre que cette onde modulée se compose d'un ensemble de trois sinusoïdes pures, ayant des amplitudes qui peuvent être différentes les unes des autres et de fréquences respectivement égales à celle de la porteuse, à la fréquence différence des fréquences de l'onde modulée et de l'onde modulante, ainsi qu'à la fréquence somme de ces deux fréquences. La transmission de l'onde modulée, qui cette fois transporte un signal, c'est-à-dire de l'information, correspond dans ce cas simple à une combinaison de trois ondes sinusoïdales pures, à des fréquences différentes.

Les fréquences différence et somme sont appelées les **bandes latérales** de la porteuse.

Lorsqu'on parle d'un signal, on parle du signal dit en **bande de base**. Celui-ci peut comporter notamment des fréquences extrêmement basses (**ELF** en anglais). Une onde porteuse peut être modulée par un signal comportant beaucoup de fréquences différentes formant une bande de fréquences. Celle-ci est appelée le **canal radio**. L'onde modulée ne transporte pas de fréquences extrêmement basses: elle transporte éventuellement des fréquences très proches de la fréquence porteuse, qui sont les transposées par modulation des fréquences extrêmement basses éventuelles contenues dans le signal de base.

Le plus ancien type de modulation consiste en une commutation « on-off » de l'onde radio. La modulation est dans ce cas une onde rectangulaire correspondant par exemple à des digits « 1 » ou « 0 ». Cette modulation d'amplitude est appelée **modulation par impulsion**. On l'appelle modulation par onde carrée si les temps respectifs où l'onde est « on » et « off » sont égaux. L'onde radio ainsi modulée transporte un **signal numérique**, le plus simple qui soit.

La **démodulation** consiste à récupérer l'information transportée par l'onde radio en décomposant les composantes spectrales de celle-ci.

### 2.1. Caractéristiques techniques des ondes modulées

La caractéristique principale des ondes RF modulées est la variation « lente » de leur amplitude. Ces variations lentes vont de quelques dizaines de hertz à quelques centaines de hertz (ELF 30 Hz – 300 Hz). Théoriquement, ces variations lentes peuvent avoir deux causes: le phénomène d'**interférence** et la **modulation en amplitude du signal**.

**L'interférence** apparaît lorsque deux sinusoïdes de fréquence différente, par exemple deux porteuses, sont présentes en même temps. Pour que cette interférence soit considérée comme une ELF, la différence de fréquence ne devrait pas dépasser au maximum quelques centaines de hertz. Or, dans les systèmes de radiocommunication, l'espace fréquentiel entre deux canaux est toujours exprimé dans un ordre de grandeur situé dans le domaine du kHz ou du MHz: par exemple 200 kHz dans le cas du GSM et 5 MHz dans le cas de l'UMTS. De plus, la modulation de phase des porteuses empêche la corrélation de ces deux signaux, ce qui réduit fortement l'amplitude de l'interférence. Le phénomène d'interférence ne doit donc pas être considéré en pratique comme une source de champs ELF susceptibles d'aboutir à un effet biologique dû à la modulation. La **modulation en amplitude** du signal comporte par contre des champs ELF qui pourraient être responsables d'un effet biologique.

Les systèmes modernes de radiocommunication mettent en œuvre des techniques de multiplexage et d'accès multiple qui impliquent une modulation en amplitude de la porteuse micro-onde. On peut citer par exemple l'accès multiple par répartition dans le temps (*Time Division Multiple Acces – TDMA*) des systèmes GSM et TETRA, l'accès multiple par répartition dans le code (*Code Division Multiple Acces – CDMA*) de l'UMTS et le multiplexage temporel (*Time Division Multiplexing – TDM*) de l'UMTS et du WiMax. Cette **modulation en amplitude** ne sert donc pas à transmettre l'information mais bien à répartir les ressources temps et fréquence entre plusieurs utilisateurs ou entre une liaison montante et une liaison descendante. Lorsqu'un signal modulé en amplitude est observé dans le domaine spectral, on retrouve la raie correspondant à la fréquence porteuse ainsi que des raies latérales avec un décalage fréquentiel correspondant à la fréquence de modulation. Dans certains cas, cette modulation en amplitude est produite à une **fréquence extrêmement basse** (ELF). Ces basses fréquences n'existent donc pas par elles-mêmes, elles modulent une porteuse à haute fréquence. Un processus de démodulation est nécessaire pour les faire exister en tant que telles.

Il y a lieu de signaler que la consommation d'énergie d'une batterie de téléphone portable, par exemple, se produit à une cadence correspondant aux fréquences ELF qui modulent la porteuse. On retrouve donc à proximité du portable en fonction un champ magnétique variant dans le temps à une fréquence extrêmement basse. Ces fréquences extrêmement basses existent donc à proximité du portable indépendamment de tout processus de démodulation.

L'annexe 1 donne un aperçu des composantes ELF générées par démodulation dans divers systèmes de radiocommunication: **GSM, DECT, Télévision analogique, Télévision digitale (DAB-T), UMTS, WiFi, Bluetooth, pré-WiMax.**

Selon le système, les composantes ELF peuvent contenir une part significative ou non de la puissance du signal. Pour quantifier cet aspect, plusieurs formules sont possibles. La plupart des recommandations et normes tiennent compte, au-delà d'une fréquence de 100 kHz, d'une exposition dont la valeur efficace (rms) est moyennée sur 6 minutes (ICNIRP, 1998).

Le tableau 1 ci-dessous indique la puissance relative des composantes ELF d'un certain nombre de systèmes de communication.

Il s'agit de valeurs calculées sur base des valeurs temporelles mesurées. La méthode utilisée est décrite à l'annexe 1. En résumé, le signal est capté par une antenne et une démodulation en amplitude est effectuée au moyen d'une diode. Le signal ainsi obtenu en temporel est analysé en fréquentiel au moyen de l'estimateur de Welsh (le *Power Spectral Density – PSD* – est alors calculé). On en retire la densité spectrale de puissance. Les rapports du tableau 1 sont obtenus en rapportant la puissance contenue dans chacune des ELF à la puissance moyenne. Cette puissance moyenne correspond à la composante à fréquence nulle. Ce rapport est exprimé en %.

Tableau 1: La puissance relative des composantes ELF d'un certain nombre de systèmes de communication.

| ELF comp. Hz | GSM hands. % | GSM BTS % | DECT hands. % | Analog TV % | DAB -T % | UMTS FDD hands. | UMTS TDD hands. | UMTS FDD BTS | UMTS TDD BTS | WiFi | pre-WiMax BTS | pre-WiMax CPE | Blue-Tooth (1) |
|--------------|--------------|-----------|---------------|-------------|----------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|------|---------------|---------------|----------------|
| 1-15         | 2.6          |           |               |             | 0.016    | x               | x               | +            |              |      |               |               |                |
| 15-25        | 1.3          |           |               |             | 0.018    | x               | x               | x            |              |      |               |               |                |
| 25-35        |              |           |               |             | 0.015    | x               | x               | x            |              |      |               |               |                |
| 35-45        |              |           |               |             | 0.015    | x               | x               | x            |              |      |               |               |                |
| 45-55        |              |           |               | 0.29        | 0.016    | x               | x               | x            |              |      |               |               |                |
| 75-125       |              |           | 166           | 0.029       |          | x               | +               | x            | +            | +    |               |               |                |
| 125-175      |              |           |               | 0.009       |          |                 |                 |              | x            | +    |               |               |                |
| 175-225      | 179          | 0.89      | 163           | 0.015       |          |                 |                 |              | x            |      |               |               |                |
| 225-275      |              |           |               | 0.088       |          |                 |                 |              | x            |      |               |               |                |
| 275-350      |              |           | 159           |             |          |                 |                 |              | x            |      |               |               |                |
| 350-500      | 145          | 0.43      | 154           |             |          |                 |                 |              | x            |      | +             | +             |                |
| 500-700      | 109          | 0.43      |               |             |          |                 |                 |              | x            |      |               |               |                |

(1) les composantes à basses fréquences du bluetooth commencent à 1,4 kHz or le tableau s'arrête à 700 Hz.

Une x signifie que la composante ELF n'a pas été déterminée précisément.

Un **nombre en gras** ou **+** représente une composante ELF qui constitue une part importante de la puissance du signal.

Ces valeurs sont stables sauf pour les antennes GSM. Pour ces antennes, les valeurs ont été obtenues d'un set de données à un moment donné. Si la station de base avait, à ce moment, été moins chargée, les ELF auraient été proportionnellement plus importantes. A l'inverse, plus le trafic téléphonique est intense à la station de base, plus le niveau est constant à sa valeur maximale et les ELF sont alors nécessairement moins marquées.

Pour ces composantes ELF, il convient de préciser les termes **valeurs de crête** et **valeurs moyennes**. La **valeur efficace** ou **valeur rms** (*root mean square*) du champ électrique E est la racine carrée de la moyenne du carré du champ pendant un certain nombre d'intervalles de temps. La durée de cet intervalle de temps est déterminante. Un *time slot* dure 0,6 millisecondes et est répété toutes les 4,6 millisecondes. Dans ce cas, on parlera de **valeur de crête** pour une valeur rms dont la durée d'intégration est supérieure à 1,1 nanosecondes (période de la porteuse à 900 MHz) et inférieure à 0,6 millisecondes (durée du *time slot*) de façon à relever correctement la crête qui se produit pendant le *time slot*.

Lorsque l'on parle de **moyenne** sur 6 minutes, il s'agit alors d'une valeur rms dont le temps d'intégration est de 6 minutes. Une telle moyenne prend alors en compte les variations dues aux *time slots* et les variations sur la charge du réseau. Il est cependant raisonnable de considérer que, le plus souvent, les variations observées sur 1 minute sont très proches de celles qui seraient observées sur 6 minutes. Une mesure donnant une moyenne sur 1 minute constituera généralement une bonne estimation de la moyenne sur 6 minutes.

## 2.2. Mesure de l'exposition à des picocellules et des microcellules, à des stations DECT et au réseau Astrid

### Picocellules et microcellules

Diverses mesures ont été réalisées récemment en Belgique en ce qui concerne l'exposition du grand public à des champs micro-ondes dus aussi bien à des picocellules qu'à des microcellules, dans les deux cas à 900 et à 1.800 MHz (Annexe 2).

L'intensité des champs micro-ondes dus aux picocellules a été mesurée dans les **gares de chemin de fer** de Bruxelles Nord, Central et Midi, ainsi qu'à l'**aéroport** de Bruxelles National.

On a constaté que, dans les trois gares de chemin de fer, la valeur maximale de champ s'élève à environ 3 V/m et ce à une distance de 0 à 5 m des picocellules.

A l'aéroport (zone A), l'histogramme des valeurs mesurées (Annexe 2) montre que plus de 60 % des niveaux d'exposition atteignent une valeur moyenne de 0,6 V/m. Toutes les valeurs de champ sont inférieures à 2 V/m.

L'intensité des champs micro-ondes dus aux microcellules a été mesurée dans des **rues commerçantes** de Bruxelles, Gand, Bruges, Hasselt et Liège, ainsi que dans d'autres villes. Tous les champs électriques ont été enregistrés par deux spectromètres (FieldCop et Narda SRM 3000), à des hauteurs de 0,1; 1,0 et 1,7 m. En conformité avec la norme belge, on a utilisé la valeur moyenne mesurée sur 6 minutes de la valeur de crête. On a constaté que, dans 30 rues commerçantes choisies au hasard, la probabilité qu'une personne soit exposée à un champ électrique de 1,5 V/m est de 95 %, avec une marge d'erreur de 5 %.

Dans tous les cas, les mesures indiquent que les champs satisfont à la norme belge.

### Stations DECT

Des mesures ont été faites en Belgique en ce qui concerne les champs émis par un téléphone intérieur de type DECT (1.880-1.900 MHz) (Annexe 3).

L'annexe 3 donne un certain nombre de valeurs de mesures: le spectre mesuré à partir d'une station DECT, diverses mesures de champ électrique durant ou en l'absence d'une liaison téléphonique. Des valeurs de crête ont été mesurées sur un laps de temps de 6 minutes et peuvent donc être considérées comme intensité de champ « worst case »: la charge de crête enregistrée durant 6 minutes est supérieure à la charge de crête moyenne calculée sur 6 minutes.

La valeur de crête à proximité immédiate (0,5 à 10 m) de la station de base en présence ou non d'une liaison téléphonique s'élève à 10 V/m. La valeur moyennée sur 6 minutes s'élève dans les deux cas à 0,9 V/m.

Les valeurs rms les plus intenses mesurées lors de cette campagne de mesures étaient substantiellement plus basses que la valeur limite de puissance de champ recommandée par la norme belge dans le champ de fréquence situé entre 400 MHz et 2 GHz. Selon l'interprétation de la norme actuelle, l'exposition au signal DECT ne comporterait pas de risque pour la santé. Ce jugement ne repose que sur la comparaison entre la norme et la valeur efficace (rms) moyenne calculée sur 6 minutes et ne tient pas compte de l'intensité de champ maximale qui peut être supérieure à la valeur rms de la norme.

## Réseau Astrid

Le réseau ASTRID a été créé pour les appels aux services d'aide et de sécurité: pompiers, police et ambulances, ainsi que pour les communications de ces services entre eux. Il consiste en environ 500 stations de base, composée en moyenne de 3 antennes: 1 antenne d'émission et 2 antennes de réception. Ces antennes émettent une puissance de l'ordre de 10 W.

Des mesures ont été effectuées en Belgique en ce qui concerne les champs émis par une station ASTRID (382 MHz) (Annexe 4).

Durant un appel, on mesure à 3 m de l'antenne une valeur de crête de 36,5 mV/m et une valeur efficace (rms) de 25,7 mV/m. L'appel dure maximum 30 secondes et aussi longtemps qu'aucun appel n'est lancé, aucun signal n'est émis et l'intensité du champ électrique est identique à celui du fond. La valeur mesurée à 1 m de l'antenne monte jusqu'à 11,85 V/m. Notons que la norme belge pour une bande de fréquence de 382 MHz s'élève à 13,7 V/m.

### 2.3. Indicateurs de risque pour les effets biologiques et les problèmes de santé

#### 2.3.1. Contexte général

Dresser un aperçu de l'impact des ondes électromagnétiques sur le système biologique de l'homme et de l'animal constitue un **défi complexe**. Les principales caractéristiques telles que l'« intensité » des champs électromagnétiques, la fréquence, l'intensité du champ, etc. peuvent être définies par des grandeurs et des unités et peuvent donc être mesurées et régulées. Il faut d'autre part tenir compte de la « durée » et de la répétitivité de l'exposition. La complexité des signaux décrits est toutefois de nature telle que l'interaction de l'exposition avec des systèmes biologiques encore plus complexes est très difficile à comprendre dans l'état actuel de développement du concept. Une question subsiste en effet: on peut difficilement déterminer dans quelle mesure certains systèmes biologiques peuvent capter certains signaux et les démoduler, et si cela pourrait perturber leur fonctionnement. Jusqu'à présent, on ne trouve dans la littérature scientifique aucune évidence d'effets pathogènes. L'hypothèse mérite toutefois de faire l'objet de considérations spécifiques et de recherches plus poussées.

Il est peu vraisemblable que les macro grandeurs telles que l'absorption d'énergie ou la dose constituent un moyen convaincant pour indiquer ces effets biologiques éventuels et leur impact encore plus complexe sur la santé, comme le présume l'ICNIRP (1998).

On appelle « effet biologique » les conséquences de l'exposition sur les êtres vivants. Lorsque des **effets biologiques** entraînent des **effets néfastes sur la santé**, l'exposition est considérée comme un danger. Les effets biologiques présentent un spectre complexe. C'est ainsi qu'il peut y avoir un simple lien de cause à effet avec l'exposition, une évolution cumulative dans le temps, un effet supérieur au seuil, un effet retardé, etc. Le fait que la définition des effets biologiques dus aux ondes électromagnétiques soit encore en plein développement scientifique constitue un problème supplémentaire. Différents niveaux sont étudiés. Il faut bien entendu tenir compte des principales constatations épidémiologiques qui ont une portée juridique si elles sont statistiquement démontrées conformément aux protocoles stricts de l'IARC (*International Agency for Research on Cancer*). Entre-temps, l'évolution technologique et l'exposition d'une grande partie de la population progressent rapidement. Il ressort de l'histoire des autres risques technologiques qu'en cas d'incertitude importante et de connaissances lacunaires au sujet des interactions, des **précautions** s'imposent (*European Environment Agency*).

C'est la raison pour laquelle il est également utile de dresser l'inventaire des effets biologiques, même s'il n'existe encore aucune indication univoque des effets sur la santé. Des effets biologiques

peuvent être perçus à **différents niveaux**. Il existe tout d'abord des effets **symptomatiques** descriptifs. A un niveau un peu plus poussé se situent les effets **physiopathologiques**, mesurables par exemple par des tests électrophysiologiques (EEG, *evoked potentials*), immunologiques ou d'imagerie (IRM, PET, SPECT). A un niveau encore plus poussé se situe la mesure des variables **moléculaires** telles que les potentiels d'oxydoréduction (redox), les anomalies génétiques ou les voies de transduction des signaux. Le problème qui se pose ici est que la plupart des variables moléculaires se situent dans le contexte des réseaux moléculaires et s'expriment par des perturbations de l'équilibre biologique dans ces réseaux. Lorsque, à un niveau poussé par exemple sur le plan moléculaire, un fort lien de causalité peut être démontré entre les ondes électromagnétiques mesurées et les effets biologiques constatés, cela n'implique pas automatiquement que l'individu (et/ou la population) en ressentira les effets sur sa santé en général. Pour parvenir à cette conclusion, des effets doivent également avoir été perçus à d'autres niveaux (moins poussés). Si, à un niveau moins poussé par exemple sur le plan physiologique, il est possible de démontrer des effets et le lien de causalité y afférent, on peut alors conclure automatiquement que cela a clairement des conséquences sur la santé en général, sans que des effets doivent pour autant être constatés à d'autres niveaux (plus poussés).

En cas de **régulation du risque** en général, on vise à proposer un indicateur mesurable qui soit proportionnel au risque pour les systèmes biologiques ou pour la santé, comme par exemple la dose dans le cadre du rayonnement ionisant et des substances chimiques.

Dans le cadre de la **maîtrise du risque** sur le terrain, l'utilisation de grandeurs de champ constitue une première approche pour décrire le danger d'une source. La manière la plus indiquée pour démontrer sur le plan épidémiologique le risque d'effets sur la santé est bien entendu de construire un concept pertinent de dose englobant l'effet de l'exposition et de la durée sur l'homme. L'évolution vers le biomonitoring est dans ce contexte très prometteuse.

Une estimation de l'effet d'ondes électromagnétiques au niveau de la pathophysiologie et de la biologie moléculaire est encore rendue plus difficile par une grande **variabilité interindividuelle**, provoquée notamment par la présence de nombreux polymorphismes dans le potentiel **génétique** (en ce qui concerne les mécanismes de détoxification et les mécanismes réparateurs dans le corps de tout un chacun et concernant les régulations immunologiques). La grande variabilité interindividuelle est en soi influencée également par l'**âge** et potentiellement aussi par le **sexe**. Enfin, l'effet au niveau symptomatique est une fois encore influencé par la **perception** personnelle de l'homme en relation avec son environnement. Pour les autorités ou le régulateur se pose ici un premier problème éthique, à savoir veut-on prendre des mesures de protection ou établir des normes pour l'homme moyen ou pour des individus sensibles?

En 2007, le *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks* a évalué pour la Commission européenne les effets potentiels des champs EMF sur la santé. Le SCENIHR (2007) souligne dans son rapport que les expérimentations animales n'ont, jusqu'à présent, apporté aucune preuve de ce que les champs RF induisent le cancer, renforcent l'effet de carcinogènes connus ou accélèrent l'évolution de tumeurs transplantées chez les animaux d'expérience. La question reste toutefois ouverte quant à l'adéquation des modèles expérimentaux utilisés. D'autre part, les données relatives à des valeurs d'exposition élevées sont rares. Le rapport conclut qu'aucun effet sur la santé n'a été démontré de manière univoque pour des niveaux d'exposition inférieurs aux limites de l'ICNIRP, établies en 1998. Les données disponibles, sur base desquelles cette évaluation a été réalisée, sont limitées, principalement en ce qui concerne l'exposition à long terme à de faibles niveaux (SCENIHR, 2007).

### 2.3.2. Etude de la littérature sur les effets biologiques et de santé

Il est impossible de traiter de manière exhaustive dans le présent rapport une matière aussi complexe et en totale évolution que l'exposition aux ondes électromagnétiques, en particulier les ondes radio modulées. Le rapport se limite dès lors à la problématique concrète posée par le ministre et examine de manière plus ciblée quelques aspects de l'interaction biologique avec des systèmes techniques utilisant des micro-ondes et leurs composants à basse fréquence.

La littérature sur laquelle se base l'ICNIRP ne montre aucune évidence pour les effets pathogènes des rayonnements électromagnétiques de faible dose. Il faut admettre tout particulièrement que, dans la littérature actuelle, il n'existe encore aucune **évidence univoque** en ce qui concerne les **effets sur la santé** des radio-ondes modulées.

De nombreuses études ont déjà été publiées sur les effets biologiques des champs électromagnétiques, décrivant tant leurs effets physiologiques que pathologiques. On y retrouve notamment les effets neurophysiologiques (sur la barrière hémato-encéphalique, l'EEG de veille et de sommeil, l'activité cérébrale suscitée, le métabolisme cérébral et l'activité cérébrale), l'influence sur le sommeil et les effets cognitifs, des modifications de la fonction immunitaire, des réponses génétiques et des lésions de l'ADN, des changed transduction pathways, des oxidative reductive potentials, le développement de tumeurs cérébrales, de cancers infantiles, de cancers du sein, etc. Cependant, des divergences méthodologiques dans les protocoles expérimentaux ainsi que des variations considérables dans les paramètres des EMF (fréquence, puissance, distance par rapport à la source, etc) sont souvent à l'origine de données controversées dans la littérature (Valentini et al., 2007).

Une des divergences observées dans les protocoles expérimentaux concerne la définition du paramètre « utilisateur régulier » utilisé dans les études épidémiologiques. Il est évident que ceci aura un effet considérable sur le résultat de l'étude: une sous-estimation de ce paramètre entraînera une dilution de l'effet. Il convient d'établir une définition universelle de la notion d'utilisation régulière sur base d'études épidémiologiques relatives à l'utilisation des GSM (Cardis et al., 2007; Soderqvist et al., 2007).

En outre, la plupart des études se sont penchées sur les effets à court terme plutôt que sur ceux à long terme. Plusieurs études cas-témoin indiquent qu'il existe un lien entre le risque de tumeurs cérébrales et le temps qui s'est écoulé entre la première utilisation d'un GSM /téléphone sans fil et le diagnostic (période de latence). (Hardell et al., 2006, Hepworth et al., 2006).

De nombreuses études ont été effectuées en laboratoire afin de tenter d'expliquer les effets observés dans les études épidémiologiques et d'élucider les mécanismes d'action sous-jacents. Cependant, ces résultats n'ont pas pu être confirmés suite à des manquements méthodologiques tels que l'absence de reproductibilité et de variabilité, ce qui a mené à l'existence de données controversées dans la littérature. Plusieurs gènes et protéines réceptifs aux CEM ont été identifiés mais les conséquences biologiques demeurent incertaines (Xu & Chen, 2007).

Un aperçu des effets constatés, triés en fonction du degré de preuve dans la littérature, figure au le tableau 2 (OFEV, 2007).

L'Office fédérale de l'environnement Suisse (OFEV) a publié récemment un aperçu des effets constatés, triés en fonction du degré de preuve dans la littérature (OFEV, 2007) (Tableau 2).

Tableau 2: Aperçu du degré de preuve des effets décrits pour les micro-ondes (OFEV, 2007).

| DEGRE DE PREUVE                          | EFFET                   |   | SOURCE D'EXPOSITION                                      | VALEURS SEUILS*  |
|--|-------------------------|---|--|--|
|  | Affections et mortalité | Atteinte au bien-être   |  |  |
| <b>Prouvé (constatations cohérentes)</b> |                         | Interférence avec des implants médicaux   | Appareils électroniques (p. ex. Téléphone mobile)        |  |
|  |                         | <i>Microwave hearing</i> (Effets des micro-ondes sur l'ouïe) (Annexe 5)   | Installations radar                                      | Energie < densité de flux par impulsion > 20 mJ/m <sup>2</sup> |
| <b>Probable (plusieurs indications)</b>  |                         | Symptômes non spécifiques (maux de tête, fatigue, perte de concentration, malaises, échauffements de la peau etc) | Téléphone mobile   | 20 mW/kg – 2W/kg   |
|  |                         |   | Activité cérébrale phases de sommeil<br>Téléphone mobile | 20 mW/kg – 2W/kg   |
| <b>Possible (quelques indications)</b>   | Leucémie/lymphomes      |   | Emetteurs TV/radio                                       | A proximité de la valeur limite pour les installations         |
|  | Tumeurs du cerveau      |   |  | 20 mW/kg – 2W/kg   |
|  |                         | Qualité du sommeil  | Émetteur radio   | A proximité de la valeur limite pour les installations         |
|  |                         | Fonctions cognitives, vitesse de réaction   | Téléphone mobile   | 20 mW/kg – 2W/kg   |

|  | Acuité aux champs EM faibles   | Téléphone mobile            | 20 mW/kg – 2W/kg                        |
|--|--------------------------------|-----------------------------|---|
| <b>Improbable (plusieurs indications pour une absence d'effet)</b> | Mortalité                      | Téléphone mobile            |   |
|  | Tumeurs des glandes salivaires | Téléphone mobile            |   |
| <b>Non évaluable (insuffisamment de données)</b>                   | Cancer du sein                 | diverses                    |   |
|  | Tumeurs oculaires              | Téléphone mobile            |   |
|  | Tumeurs des testicules         | pistolets Radar             |   |
|  | Avortement                     | Appareils de coagulation    |   |
|  |                                | Symptômes non spécifiques   | Stations de base pour téléphonie mobile |
|  |                                | Bien-être psychique         | Diverses                                |
|  |                                | Fertilité                   | Téléphone mobile                        |
|  |                                | Système hormonal            | Diverses                                |
|  |                                | Immunité                    | Diverses                                |
|  |                                | Fonctions cardiovasculaires | Diverses                                |
|  |                                | Ouïe et équilibre           | Téléphone mobile                        |
|  |                                | Génotoxicité                | Exposition au travail                   |

*\*Les chiffres des valeurs seuils de l'effet (en mW/kg ou W/kg) doivent être considérés comme des valeurs guides. Ils se réfèrent au SAR (specific absorption rate) maximum local qui se produit dans le corps.*

## 2.4. Liens possibles de cause à effet entre exposition et effet biologique

En fait, la réponse à la question précitée doit tenir compte de trois problèmes. Tout d'abord, il s'agit de la possibilité d'effets à long terme, voire à très long terme, causés par une exposition relativement faible. Par ailleurs, on se demande si des ondes porteuses modulées de façon numérique exercent ou sont susceptibles d'exercer des effets biologiques que ne produisent pas des ondes porteuses modulées de façon analogique.

On est donc amené à prendre en compte des résultats qui ne sont pas nécessairement concluants. Les points 1 et 2, ci-dessous, traitent d'études sur le bien-être et de certaines fonctions cognitives, ainsi que de la barrière hémato-encéphalique. Le point 3 examine la possibilité pour le corps humain de démoduler une onde modulée de façon numérique et dont le signal en bande de base contient des composantes à fréquence extrêmement basse. Si cette hypothèse s'avérait fondée, le corps humain se trouverait exposé à ces composantes après démodulation.

### 2.4.1. Études TNO et suisse sur les effets de signaux modulés

Deux études récentes ont porté sur l'effet de champs GSM-UMTS sur le bien-être et sur diverses fonctions cognitives: l'une aux Pays-Bas, étude dite TNO (Zwamborn et al., 2003) et l'autre en Suisse (Regel, 2006). Seules ces deux études ont été étudiées car elles tiennent spécifiquement compte du caractère modulé et pulsé des micro-ondes (Annexe 6).

Les résultats de l'étude TNO montrent que des effets apparaissent au niveau de la perception de bien-être et de diverses fonctions cognitives en cas d'exposition d'êtres humains à des ondes de type GSM et UMTS. L'étude suisse ne montre pas d'effet pour ce qui est de l'exposition d'adultes en bonne santé à des ondes de type UMTS.

Des différences significatives existent entre les deux études en ce qui concerne les points suivants:

- sujets
- nombre de sujets (taille de l'échantillon)
- âge
- participants non acceptés
- exposition
- intervalle entre les différentes expositions
- listes de questions posées
- fonctions cognitives étudiées
- méthode d'analyse statistique utilisée.

Ces différences sont reprises au Tableau 3.

Tableau 3: Comparaison entre l'étude TNO et l'étude suisse.

| ENDPOINT                    | TNO  | Etude suisse   | Commentaire   |
|-----------------------------|--|--|---|
| <b>POPULATION</b>           |  |  |   |
| <b>Sujets</b>               | Le groupe 1 est composé de personnes présentant des plaintes en matière de santé, qu'elles attribuent à leur sensibilité à l'égard des champs électromagnétiques. Le groupe 2 se compose de personnes ne présentant pas ce type de plaintes. | Le groupe 1 était composé de personnes se décrivant elles-mêmes comme sensibles aux champs électromagnétiques, avec ou sans plaintes. L'autre groupe comprenait des personnes ne se considérant pas « électrosensibles ».  |   |
| <b>Nombre</b>               | 72   | 117  |   |
| <b>Age</b>                  | Entre 18 et 75 ans.  | Entre 20 et 60 ans.  |   |
| <b>Critères d'exclusion</b> | Affections du système nerveux, épilepsie, claustrophobie, traitements psychiatriques dans les six mois précédant le début de l'étude, médication psychoactive dans les deux semaines précédentes, pacemaker, appareil/implant auditif.       | Blessures antérieures à la tête, affections neurologiques ou psychiatriques, usage régulier de narcotiques ou de médicaments psychoactifs dans les six semaines avant le début de l'étude, pacemaker, appareil/implant auditif, fumeurs, personnes présentant des plaintes dues à une maladie chronique, grossesse, usage moyen d'alcool de plus de 10 verres par semaine, usage de caféine supérieur à 450 mg caféine par jour (environ 3 tasses), vol de longue distance de plus de trois fuseaux horaires dans le mois précédent. | Les populations exposées sont plutôt différentes, l'étude suisse concerne une population composée de manière plus homogène. |

|  |  |   |
|--|--|---|
| <b>EXPOSITION</b>                              | Trois expositions différentes par personne: 2 réelles + 1 placebo  | Trois expositions différentes par personne: 2 réelles + 1 placebo   |
| <b>Exposition réelle</b>                       | Deux des trois différents types de signaux: GSM 900 MHz, GSM 1.800 MHz, UMTS 2.100 MHz, (distribution proportionnelle de chaque combinaison: 36 personnes par groupe; Chaque signal a donc été utilisé pour 24 personnes)  | Pas d'exposition à un GSM.<br>Exposition à l'UMTS   |
| <b>Puissance de champ efficace</b>             | GSM: 0,7 V/m<br>UMTS: 1 V/m  | UMTS: 1 V/m et 10 V/m.  |
| <b>Exposition fictive (placebo)</b>            | Chaque sujet a également été soumis à une exposition fictive.  | Chaque sujet a également été soumis à une exposition fictive.   |
| <b>Durée</b>                                   | Exposition suffisamment longue pour pouvoir mener à bien les tests de fonctions cognitives, environ 20-25 minutes.   | Durée de l'exposition d'environ 45 minutes.   |
| <b>Intervalle de temps entre deux sessions</b> | Chaque sujet a subi tous les examens en un jour. L'intervalle de temps entre deux sessions: environ 20-25 minutes. Chaque session pouvait débuter 45 minutes après le début de la session précédente.  | Les auteurs ont estimé que des effets de <i>carry-over</i> pouvaient produire dans l'étude TNO. C'est pourquoi ils ont utilisé un intervalle de temps d'une semaine, pour chaque personne environ au même moment de la journée.                                       |
| <b>TEST</b>                                    |  |   |
| <b>Questionnaire</b>                           | La liste utilisée était une version modifiée d'une série de questions élaborées pour étudier une pression artérielle élevée et mesurer les effets à plus long terme.   | La liste TNO a été utilisée afin de pouvoir réaliser une comparaison de même qu'un autre questionnaire.   |
| <b>Fonctions cognitives</b>                    | Le Taskomat développé par la TNO comprend cinq tests différents de mémoire et de réaction gérés par ordinateur:<br>- temps de réaction<br>- comparaison de mémoire<br>- attention visuellement sélective<br>- double tâche<br>- Filtration des informations non pertinentes<br>Cette batterie de tests a été réalisée une fois par | Les tests utilisés lors de l'étude suisse sont:<br>- Attention visuellement sélective<br>- Test simple sur le temps de réaction<br>- Deux choix de test sur le temps de réaction<br>- Test de mémoire<br>Cette batterie de test a été réalisée deux fois par session. |

session.

---

### **ANALYSE STATISTIQUE**

ANOVA (*Analysis Of Variance*): toutes les variables sont prises en compte:  
exposition (placebo, GSM900, GSM1.800, UMTS), groupe (avec et sans plaintes), Session (première, deuxième, troisième), ordre (18 ordres différents possibles), Place du sujet dans cet ordre (36 personnes dans chacun des deux groupes (avant ou après-midi) ANOVA suppose une distribution normale. Etant donné que ce n'était pas toujours le cas, d'autres méthodes ont également été utilisées pour analyser les données (Wilcoxon, touche médiane).

L'analyse a été réalisée séparément pour les deux groupes, Au moyen de modèles *linea- mixed*. Les variables sont: exposition (placebo, 1 V/m, 10 V/m) et temps (semaine 1, 2, 3). La série de tests d'exposition a également été prise en compte comme variable pour l'analyse des fonctions cognitives. Des résultats extrêmes (supérieurs à 4x la déviation médiane) n'ont pas été pris en compte. Lorsque les données ne semblaient pas réparties normalement, test Wilcoxon a été utilisé.

---

### **RESULTATS COGNITIFS**

Relation entre exposition à l'UMTS et bien-être  
Modifications des diverses fonctions cognitives tant pour l'exposition au GSM qu'à l'UMTS

Un effet sur la vitesse de réaction n'a pu être mesuré dans aucun des deux groupes. Un effet sur la précision lors de la réalisation d'un test n'a pas pu être décelé dans un des deux groupes.

En conclusion, on peut dire que les deux études sont assez différentes et doivent être toutes deux prises en considération car les critères de choix des populations soumises sont divergents:

- l'étude suisse se concentre sur une population plus homogène d'adultes en bonne santé peu soumis à des facteurs extérieurs et s'attache de façon plus précise à l'effet spécifique d'une exposition UMTS de courte durée mais répétée,
- l'étude TNO prend en considération une population plus large (moins homogène) et tient au préalable compte d'une exposition proche de la réalité mais n'excluant pas des effets éventuels dus aux sessions répétées.

Il y a lieu de noter que les valeurs de champs émises sont, dans les deux cas, sensiblement inférieures aux recommandations de l'ICNIRP.

#### **2.4.2. Effets sur la barrière hémato-encéphalique**

La barrière hémato-encéphalique est une membrane perméable de façon sélective qui protège le cerveau des mammifères de substances potentiellement dangereuses qui seraient présentes dans le sang.

Une trentaine d'études d'expérimentation animale rapportant des effets sur la barrière hémato-encéphalique par suite d'une exposition aux micro-ondes ont été recensées en 2001 (Lin et al., 2001). Ces études produisent, dans environ la moitié des cas, des résultats positifs et dans l'autre moitié des résultats négatifs. Les premières investigations ont mis en évidence des variations de perméabilité à des valeurs SAR élevées. Toutefois, les rapports plus récents évaluant le transfert de sérum d'albumine suggèrent que l'exposition aux micro-ondes peut altérer la perméabilité de la barrière à des valeurs de SAR qui sont bien inférieures par exemple à la valeur maximale permise pour les GSM soit 1,6 W/kg, en ce compris des niveaux très faibles, comme 0,016 W/kg.

Il en découle une question plausible: lors de l'usage répété de GSM « l'albumine et d'autres molécules toxiques pourraient-elles s'accumuler dans les cellules du cerveau? » (Lin et al., 2001).

Par ailleurs, la question des fenêtres de fréquences et des fenêtres de puissance est évoquée depuis une vingtaine d'années dans la littérature. En ce qui concerne les fenêtres de fréquence, il s'agit d'effets biologiques mesurés sous l'effet de porteuses micro-ondes modulées par de très basses fréquences, comme 8, 16, 24 et 50 Hz. En ce qui concerne les fenêtres de puissance, il s'agit d'effets biologiques mesurés à certains niveaux de puissance mais non à des valeurs plus basses ou plus élevées. Dans un résumé de résultats obtenus à l'Université de Lund, Suède, dans une étude sur l'effet sur la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique et la croissance de tumeurs sur des rats soumis à une exposition à 915 MHz continue ou modulée à 4, 8, 16, 50 et 217 Hz, les auteurs font état des résultats suivants:

- augmentation de la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique à l'égard de l'albumine,
- pas d'indication de croissance de tumeurs cervicales,
- transmission d'albumine plus élevée à un SAR inférieur à 1 mW/kg – c'est-à-dire une densité de puissance de 2,5 mW/cm<sup>2</sup> – qu'à des valeurs plus élevées du SAR.

Les auteurs en déduisent qu'il est possible que l'effet le plus prononcé sur la barrière hémato-encéphalique ne se produise pas dans les couches les plus superficielles du cerveau mais bien à quelques centimètres de profondeur (Salford et al., 2003).

#### **2.4.3. Démodulation et application aux systèmes biologiques**

On peut aisément démontrer que la condition nécessaire et suffisante pour qu'il y ait démodulation est de disposer d'un **composant non linéaire** (Annexe 7). Ceci est dû au fait que le courant circulant à travers un composant linéaire est proportionnel à la tension aux bornes de celui-ci. Il n'en va pas de même lorsqu'il s'agit d'un composant non linéaire: le courant ne varie pas

proportionnellement à la tension. En d'autres termes, la valeur du composant n'est pas indépendante de la tension appliquée: elle varie avec la valeur de celle-ci.

Le calcul montre que, si la tension est la somme de tensions à fréquences différentes, le courant aura des composantes qui sont les combinaisons linéaires des deux fréquences. Théoriquement, un nombre infini de fréquences sont ainsi engendrées par démodulation. On procède alors à un **filtrage**, au moyen de composants linéaires qui sont le plus souvent des résistances et des capacités, afin de ne conserver que la bande de fréquences intéressante, centrant celle-ci soit autour du continu, soit autour d'une fréquence particulière. Il y a lieu de remarquer que redresser un signal, détecter un signal et démoduler une onde modulée sont trois opérations différentes.

On peut dès lors se demander si des non-linéarités existent dans les composants biologiques du corps humain et si celui-ci est donc susceptible d'effectuer une démodulation interne, plus particulièrement en ce qui concerne les composantes à fréquence extrêmement basse contenues dans le signal en bande de base.

On sait que l'effet direct de micro-ondes pénétrant le corps humain se produit dans les couches superficielles de celui-ci, par **effet de peau**. Cet effet est quantifié par la **profondeur de peau**. Celle-ci varie en fonction inverse de la racine carrée de la fréquence. Elle est donc plus élevée à fréquence plus basse et plus faible à fréquence plus élevée. A 915 MHz, première fréquence GSM, la profondeur moyenne de peau vaut environ 1,5 cm. A trois fois la profondeur de peau à l'intérieur d'un matériau et notamment d'un corps humain, la densité de puissance de l'onde ne vaut plus que 1 % de sa valeur à l'interface air-peau.

La couche superficielle du corps humain est inhomogène: peau, muscles, os, graisses. La constante diélectrique - partie réelle de la permittivité relative complexe - est très différente pour ces divers constituants. La raison en est que leur teneur en eau est très différente. Il ne faut pas oublier que la partie imaginaire de la permittivité relative complexe est aussi très différente pour ces divers constituants. Or, cette partie imaginaire est en fait la conductivité électrique des divers constituants et c'est elle qui cause l'absorption. L'onde pénétrant le corps humain rencontre donc des couches de conductivité de valeurs différentes. Cet aspect laminaire des couches superficielles du corps humain en modélise l'**inhomogénéité**. Il ne traduit pas une non-linéarité éventuelle.

Pour qu'il y ait non-linéarité, il faut que des constituants de la couche superficielle aient une **valeur de conductivité variant en fonction de la valeur du champ**. Il existe deux sortes de constituants: d'une part ceux créés aux frontières des diverses couches sous forme de conditions limites à satisfaire par le champ: densités de charge, voire de courants, d'autre part les couches constitutives elles-mêmes: peau, muscles, os, graisses. Dans la littérature, on ne trouve pas d'indications de conditions limites non linéaires. Par contre, on y trouve des indications quant à la non-linéarité de tissus biologiques. On trouve notamment un modèle semi-conducteur de la peau.

### 3. CONCLUSION

Le CSS a limité ses travaux dans l'optique de la question posée par le ministre, portant sur le caractère pulsé et modulé des rayonnements. Il s'est intéressé plus particulièrement aux différences éventuellement constatées entre l'exposition à des ondes modulées de façon numérique, utilisées dans les systèmes de communications modernes, et l'exposition à des ondes modulées de façon analogique.

Les champs RF possédant des propriétés modulantes produits par tout type d'émetteurs (macrocellules, microcellules, picocellules) et auxquels la population – dans son ensemble – peut être exposée sont faibles par rapport aux normes d'exposition nationales et internationales. Ces champs sont également substantiellement plus faibles que les champs RF produits par des appareils à main. Il a constaté qu'il n'existe pas de preuves que ces ondes provoquent un effet sur la santé, mais qu'il existe toutefois un certain nombre d'indications incitant à la prudence. La problématique continuera à être surveillée avec grande attention.

#### 4. REFERENCES

- Aldinucci C, Palmi M, Sgaragli G, Benocci A, Meini A, Pessina F, Pessina GP. The effect of pulsed electromagnetic fields on the physiologic behaviour of a human astrocytoma cell line. *Biochimica et Biophysica Acta* 2000; 1499:101-8.
- AR. Arrêté royal fixant la norme pour les antennes émettant des ondes électromagnétiques entre 10 MHz et 10 GHz, 10 août 2005.
- Cardis E, Richardson L, Deltour I, Armstrong B, Feychting M, Johansen C et al. The INTERPHONE study: design, epidemiological methods and description of the study population. *Eur J Epidemiol* 2007; 22:647-64.
- CSH 8103. Avis du Conseil Supérieur d'Hygiène concernant le projet d'Arrêté royal fixant la norme pour les antennes émettant des ondes électromagnétiques entre 10 MHz et 10 GHz, 13 avril 2005.
- Delimaris J, Tsilimigaki S, Messini-Nicolaki N, Ziros E, Piperakis SM. Effects of pulsed electric fields on DNA of human lymphocytes. *Cell Biol Toxicol* 2006; 22:409-15.
- EEA – European Environment Agency. Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896-2000. *Environmental Issue Report* 2002; 22.
- Friedman J, Kraus S, Hauptman Y, Sciff Y, Seger R. Mechanism of short-term ERK activation by electromagnetic fields at mobile phone frequencies. *Biochem J* 2007; 405:559-68
- Gandhi GA. Genetic damage in mobile phone users: some preliminary findings. *Indian J Human Genetics* 2005; 11:99-104
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics Society* 1998.
- Hardell L, Hansson Mild K, Carlberg M, Söderqvist F. Tumour risk associated with use of cellular telephones or cordless desktop telephones. *World Journal of Surgical Oncology* 2006; 4:74-83.
- Hepworth SJ, Schoemaker MJ, Muir KR, Swerdlow AJ, Van Tongeren MJA, Mc Kinney PA. Mobile phone use and risk of glioma in adults: case-control study. *BMJ* 2006; 332:883-7.
- IBPT – Institut belge des services postaux et des télécommunications. Mesures gsm: Synthèses. [www.ibpt.be](http://www.ibpt.be)
- Lai H, Singh NP. Acute exposure to a 60 Hz magnetic field increased DNA strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 1997; 18:156-65.
- Lin JC. The Blood-Brain Barrier, Cancer, Cell Phones, and Microwave Radiation. *IEEE Microwave Magazine* 2001; 2(4):26-30.
- OFEV. Office fédérale de l'environnement Suisse. [Hochfrequente Strahlung und Gesundheit. Bewertung von wissenschaftlichen Studien im Niedrigdosisbereich. 2. aktualisierte Aufl. 2007.](#)
- Regel SJ, Negovetic S, M. Rösli M, Berdinas V, Schuderer J, Huss A, Lott U, Kuster N, Acherman P. UMTS Base Station-Like Exposure, Well Being and Cognitive Performance. *Environ. Health Perspec.* 2006; 114,1270-75.
- Salford LG, Brun AE, Eberhardt JL, Malmgren L, Persson BRR. Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Environmental health perspectives* 2003; 111:881-3.
- SCENHIR. Possible effects of elektromagnetic fields (EMF) on human health. 21 march 2007
- Söderqvist F, Hardell L, Carlberg M, Hansson Mild K. Ownership and use of wireless telephones: a population-based study of Swedish children aged 7-14 years. *BMC Public Health* 2007; 7:105-13.
- 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.



## 6. RECOMMANDATIONS POUR LA RECHERCHE

Il y aurait lieu d'explorer comme hypothèse de travail la possibilité pour des êtres humains de démoduler le signal micro-onde, en se posant les questions suivantes:

1. Certains constituants de la couche superficielle du corps humain présentent-ils une non-linéarité? Dans l'absolu, on peut sans doute répondre de façon positive, étant donné la multitude des non-linéarités connues en ce qui concerne les senseurs du corps humain.
2. Par suite de cette non-linéarité éventuelle, les êtres humains – ou certains d'entre eux particulièrement sensibles – sont-ils susceptibles de percevoir cette démodulation?
3. Ceci peut-il avoir un effet sur la santé?

## 7. COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL

Tous les experts ont participé à **titre personnel** au groupe de travail. Les noms des membres du CSS sont annotés d'un astérisque \*.

Les experts suivants ont participé à la rédaction de « **Effets biologiques potentiels des micro-ondes modulées** » :

|                     |   |
|---------------------|---|
| Adang Dirk          | (Radiation non-ionisante, UCL)                          |
| Decat Gilbert       | (Electromagnétisme, radiation, biostatistique, VITO)    |
| Eggermont Gilbert*  | (Radioprotection, radiobiologie, VUB)                   |
| Stockbroeckx Benoit | (Electrotechnique, Communauté française)                |
| Van Loock Walter*   | (Electrotechnique, Ugent)                               |
| Vander Vorst André  | (Electromagnétisme, electrotechnique, UCL) (Rapporteur) |

L'administration a été représentée par:

Lukovnikova Marina (DG5)

La personne suivante a été entendue lors de la dernière séance:

Van Gool Stefaan (Pédiatrie-oncologie, UZLeuven)

Le groupe de travail a été présidé par Vander Vorst André et le secrétariat scientifique a été assuré par Jadoul Eric et Cauwerts Katty.