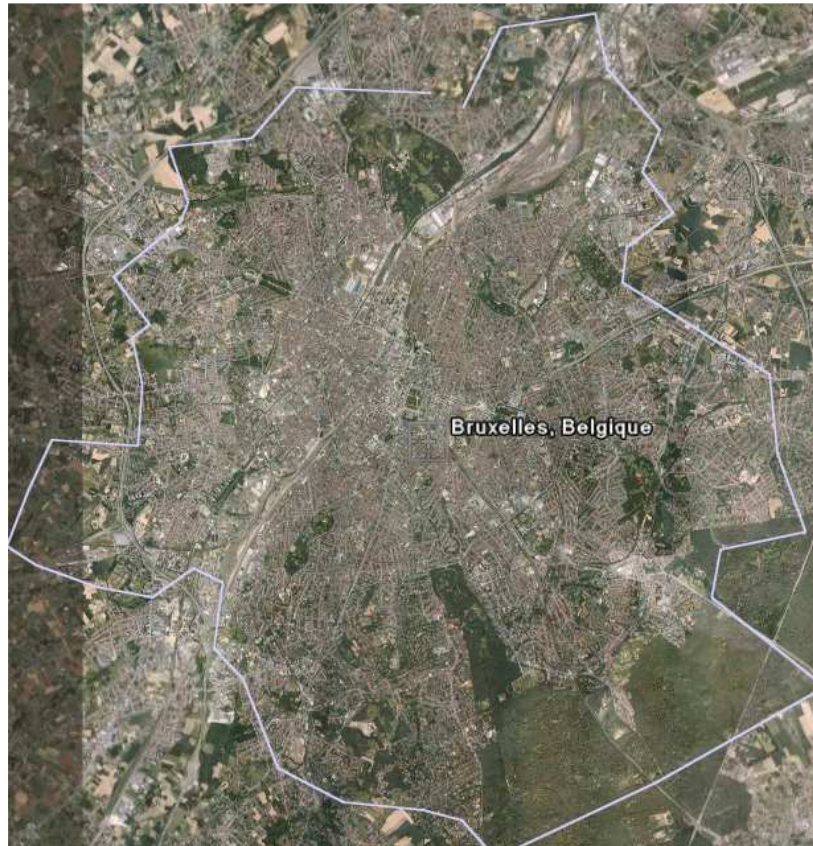


Rapport d'étude n° DSI/EMF/003 - 76 pages - 2007.10.23

Dossier n° 20070019



**ANALYSE DE L'EXPOSITION DES PERSONNES
AUX CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES
EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE**

LOT 1 : HAUTES FRÉQUENCES

Convention 531.02.937/2007

Rapport final

POUR

Bruxelles Environnement

TABLE DES MATIÈRES

Introduction

Partie I La problématique "ondes électromagnétiques hautes fréquences"

I.1. Introduction.....	4
I.2. Volet "applications et technologies".....	5
I.3. Volet "infrastructures et équipements".....	24
I.4. Volet "physique et biophysique".....	27
I.5. Volet "normes et santé".....	34

Partie II Exposition bruxelloise

II.1. Introduction.....	39
II.2. Mesures.....	40
II.3. Augmentation à venir.....	48

Partie III Analyse de l'ordonnance bruxelloise

III.1. Introduction.....	50
III.2. Critique de quelques articles.....	50
III.3. Comparaison avec la charte de la Ville de Paris.....	53
III.4. Conclusions.....	56

Partie IV Communication au public

IV.1. Introduction.....	57
IV.2. Structure de la brochure.....	57

Références

59

Annexe 1 Aspects biologiques et sanitaires de l'exposition aux champs radiofréquences

Introduction

La pollution électromagnétique aux hautes fréquences présente un caractère particulier en Région de Bruxelles-Capitale par rapport aux autres régions de Belgique. En effet, la forte densité de la population et la forte densité d'immeubles de bureaux font que les systèmes de communication mobiles et de transmission sans fil des données y sont particulièrement développés de façon à pouvoir répondre à l'intense demande en capacité. Bruxelles-Environnement a donc souhaité obtenir une analyse du niveau électromagnétique ambiant sur le territoire de la Région.

Cette analyse est construite en quatre parties. La première partie a essentiellement pour but d'exposer les notions et les connaissances préalables à la compréhension du problème de l'environnement électromagnétique. Des notions de base de physique et des descriptions techniques y sont données. Les effets biologiques et sanitaires des rayonnements aux hautes fréquences sont parcourus et les normes et recommandations visant à limiter la pollution électromagnétique y sont présentées. La deuxième partie présente précisément le niveau électromagnétique ambiant en Région bruxelloise. Cette présentation se base sur des mesures pour montrer l'évolution sur les 6 dernières années et donne des indications sur l'augmentation éventuelle à attendre dans les années à venir. La troisième partie est une analyse de l'ordonnance bruxelloise qui a été votée par le Parlement au début de cette année 2007 et doit entrer en vigueur dans un an et demi. Cette ordonnance est notamment située par rapport à d'autres normes ou recommandations existantes. La dernière partie suggère un contenu pour une brochure d'information à destination du grand public.

Partie I

La problématique "ondes électromagnétiques hautes fréquences"

I.1. INTRODUCTION

La question de la pollution par les champs électromagnétiques aux hautes fréquences fait intervenir des notions relevant de plusieurs disciplines. On peut notamment citer la physique, les techniques, la biologie et le droit. Cette première partie a pour objectif de fixer les éléments de ces différentes disciplines permettant d'avoir une vue d'ensemble de la problématique.

Le premier volet s'attachera à décrire les principales techniques utilisées dans les systèmes de radiocommunication et à présenter ces différents systèmes. L'impact de ces techniques et systèmes sur les caractéristiques de l'environnement électromagnétique est systématiquement explicité.

Le deuxième volet présente un résumé des caractéristiques techniques principales des émetteurs implantés en Région bruxelloise. Il permet donc de fixer quelques données chiffrées et de comparer les différents systèmes entre eux.

Le troisième volet fixe les notions fondamentales de physique et de biophysique nécessaires à la compréhension du propos.

Enfin, le dernier volet détaille, d'une part, les effets biologiques et sanitaires des champs radiofréquences et, d'autre part, les initiatives visant à limiter la pollution électromagnétique.

I.2. VOLET "APPLICATIONS ET TECHNOLOGIES"

I.2.1. Aperçu de quelques techniques de transmission

I.2.1.1. Principes du réseau cellulaire

L'utilisateur d'un système mobile doit pouvoir accéder à ce système où qu'il soit dans un territoire donné. Si on ajoute à cette exigence une contrainte de proximité entre l'utilisateur et la station de base on comprend facilement la nécessité de discrétiser le territoire en cellules dont le rayon est le rayon maximum permettant de satisfaire cette contrainte. La nécessité de proximité vient du fait que, pour qu'un terminal soit portable et présente une autonomie suffisante, il doit pouvoir joindre la station de base en émettant une puissance radio la plus faible possible. Le rayon maximum d'une cellule est donc fixé par un compromis entre la puissance émise par le portable qui doit être faible et le nombre de stations de base qui ne doit pas être trop grand. Dans le cas du standard GSM, la puissance maximale émise par le portable est de deux watts. On peut considérer qu'avec une telle puissance, le rayon maximum des cellules est de 5 à 10 kilomètres en fonction des obstacles qui peuvent exister. On comprend alors aisément qu'une telle puissance n'est pas nécessaire et peut donc être économisée lorsque l'utilisateur se trouve à proximité de la station de base ou en vue directe de celle-ci. Le standard GSM prévoit à cet effet un contrôle automatique de la puissance émise par le portable. Ainsi elle varie de 0.2 à 2 watts en fonction des conditions de propagation. C'est la raison pour laquelle l'utilisateur désireux de limiter l'exposition de son corps aux champs électromagnétiques a tout intérêt à utiliser son portable dans des conditions telles que la propagation soit optimale. L'écran du terminal prévoit un affichage qui permet de s'en faire une bonne idée.

Le réseau cellulaire permet donc d'assurer la couverture territoriale tout en assurant la proximité entre le portable et la station de base. Une troisième fonction consiste à assurer la capacité. Une station de base doit pouvoir gérer simultanément toutes les communications en cours dans la cellule qu'elle couvre. Pour ce faire, la station de base doit être équipée du nombre de canaux qui lui permet de satisfaire à la demande en capacité. Les canaux constituent donc la ressource qui permet de construire le réseau. Il faut alors constater que, d'une part, le nombre de canaux est limité et que, d'autre part, deux cellules qui utilisent un même canal doivent être suffisamment espacées pour éviter les problèmes d'interférence. Les canaux doivent donc être utilisés de façon parcimonieuse. Pour illustrer ce que peut être une utilisation parcimonieuse des canaux prenons le cas d'une station de base devant couvrir une cellule de 500 mètres de rayon centrée sur la Place de la Monnaie à Bruxelles. Cette station de base doit satisfaire une demande en capacité très importante étant donné la densité des usagers présents dans la cellule. Il se fait cependant que les usagers sont concentrés sur une surface qui ne représente qu'une petite fraction de la surface de la cellule tout entière : une bonne partie de la Rue Neuve, la Place de Brouckère, la Grand-Place les boulevards etc. Équiper cette station de base avec le nombre de canaux nécessaires pour satisfaire à la demande épuiserait la ressource canal au détriment des cellules voisines. La solution adoptée dans ce genre de situation consiste à installer plusieurs petites stations de base qui vont chacune couvrir une cellule dont le rayon n'excède pas 100 mètres. Celles-ci sont appelées micro-cellules. Ce sont alors ces micro-cellules qui permettent d'absorber la demande locale en capacité alors que la cellule de 500 mètres de rayon, appelée macro-cellule, absorbe la demande beaucoup plus faible qui est présente dans les zones non couvertes par les micro-cellules. La Figure 1 résume ce principe.

Il existe en fait 4 niveaux cellulaires. Le premier est la cellule parapluie qui est destinée à couvrir une zone très étendue au moyen d'une seule station de base. Ce type de cellule a été utilisé par Belgacom Mobile dans les premiers mois d'existence de son réseau Proximus : une cellule parapluie couvrait alors la Ville de Bruxelles. Les campagnes du Sud du pays sont encore couvertes par des cellules parapluie étant donné la faible densité d'usagers. Le deuxième niveau cellulaire est celui de la macro-cellule. Il sert à couvrir un quartier ou un village. C'est le type de cellule le plus courant en Belgique. Le troisième niveau est la micro-cellule qui couvre une rue très fréquentée ou une place publique. De nombreuses villes en sont actuellement équipées. Le quatrième niveau cellulaire est la pico-cellule. Il est destiné à couvrir un étage d'un immeuble, une salle ou une station de métro. Ce type de cellule est également très répandu en Belgique.

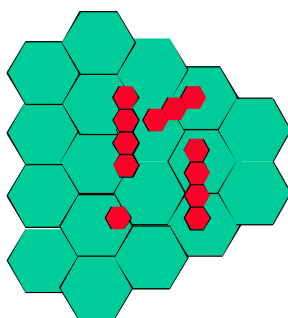


Figure 1. Agencement de macro-cellules et micro-cellules pour assurer à la fois la couverture et la capacité dans une zone à forte densité d'usagers.

La densité d'usagers est directement liée à la densité de population à un moment donné. Si on se place à un endroit donné, la densité d'usagers a augmenté de façon exponentielle depuis l'arrivée du GSM. Si on se situe à un instant donné, la distribution spatiale de la densité d'usagers est quasi-proportionnelle à la distribution spatiale de la densité de population.

Les notions présentées ci-dessus permettent de dire que plus une zone est densément peuplée, au plus la demande en capacité est importante et donc au plus les cellules sont nombreuses et de petite taille. Il en découle alors que la puissance émise par chacune des stations de base diminue avec la densité d'usagers et que la hauteur de placement des antennes diminue également. La hauteur typique d'installation d'une antenne de macro-cellule est de 20 à 35 mètres alors qu'elle est de 2 à 4 mètres pour une antenne de micro-cellule. Le résultat global est alors une augmentation du niveau d'exposition du public avec l'augmentation de la densité d'usagers. Ce raisonnement est résumé de façon qualitative dans la Figure 2. Il est intéressant de noter à ce propos que la Belgique est le deuxième pays européen pour sa densité de population, après les Pays-Bas.

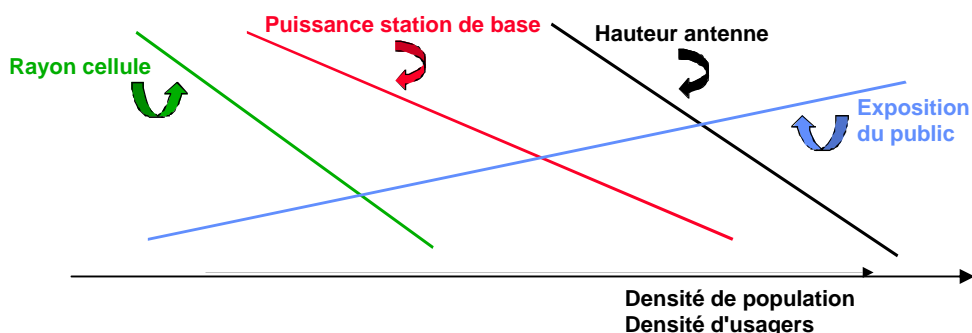


Figure 2. Représentation qualitative de l'effet de l'augmentation de la densité d'usagers sur la taille des cellules, la puissance émise par les stations de base, la hauteur de placement des antennes et le niveau d'exposition du public.

1.2.1.2. Techniques d'accès multiple

Une station de base doit pouvoir distinguer les signaux qui lui sont envoyés simultanément par plusieurs mobiles. L'accès multiple est le moyen par lequel plusieurs utilisateurs peuvent communiquer simultanément avec une même station de base. Pour réaliser cet accès multiple il faut répartir les différents utilisateurs au niveau du signal qu'ils émettent. Il existe actuellement quatre techniques de répartition utilisées dans les systèmes de communication mobile : la répartition en fréquence, la répartition dans le temps, la répartition par le code et la répartition en sous-porteuses orthogonales.

La répartition en fréquence (*FDMA* en anglais pour *Frequency Division Multiple Access*) consiste à assigner une fréquence porteuse à chaque utilisateur, ceux-ci émettant tous en même temps. Cette assignation de fréquence, similaire à ce qui est fait pour répartir dans le spectre les programmes de radio et de télévision, est illustrée à la Figure 3. La station de base effectue alors la séparation par filtrage fréquentiel. Cette technique d'accès multiple convient tant aux systèmes numériques qu'aux systèmes analogiques.

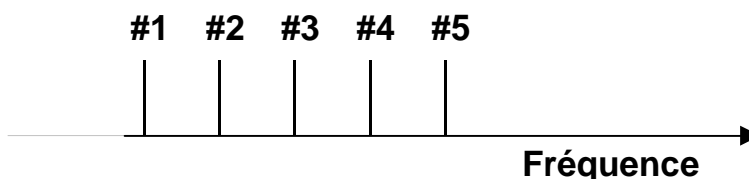


Figure 3. Répartition en fréquence (*FDMA*) de cinq utilisateurs.

La répartition dans le temps (*TDMA* en anglais pour *Time Division Multiple Access*) consiste à assigner une fenêtre temporelle (*timeslot*) à chaque utilisateur. Ceux-ci émettent donc tous à la même fréquence mais à des instants différents. On peut voir cette technique comme une application du principe qu'il ne faut pas tous parler en même temps. La Figure 4 illustre l'idée. L'émetteur comprime une partie de la conversation dans un rapport égal au nombre de fenêtres temporelles prévues par le système et émet dans la fenêtre temporelle qui lui a été assignée. Le récepteur se synchronise sur l'émetteur, décomprime le message et le restitue. Cette technique ne s'applique qu'aux systèmes numériques.

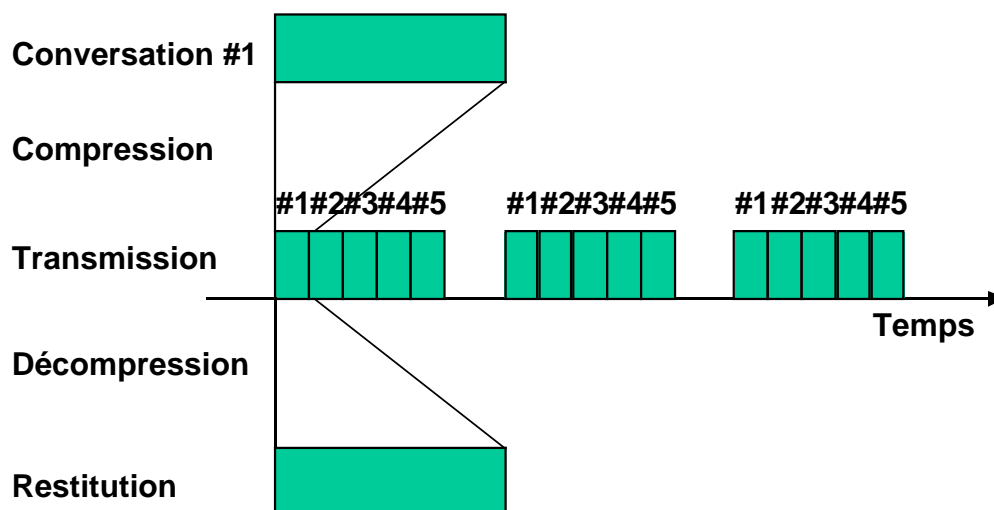


Figure 4. Répartition dans le temps (*TDMA*) de cinq utilisateurs.

La troisième technique est la répartition par le code (*CDMA* en anglais pour *Code Division Multiple Access*). Elle est plus récente, moins connue et plus difficile à comprendre que les deux autres. Pour la présenter il convient d'introduire la notion de symbole. Elle est liée à la notion de bit via le schéma de modulation. Dans un schéma de modulation numérique simple, comme par exemple la modulation de phase à deux états, un seul bit d'information produit un symbole à la sortie du modulateur. Dans des schémas plus complexes comme des modulations à 4 ou 8 états de phase, ce sont respectivement 2 et 3 bits d'information qui produisent un symbole à la sortie du modulateur. La répartition par le code consiste alors à assigner un code de N bits à chaque utilisateur. Les bits de ce code sont appelés "*chips*". La durée de ce code est égale à la durée d'un symbole en sortie du modulateur et le code multiplie les symboles du message comme illustré à la Figure 5. Comme tous les codes sont

mathématiquement orthogonaux entre eux, la station de base peut effectuer la séparation par synchronisation et corrélation. Étant donné que le code présente un débit N fois plus grand que le message, il y a une augmentation par un facteur N du débit à transmettre par radio et donc un élargissement de la bande passante nécessaire. C'est la raison pour laquelle on parle d'accès multiple à répartition par le code et à spectre étalé (*W-CDMA* en anglais pour *Wideband Code Division Multiple Access*) quand N est grand. On peut donner une explication intuitive à cette technique en la comparant à la faculté qu'a notre cerveau d'isoler et comprendre un message exprimé dans une langue connue même s'il est noyé dans un bruit ambiant.

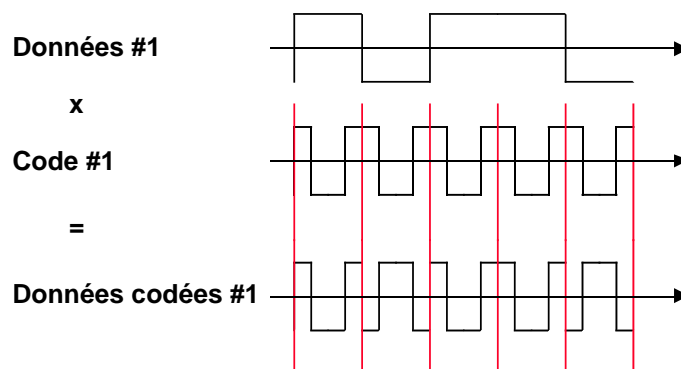


Figure 5. Répartition par le code (CDMA).

Les trois techniques passées en revue sont résumées dans le graphe de la Figure 6. Elles peuvent être utilisées isolément ou en parallèle. Le standard GSM par exemple prévoit 8 fenêtres temporelles par fréquence porteuse. C'est donc une combinaison de *TDMA* et de *FDMA*. Chaque fréquence porteuse (canal) permet donc de gérer 8 communications simultanées pour une puissance rayonnée égale à P . Une station de base équipée de N canaux gère $N \times 8$ communications en émettant une puissance totale égale à $N \times P$. Le standard UMTS quant à lui utilise le *W-CDMA*.

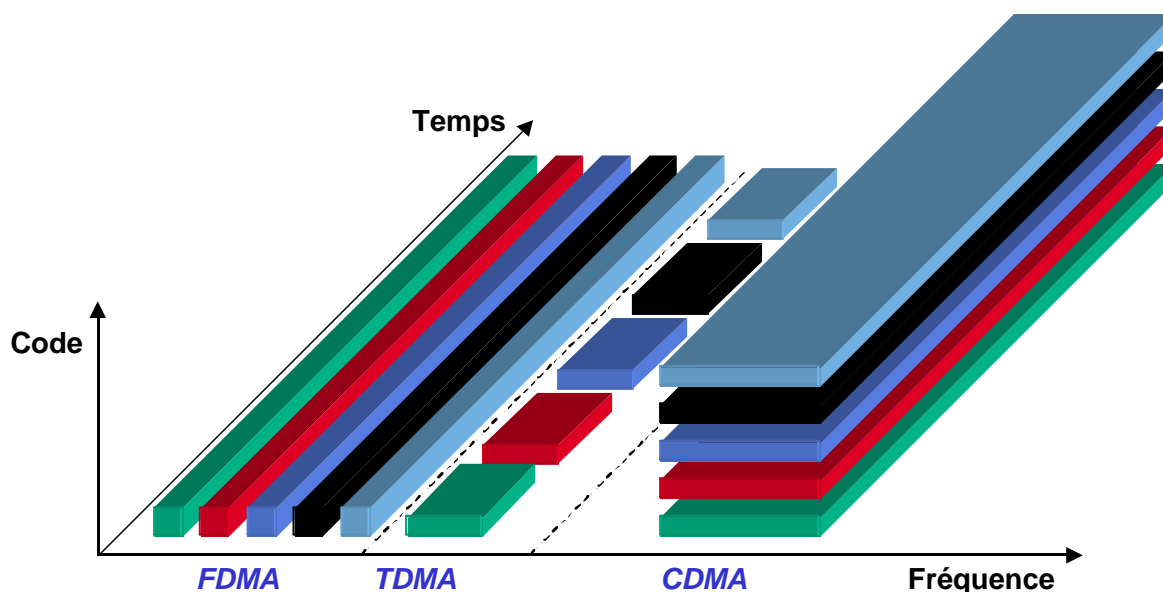


Figure 6. Graphique à trois dimensions synthétisant trois techniques d'accès multiple : *FDMA*, *TDMA* et *CDMA*.

1.2.1.3. Multiplexage par sous-porteuse orthogonales (OFDM – OFDMA)

L'une des difficultés majeures rencontrées dans la mise en œuvre d'un système de radiocommunication en milieu urbain est l'impact des réflexions multiples sur les bâtiments. Le récepteur capte en effet le signal venant directement de l'émetteur et une multiplicité d'échos. Ce problème est d'autant plus gênant que le débit d'information est élevé. Pour parer à ce problème, la technique de multiplexage par sous-porteuses orthogonales (OFDM – *orthogonal frequency division multiplexing*) a été mise au point. La bande de fréquence allouée à un émetteur est divisée en un grand nombre de sous-bandes (jusqu'à plusieurs milliers). Les données à transmettre sont alors réparties entre ces sous-bandes et transmises indépendamment. L'orthogonalité des différentes sous-porteuses limite les interférences entre les sous-bandes. Vu que le débit dans chaque sous-bande est faible, la transmission est moins sensible aux problèmes liés aux multi trajets. Cette technique par exemple utilisée dans le standard de télédiffusion numérique terrestre DVB-T.

Une technique d'accès multiple a été mise au point sur base du OFDM. Il s'agit du OFDMA (*orthogonal frequency division multiple access*). Un ensemble de sous-porteuses est assigné à chaque utilisateur du système. Cette technique ressemble donc au FDMA mais présente en plus l'avantage d'être particulièrement robuste aux problèmes liés aux trajets multiples. La technique d'OFDMA est appliquée dans le système WiMax et est prévue pour l'amélioration futur de l'UMTS appelée LTE (*long term evolution*).

1.2.1.4. Séparation des liaisons montantes et descendantes (duplexage)

Le duplexage consiste à assurer la bidirectionnalité de la communication. Dans la plupart des systèmes, il faut en effet une liaison dite descendante (*downlink*) de la station de base vers le mobile et une liaison dite montante (*uplink*) du mobile vers la station de base. Le duplexage peut être réalisé en fréquence ou dans le temps. Le duplexage dans le domaine fréquentiel (*FDD – frequency domain duplex*) consiste à assigner des fréquences porteuses différentes à la station de base et au mobile. Les deux peuvent alors émettre simultanément; ils émettent et reçoivent donc en même temps. C'est par exemple le cas dans le système GSM pour lequel les liaisons montantes sont émises entre 880 et 914 MHz et les liaisons descendantes entre 925 et 959 MHz. Le duplexage dans le domaine temporel (*TDD – time domain duplex*) consiste à utiliser la même fréquence porteuse pour les deux liaisons en alternant les périodes d'émission et de réception. C'est par exemple le cas dans le système pré-WiMax où la station de base émet pendant 1.55 ms puis reçoit pendant 1.13 ms. Le modem du client par contre reçoit les signaux de la station pendant 1.55 ms et transmet les siens pendant 1.13 ms.

1.2.1.5. Caractère pulsé des émissions

Les systèmes modernes de radio-communication mettent en œuvre des techniques de multiplexage et d'accès multiple qui impliquent une modulation en amplitude par "tout ou rien" de la porteuse micro-onde. On peut citer par exemple l'accès multiple par répartition dans le temps (*TDMA*) des systèmes GSM et TETRA, l'accès multiple par répartition dans le code (*CDMA*) de l'UMTS et le multiplexage temporel (*TDD*) de l'UMTS et du WiMax. Du fait de la modulation en amplitude par "tout ou rien", on parle de signaux modulés en amplitude par impulsions (*PAMW – pulse amplitude modulated wave*) ou d'émissions pulsées. La Figure 7 illustre ce type de modulation. Dans certains cas, cette modulation en amplitude est produite à une fréquence très basse. Lorsque cette fréquence est inférieure à quelques centaines de hertz, on parle de composantes à très basse fréquence (*ELF, extremely low frequency components*). La présence de telles composantes ELF pourrait produire des effets biologiques différents de ceux observés pour une porteuse non-modulée.

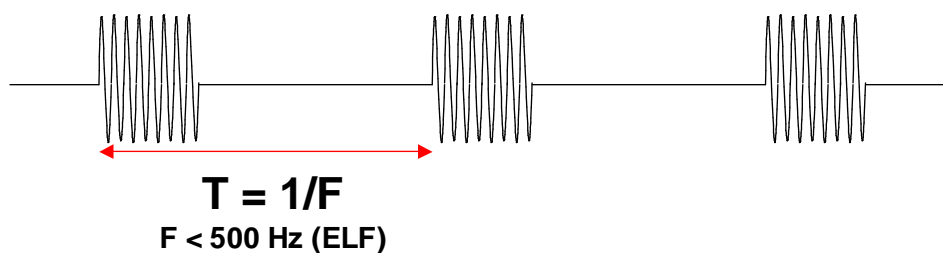


Figure 7. Onde modulée par impulsions.

1.2.1.6. Réseaux "mesh"

Les systèmes sans fil tels que le WiFi sont essentiellement utilisés de la même façon que les réseaux de communication mobile cellulaires : un point d'accès (station de base) dessert une zone (cellule). Une telle structure traditionnelle présente des limitations : structure rigide, nécessité de planification méticuleuse et perte de signal. À l'inverse, les réseaux *mesh* sont des systèmes à sauts multiples dans lesquels les équipements s'assistent les uns les autres en transmettant les paquets de données à travers le réseau. Le chemin par lequel les données transitent (routage) est autodéterminé par le réseau. Cela présente des avantages, surtout dans les conditions de propagation défavorables. De tels réseaux peuvent être installés avec une préparation minimale et fournissent un système fiable et flexible qui peut être étendu à des centaines d'équipements à travers une grande étendue géographique. La structure *mesh* est utilisée avec les systèmes WiFi et Zigbee, notamment.

I.2.2. Présentation des systèmes de radiocommunication

I.2.2.1. Introduction

Les catégories de systèmes de radiocommunication peuvent être définies en fonction de la taille de la zone qu'ils desservent. La Figure 8 présente les cinq catégories classiques.

WAN (*wide area network*)

- réseau couvrant une très large zone
- p.ex. GSM et UMTS

MAN (*metropolitan area network*)

- réseau couvrant une grande ville
- p.ex. WiMax ou WiFi exploité en *mesh*

LAN (*local area network*)

- réseau couvrant une habitation ou un étage d'un immeuble de bureaux
- p.ex. WiFi traditionnel

PAN (*personal area network*)

- réseau de proximité d'un individu (PC, clavier, imprimante, souris...)
- p.ex. Bluetooth

BAN (*body area network*)

- réseau reliant des dispositifs installés sur le corp (oreillette, capteurs divers...)
- p.ex. Bluetooth ou Zigbee

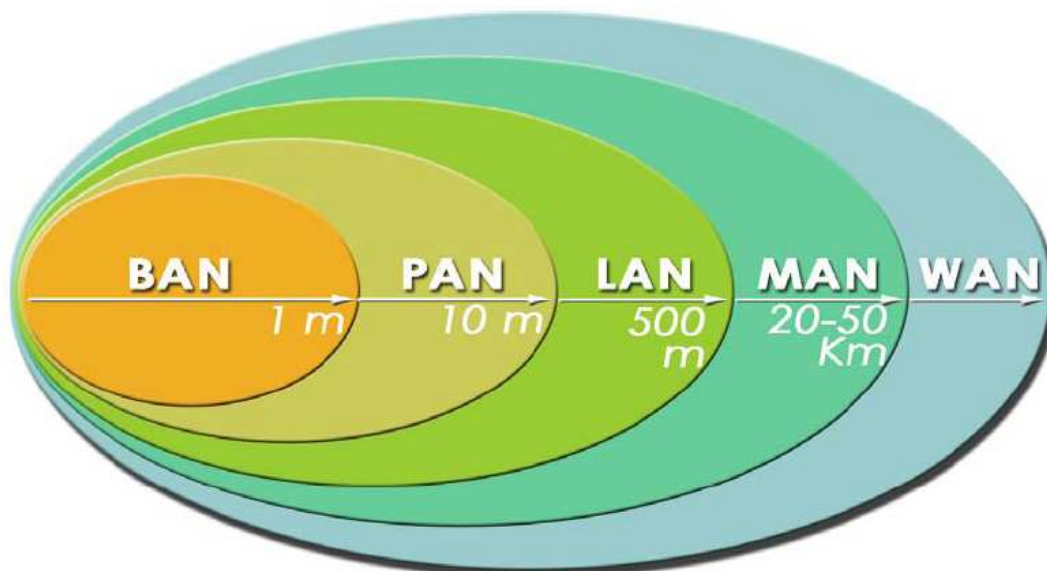


Figure 8. Catégories de systèmes de radiocommunication en fonction de la couverture offerte.

I.2.2.2. GSM de base

Le GSM est le standard qui a popularisé les techniques de communication mobile. Ce standard et ses équivalents implantés dans les autres régions du monde (le GSM est essentiellement européen) sont

classiquement regroupés sous la dénomination de systèmes de communication mobile de la deuxième génération (2G). La première génération étant celle des systèmes analogiques tels que MOB I et MOB II en Belgique.

Le standard GSM a été conçu dès le départ avec le but à peu près unique de transmettre la voix. Cela s'est traduit par un certain nombre de choix qui en limitent actuellement son utilisation à des fins de transmission de données ou de navigation sur Internet. Parmi ces choix, on peut en relever trois qui sont tout à fait essentiels. L'accès multiple est réalisé par l'assignation d'une seule fenêtre temporelle à chaque utilisateur et ce quel que soit le taux d'utilisation de la station de base. Cette dernière est donc rarement utilisée à pleine capacité. La commutation, qui permet de mettre en contact deux utilisateurs, est orientée ligne (*circuit switching*) comme dans le cas de la téléphonie fixe. Cela consiste à réserver exclusivement l'usage d'une "ligne", qu'elle soit radio ou câblée, à une seule communication entre deux terminaux et ce quel que soit le taux d'utilisation de cette ligne durant une communication. On sait en effet que, durant une conversation téléphonique, une "ligne" n'est utilisée qu'à moins de 50% de sa pleine capacité. Enfin les concepteurs du système ont opté pour une modulation à 2 états de phase de la porteuse ce qui limite le nombre de bits par symbole transmis à un seul. Le résultat de ces choix est un débit d'environ 9.6 kbit/s avec un taux d'erreur binaire (*BER* en anglais pour *Bit Error Rate*) pouvant monter jusqu'à 10^{-3} , c'est à dire 1 bit erroné sur 1000 bits transmis soit encore 9 à 10 bits erronés par seconde. De telles performances sont parfaitement suffisantes pour transmettre de la voix mais pas pour transmettre des données de façon confortable et fiable.

Ce standard GSM de base est bien implanté en Belgique avec trois opérateurs fonctionnant dans les bandes 900 et 1800 MHz. La phase de croissance de ce système, en termes de nombre d'utilisateurs, est à présent terminée. Le marché est saturé et chacun des trois concurrents cherche à récupérer les clients des deux autres en jouant sur les tarifs et en assurant la qualité du réseau. La demande en capacité, par contre, continue à croître suite à l'évolution du système vers le GSM étendu.

La Figure 9 présente la structure temporelle du signal émis par une station de base GSM et la Figure 10 celle d'un portable GSM.

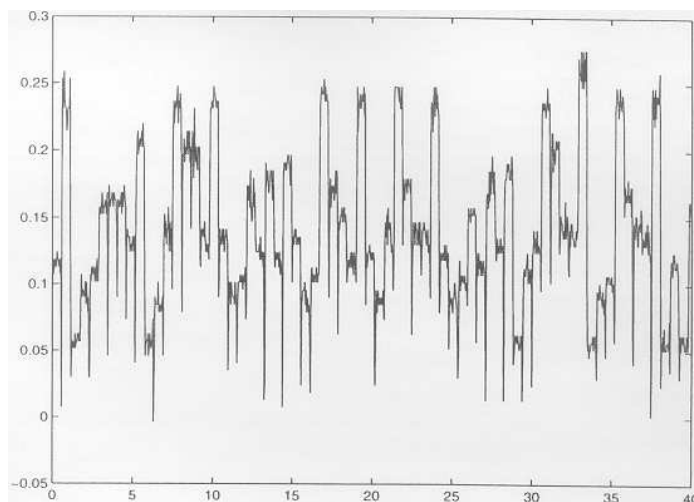


Figure 9. Évolution temporelle du signal d'une station de base GSM; axe du temps en millisecondes.

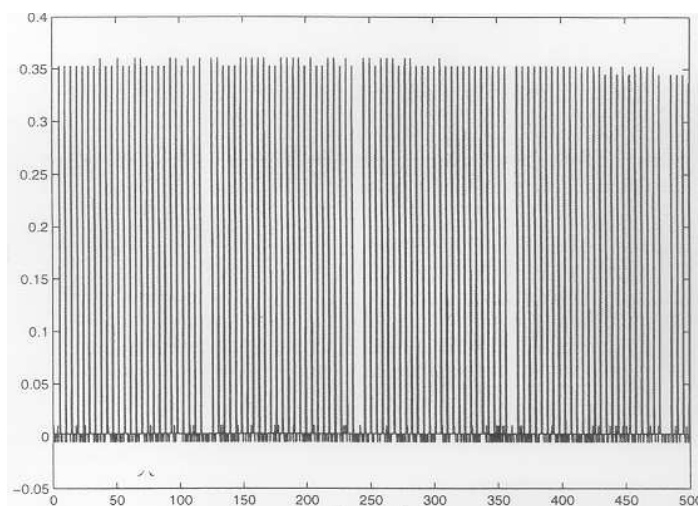


Figure 10. Évolution temporelle du signal d'un portable GSM; axe du temps en millisecondes.

1.2.2.3. GSM étendu

Le GSM de base étant déployé les concepteurs ont cherché à en étendre les possibilités en vue d'offrir des services autres que la transmission de la voix : transmission de données et navigation confortable sur Internet. C'est ainsi qu'ont été définis des standards d'extension tels que *HSCSD*, *GPRS* et *EDGE*. Ces standards ont été élaborés dans le but d'octroyer aux réseaux GSM existants la possibilité de transférer des données avec un débit proche de celui des systèmes de troisième génération (3G) tels que l'UMTS. C'est ainsi que certaines personnes parlent de la génération "deux et demi" (2.5G).

HSCSD (High-Speed Circuit-Switched Data) est un standard qui permet à l'utilisateur de bénéficier de plusieurs fenêtres temporelles (*time slots*) pour ainsi augmenter le débit de transmission qui passe alors de 9.6 à 64 kbit/s. *GPRS (General Packet Radio Service)* est un protocole de communication standard qui permet la commutation par paquets à la place d'une commutation par ligne. La commutation par paquets consiste à regrouper les données pour les envoyer ensemble à certains instants et ainsi libérer la ligne pour d'autres utilisateurs aux autres instants. La capacité de la ligne est ainsi mieux utilisée. De plus il n'est pas nécessaire de facturer un temps de connexion au client, seule la quantité d'informations transférées quantifie l'usage qui est fait du système. Ce protocole de commutation par paquets est utilisé pour les connexions à Internet. *GPRS* permet donc à un utilisateur GSM de se connecter à des réseaux du type Internet. La combinaison des standards *GPRS* et *HSCSD* permet d'obtenir des débits de transmission de 115 à 177 kbit/s. *EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution)* applique un schéma de modulation de la porteuse radio à 8 états de phase ce qui porte le nombre de bits par symbole transmis à 3 au lieu de 1 pour le GSM de base. Le résultat net est une multiplication par 3 du débit de transmission accessible au terminal portable. La combinaison des standards *EDGE*, *GPRS* et *HSCSD* permet ainsi un débit de transmission maximum de 384 kbit/s.

Pour introduire ces standards dans son réseau l'opérateur doit modifier en partie l'électronique installée dans les stations de base. Il ne doit rien modifier au niveau des antennes. L'utilisateur désireux de profiter de ces standards doit, de son côté, acquérir un portable compatible avec ceux-ci. L'impact intrinsèque de l'application de ces standards sur le niveau d'exposition des personnes est nul. Il faut cependant noter que, en le mettant en œuvre dans son réseau, l'opérateur augmente le temps de connexion des utilisateurs. Il en résultera alors nécessairement une augmentation de la puissance installée et donc une augmentation du niveau d'exposition des personnes. Notons encore que les standards *HSCSD* et *GPRS* permettent d'augmenter le taux d'utilisation

des ressources installées, les stations de base fonctionneront donc à leur puissance maximale pendant un pourcentage du temps plus important.

Ces trois standards sont aujourd'hui déployés à peu près partout. Il faut noter que le GSM ainsi étendu et l'UMTS sont complémentaires : les cartes UMTS pour PC portables utilisent le GPRS quand l'UMTS n'est pas disponible.

1.2.2.4. UMTS

L'industrie met en place la convergence entre les systèmes mobiles et les applications nécessitant des transmissions de données. Cela est réalisé au moyen de technologies de radiocommunication capables de supporter des transmissions à haut débit et des services multimédia de bonne qualité. Ces nouveaux systèmes sont regroupés au niveau mondial sous l'appellation IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications*) et en Europe sous l'appellation UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Systems*). Ces nouveaux systèmes constituent la troisième génération (3G) de communication mobile. Ce saut de génération est justifié par les changements dans la qualité des services rendus. L'objectif principal de la deuxième génération était de rendre mobile la téléphonie vocale. Les objectifs de la troisième génération vont bien au-delà.

- Les possibilités de véhiculer des données sur une large bande permettent la transmission de toutes sortes de contenus tels que le son à haute fidélité, des images fixes et mobiles ainsi que de grandes quantités de données notamment pour l'accès à Internet. Ces possibilités permettent l'accès au moyen d'un poste mobile à des services qui nécessitaient précédemment un poste fixe. Elles génèrent également de nouveaux services.
- Dès le départ, la troisième génération a été conçue avec une portée mondiale. Cela implique la possibilité d'avoir accès aux services indépendamment de la situation géographique.
- La troisième génération, éventuellement combinée au système de positionnement GPS, permet de lier le contenu d'un service à la position du terminal portable : localisation d'agences bancaires, de restaurants, d'hôtels etc.

La vitesse de transmission qui est accessible au terminal portable dépend de l'éloignement par rapport à la station de base ainsi que des conditions de propagation. Elle est en général de 384 kbit/s, elle descend à 64 kbit/s lorsque les conditions sont mauvaises et monte à 1.8 Mbit/s lorsque le standard UMTS est combiné avec le standard HSDPA. Le débit atteint en général est donc identique à celui offert par le système GSM étendu. Cette vitesse de transmission est essentiellement limitée par la puissance d'émission du portable UMTS qui est de 125 à 250 mW. C'est cette contrainte qui explique la petite dimension des cellules.

Trois bandes de fréquence sont allouées en Belgique à l'UMTS terrestre : 1900 – 1980 MHz, 2100 – 2170 MHz et 2110 – 2170 MHz. L'UMTS par satellite est en projet, deux bandes lui sont réservées dans la même gamme.

L'influence du nombre d'utilisateurs sur la puissance émise par les stations de base est plus difficile à établir que dans le cas du GSM. Dans le système UMTS, il n'est pas nécessaire d'ajouter des canaux pour répondre à la demande, comme cela se fait pour le GSM et le TETRA. La liaison entre la station de base et les portables se fait à la même fréquence pour tous les utilisateurs et pour toutes les stations de base. La gestion des interférences est alors faite, notamment, au moyen du contrôle de puissance. On peut donc s'attendre globalement à une augmentation de la puissance lorsque le nombre d'utilisateurs augmente mais avec une ampleur moindre que dans le cas du GSM pour lequel la dépendance est linéaire.

L'UMTS de base (384 kBits/s) est déjà bien implanté sur la quasi-totalité du territoire belge. L'UMTS à haut débit (1.8 Mbits/s) incluant le complément HSDPA est installé dans 7 grandes villes belges, dont Bruxelles.

La Belgique a vendu 3 licences UMTS pour une durée de 20 ans aux trois opérateurs GSM. Le déploiement a débuté en 2005. Chacun des opérateurs est tenu de déployer son réseau suivant un calendrier déterminé en fonction de la population couverte : 30% de la population après 3 ans, 40% après 4 ans, 50% après 5 ans et

85% après 6 ans. Le réseau UMTS est cellulaire. La taille des cellules est plus petite que pour le GSM. Une estimation faite pour une ville moyenne montre qu'il faut 23 sites GSM pour couvrir 95% de la population sur 100 km² et qu'il en faut 55 pour couvrir 85% de la population en UMTS sur la même surface. Dans le cas de Bruxelles l'estimation est de 300 sites de 3 antennes par opérateur.

Étant donné que les opérateurs continuent à renforcer le réseau GSM, il ne faut pas s'attendre à une disparition immédiate de celui-ci au profit de l'UMTS. La percée de la 3G dépend de la réceptivité des consommateurs aux services de visiophonie et des avantages concurrentiels par rapport à l'ADSL, l'internet par le câble TV, le WiMax et le WiFi en réseau *mesh*.

Deux évolutions au moins sont attendues pour l'UMTS. L'une s'appelle LTE (*long term evolution*) elle consiste à remplacer la technique d'accès multiple *CDMA* par la technique *OFDMA*. Le débit binaire actuel est en effet limité par les problèmes liés aux trajets multiples. L'autre évolution est une extension sous la forme d'un système de diffusion (*broadcasting*) : le *MBMS (multimedia broadcast and multimedia service)*. L'UMTS actuel permet de recevoir des émissions de télévision. Lorsque plusieurs personnes situées dans la même cellule regardent la même émission de télévision, cela représente une quantité de données transmises égale à celle de l'émission multipliée par le nombre de spectateurs. Pour éviter cette situation absurde qui gaspillerait la bande passante, les opérateurs UMTS pourraient installer le MBMS. Ainsi, pour regarder l'émission de télévision, les récepteurs UMTS capteront le signal MBMS qui n'est émis qu'une seule fois et qui est disponible pour tous les abonnés. Le MBMS est donc un concurrent au DVB-H (voir plus loin).

La Figure 11 présente la structure temporelle du signal émis par une station de base UMTS en FDD et la Figure 12 celle d'un portable UMTS en FDD.

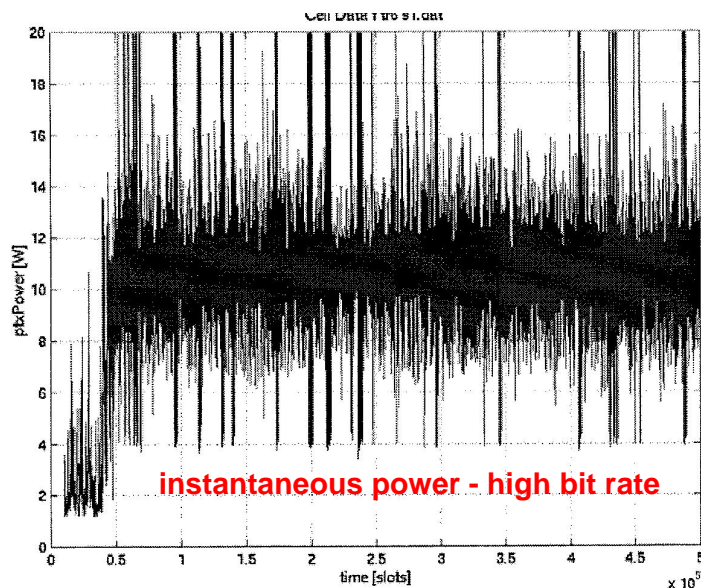


Figure 11. Évolution temporelle du signal d'une station de base UMTS FDD.

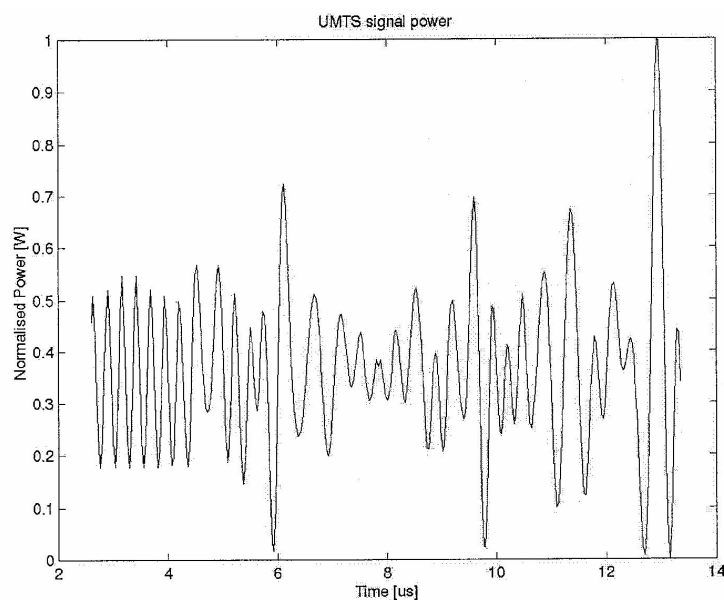


Figure 12. Évolution temporelle du signal d'un portable UMTS FDD.

1.2.2.5. TETRA

TETRA (*TErrestrial TRunked RAdio*) est une norme développée en Europe. Son objectif initial est de remplacer les réseaux PMR analogiques, qui ne répondent plus aux exigences actuelles des services de secours et de sécurité. Les réseaux PMR (*Private Mobile Radio*) sont typiquement ceux utilisés par les services de sécurité publique (police, services d'incendie, ambulances, Défense nationale, ...) ou privés (sociétés de taxi, services de dépannage routier, industrie, ...). Le standard TETRA est proche du standard GSM. Chaque canal TDMA (chaque fréquence porteuse) contient 4 fenêtres temporelles (*timeslots*) au lieu de 8 pour le GSM. Le réseau est cellulaire avec des tailles de cellules sensiblement supérieures à celles des cellules GSM. Les bandes de fréquence réservées au système TETRA sont aux environs de 400 MHz en Belgique (380-400 MHz pour les services de sécurité publique et 410-430 MHz ou 450-470 MHz pour les services privés).

Ce standard permet d'offrir essentiellement 3 services : la téléphonie, le transfert de données et le dispatching. Le service de téléphonie est exactement le même que dans le cas du GSM, même si le but initial n'est pas de concurrencer ce dernier. Le service de dispatching constitue l'intérêt principal de TETRA. Il permet d'établir des communications entre un poste central et un groupe de terminaux mobiles afin de contacter simultanément toutes les personnes concernées par un même message. Il correspond au mode de fonctionnement des services de secours et de sécurité puisqu'il s'adapte à leur structure organisationnelle : la communication d'un responsable opérationnel vers ses différentes équipes. La définition des groupes d'appel peut de plus être dynamique : un terminal peut appartenir à un groupe à un moment donné dans la journée et à un autre groupe un peu plus tard, suivant les besoins liés à la coordination du travail. Le standard permet également la transmission de données par paquets.

Une spécification du standard TETRA prévoit que le temps nécessaire entre la composition du numéro d'appel du correspondant et la mise en communication ne peut dépasser 300 millisecondes. Ce temps est à comparer à la dizaine de secondes qui est parfois nécessaire lorsqu'on appelle un abonné au GSM. Cette différenciation peut paraître minime à l'utilisateur privé. Elle est cependant d'une grande importance dans le cas d'un dispatching de taxis par exemple où le préposé donne parfois 6 à 7 appels par minute. Dans le cadre des services de secours, ces secondes sont encore plus précieuses lorsque des vies humaines sont en jeu.

Le standard TETRA2 (TEDS) spécifie des transmissions à 500 kbit/s.

En Belgique, le système TETRA est exploité par les sociétés ASTRID et Zenitel. ASTRID est mandatée par le gouvernement pour déployer un réseau réservé aux services de secours et de sécurité alors que Zenitel démarre le déploiement d'un réseau commercial.

ASTRID est une société anonyme de droit public mise en place par le gouvernement en vue d'installer en Belgique un réseau de communications mobiles réservé aux services de secours et de sécurité. Deux bandes de fréquence lui sont réservées : 380 – 385 et 390 –395 MHz. Les utilisateurs de ce réseau sont essentiellement des services publics locaux ou fédéraux : zones de police, police fédérale, pompiers, protection civile, SMUR, service 100 etc. Le réseau peut également être mis à la disposition d'entreprises semi-publiques et même privées qui jouent un rôle essentiel dans la « chaîne sécuritaire » : Croix Rouge, sociétés de gardiennage, transporteurs de fonds etc. Des conditions d'accès bien précises ont été définies. Le réseau ASTRID est dimensionné pour 40 000 utilisateurs.

Le réseau ASTRID est actuellement opérationnel à travers toute la Belgique. Quelque 35.000 utilisateurs sont prévus pour fin 2007. Le rayon moyen d'une cellule est de 10 à 15 km dans les zones rurales et 5 à 10 km en ville.

Une implantation classique est constituée d'une antenne omnidirectionnelle à l'émission et de deux antennes omnidirectionnelles à la réception. Les antennes sectorielles émettrices ne sont installées que très rarement. Chaque antenne est alimentée par 2 à 6 canaux de 11 W, soit un total maximum de 22 à 67 W avec un gain de l'ordre de 7 dBi. ASTRID a également installé des répéteurs ou des stations de base dans les milieux confinés : métro, tunnels routiers, jonction ferroviaire Nord-Midi, aéroport, etc.

Le réseau ASTRID est dimensionné dès le départ pour une pleine capacité. A priori la puissance installée ne devrait donc pas augmenter avec le nombre d'utilisateurs.

Parmi les utilisateurs sur le territoire de la Région de Bruxelles-Capitale, on compte notamment les 6 zones de police (4300 radios), la police fédérale, le service d'incendie, le Port de Bruxelles, l'OTAN, plusieurs Institutions européennes, des centres hospitaliers, les SPF Justice et Santé publique, la Croix-Rouge, des organismes financiers, des distributeurs d'énergie et diverses entreprises classées Seveso.

Le réseau ASTRID aura pour effet, à terme, de supprimer un grand nombre de réseaux PMR, devenus obsolètes. L'estimation faite à ce sujet par cette société est la suivante : "*Chaque commune compte actuellement 4 à 5 antennes émettrices PMR (police, pompiers, ambulances etc.) susceptibles d'être remplacées par le réseau ASTRID. Étant donné que la Belgique compte 589 communes cela donne un minimum de 2360 antennes PMR qui seront remplacées par environ 500 antennes ASTRID.*" On peut encore quantifier cet aspect en termes de puissance apparente installée (puissance installée multipliée par le gain des antennes). Les antennes PMR émettent généralement à 169 MHz (bande VHF) une puissance de l'ordre de 25 à 100 W avec un gain de l'ordre de 2 dBi. Cela donne une puissance apparente installée en Belgique d'au moins 93 kW. Le réseau ASTRID vise à remplacer tous ces émetteurs par une puissance apparente installée de l'ordre de 100 kW. On peut donc raisonnablement considérer que l'introduction du réseau ASTRID à la place des PMR n'ajoute pas de puissance supplémentaire. La répartition de cette puissance n'est cependant pas la même puisqu'on compte actuellement au moins 4 antennes PMR par commune et que ASTRID a déployé en moyenne 1 site par commune. Il y a, bien entendu, une période de cohabitation entre les deux types de réseau.

La répartition des 23 sites en Région bruxelloise est donnée dans le tableau ci-dessous.

BST address	Type
Bruxelles	omni
Forest	omni
Koekelberg	secteur
Molenbeek	omni
Schaerbeek	omni
Anderlecht	omni
Schaerbeek	secteur
Anderlecht	omni
Bruxelles Justice	secteur
Bruxelles District	omni
Jette	omni
Ixelles/Elsene	omni
Etterbeek	omni
Evere	omni
Anderlecht	omni
Saint-Gilles	omni
Bruxelles	omni
Bruxelles	omni
Brussels	omni
Schaerbeek	omni
Forest	omni
Woluwe-Saint-Lambert	omni
Anderlecht	omni

La société Zenitel a entamé le déploiement d'un réseau TETRA commercial au port d'Anvers. L'extension à d'autres zones sera progressif en fonction des demandes.

1.2.2.6. DECT

Le digital *enhanced cordless telephone* est un standard de communication mobile d'intérieur. Il a été conçu au départ pour offrir un système de communication mobile dans un environnement professionnel. Il est ce titre abondamment utilisé, par exemple, dans les hôpitaux. Ce standard prévoit qu'une base est capable de gérer 10 communications simultanées. L'accès multiple est réalisé dans le domaine temporel (*TDMA*), comme dans le cas du GSM. Une trame dure 10 millisecondes et est composée de 10 *timeslots* de 0.4 millisecondes. La Figure 13 illustre cette structure temporelle. Il convient de mentionner que, quelques modèles spécifiques mis à part, la base DECT émet un signal de balise en permanence, que l'on téléphone ou non.

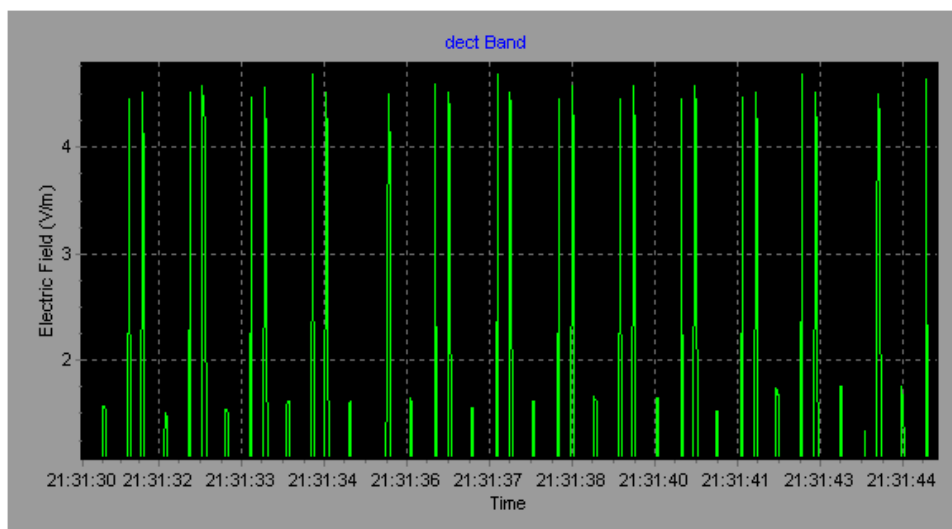


Figure 13. Évolution temporelle du signal d'un portable DECT et de sa base.

1.2.2.7. WiMax

Le standard WIMAX (*worldwide interoperability for microwave access*) est un standard mondial. Il vise à fournir un accès sans fil à large bande dans un rayon de quelques kilomètres autour de la station de base. Pour obtenir un débit élevé en milieu urbain, l'accès multiple est assuré par *OFDMA*. Il se positionne donc comme une alternative aux systèmes câblés comme l'ADSL ou le câble coaxial. Deux bandes de fréquence ont été allouées à ce système : aux alentours de 3.5 GHz et de 5.8 GHz.

En Belgique, 2 opérateurs exploitent ce type de système. La société MacTelecom offre ses services aux clients professionnels et la société Clearwire aux particuliers. Le système installé est en fait un pré-WiMax car il ne correspond pas exactement au standard WiMax. Il fonctionne entre 3400 et 3600 MHz. Chaque canal a une largeur de bande de 7 MHz. Le multiplexage des liaisons montante et descendante se fait dans le domaine temporel (TDD). La Figure 14 illustre la structure temporelle de l'émission d'une station de base pré-WiMax.

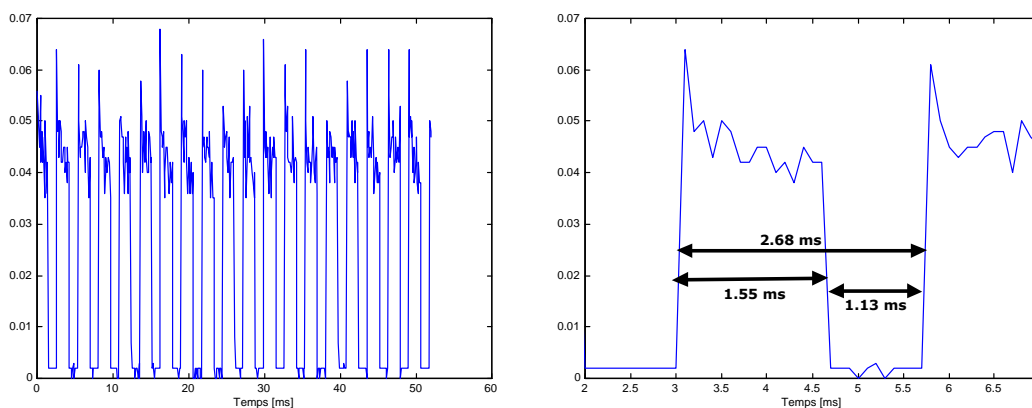


Figure 14. Évolution temporelle du signal d'une station de base pré-WiMax.

1.2.2.8. WiFi

Le standard WiFi (*wireless fidelity*) fournit un accès sans fil à haut débit dans une zone de 50 à 100 m. Le WiFi fait partie de la famille des LAN (*local area network*) ou plus précisément des W-LAN (*wireless LAN*). Vu l'importance des trajets multiples à l'intérieur des bâtiments, l'accès multiple est assuré par la technique *OFDMA*. L'application typique pour laquelle il a été conçu est le réseau informatique dans les bureaux. Son usage est également fort répandu dans les habitations. Le point d'accès est alors connecté au modem ADSL et l'utilisateur n'a pas besoin de câble pour avoir accès à internet.

De plus, l'accès sans fil à internet par WiFi combiné à un système de téléphonie IP permet d'offrir la téléphonie mobile IP à l'intérieur des bâtiments, voire à l'extérieur dans une zone limitée.

Du fait de sa faible puissance émise, l'utilisation du WiFi n'est pas conditionnée par l'octroi d'une licence. Il fonctionne donc dans la bande ISM aux alentours de 2.45 GHz. Comme il n'est pas soumis à une licence et que les équipements sont peu coûteux, des réseaux WiFi sont en train de se développer dans les villes. Le réseau Ozone est bien implanté à Paris et à Bruxelles. Pour cette application, un routage des données du type "mesh" est mis en œuvre. Cela signifie que chaque point d'accès sert également de relais pour transmettre les données d'un point à un autre du réseau. Ce type de routage est indispensable du fait que la puissance autorisée est trop faible que pour obtenir des portées supérieures à quelques dizaines de mètres. Ozone construit donc un réseau du type MAN avec des composants prévus pour un réseau du type LAN.

La Figure 15 illustre la structure temporelle de l'émission d'un point d'accès WiFi.

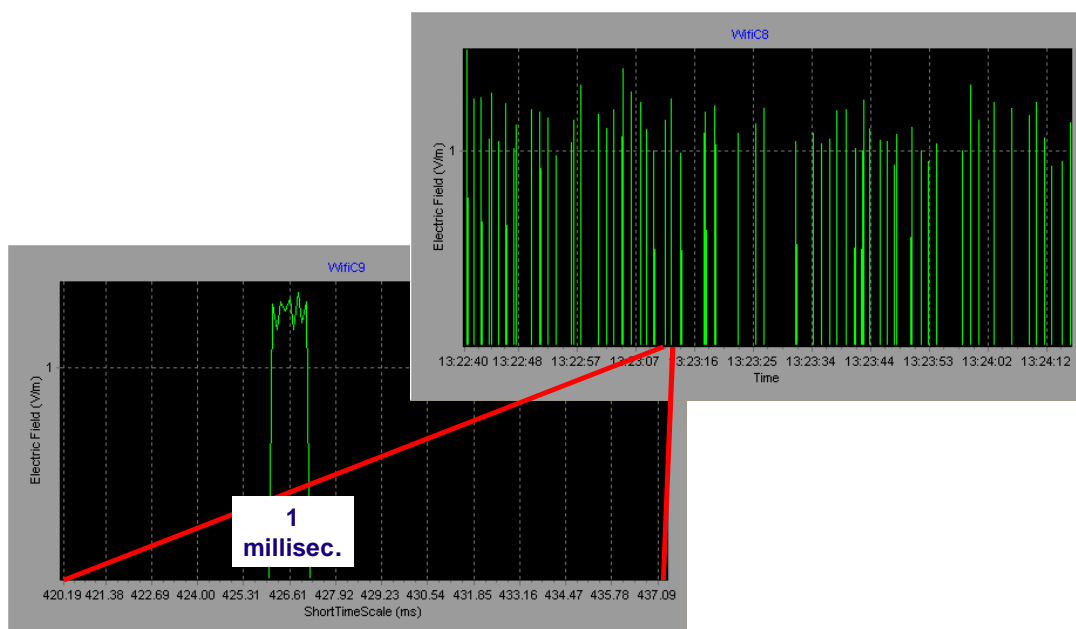


Figure 15. Évolution temporelle du signal d'un point d'accès WiFi.

1.2.2.9. Bluetooth

Le standard Bluetooth appartient à la famille des PAN. Il permet à un équipement électronique de se connecter à un autre et de transmettre des données. Il remplace en quelques sortes le câble USB. Les applications les plus connues sont les souris, claviers et imprimantes sans fil. Il utilise la même bande de fréquence que le WiFi (2.45 GHz).

La Figure 16 illustre la structure temporelle du signal bluetooth.

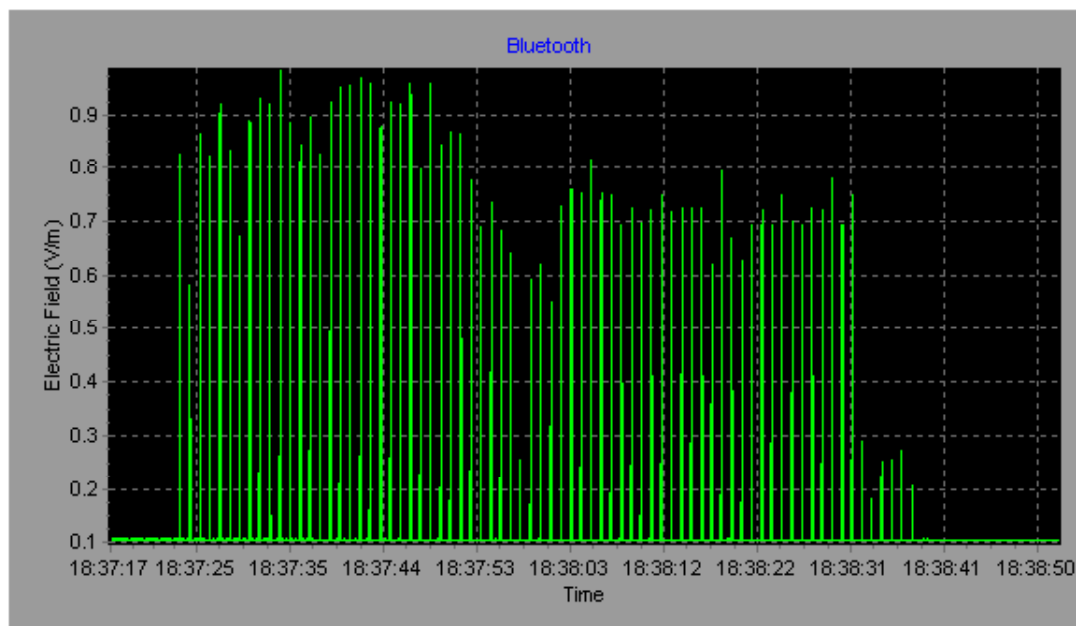


Figure 16. Évolution temporelle du signal bluetooth.

1.2.2.10. UWB

L'UWB (ultra wide band) permet de créer un PAN à très haut débit (jusqu'à 500 Mb/s). Il permet par exemple de connecter sans fil une caméra digitale à un PC. Il remplace alors le câble firewire. Il s'agit d'une méthode de transmission totalement différente des autres. En effet, les systèmes classiques émettent une puissance significative dans une bande de fréquence bien précise qui leur a été spécifiquement assignée. L'UWB, par contre, émet une puissance répartie sur une bande de fréquence très large (plusieurs GHz). Ainsi, la densité spectrale de puissance est très faible et les systèmes classiques ne sont pas (ou peu) perturbés. Le standard UWB est encore en cours de développement et les premières applications ne sont pas encore commercialisées.

1.2.2.11. Zigbee

Le standard Zigbee permet de créer un PAN ou un LAN pour des applications se contentant d'un débit très faible (250 kb/s) mais nécessitant une alimentation par piles avec une autonomie de plusieurs années. La puissance rayonnée est donc très basse, de l'ordre de 1 mW. Il utilise la bande ISM à 2.45 GHz, comme le WiFi et Bluetooth. Les applications principales sont les réseaux de capteurs et les commandes à distance. Il évite par exemple de devoir tirer des câbles de communication entre des capteurs et le concentrateur dans les halls industriels. Dans les habitations, il intervient dans les systèmes domotiques pour connecter les capteurs de température, de luminosité, de présence au système de gestion de la maison. Il remplace également le fil électrique qui va d'un interrupteur à un luminaire. Le routage des informations est basé sur un principe de maillage (mesh).

1.2.2.12. DVB, DVB-T et DVB-H

Le DVB (*digital video broadcasting*) est une norme de télévision numérique. Outre les avantages au niveau de la qualité de l'image et du son, cette norme offre la possibilité d'émettre des sous-titres dans plusieurs langues et prévoit aussi une voie de retour. Elle peut-être exploitée au moyen de différents canaux de propagation. Ainsi, la norme DVB-C permet une diffusion par câble, la norme DVB-S une diffusion par satellite, la norme DVB-T une radiodiffusion terrestre et la norme DVB-H une radiodiffusion terrestre pour des récepteurs mobiles.

Le DVB-T est donc destiné à succéder au système de télédiffusion analogique actuel. Il présente une efficacité spectrale nettement supérieure au système analogique. Il permet en effet de diffuser jusqu'à 6 chaînes de TV dans une bande de 8 MHz alors que le système analogique n'en transmet qu'une seule dans cette même bande. L'utilisation de la technique *OFDM* permet une bonne couverture à haut débit en milieu urbain. La Figure 17 illustre l'évolution temporelle du signal émis. Cette norme est commercialisée en Belgique et en France sous le nom de TNT pour télévision numérique terrestre. La France étant peu câblée, les antennes Yagi (râteaux) sont encore fortement présentes sur les toits. Cela a permis de déployer rapidement une couverture DVB-T. On parle donc pour la France de réception fixe en extérieur. Ce type de réception étant peu exigeant, il permet de mettre 6 chaînes par canal. La France est ainsi fort avancée en matière d'implantation du DVB-T. La Belgique étant par contre fortement câblée, les antennes Yagi ont disparu et peu de gens souhaitent leur réapparition. De ce fait, en Belgique, on vise plutôt une réception avec une petite antenne placée à l'intérieur. Ce type de réception étant plus exigeant, il n'est prévu de mettre que 4 chaînes par canal.

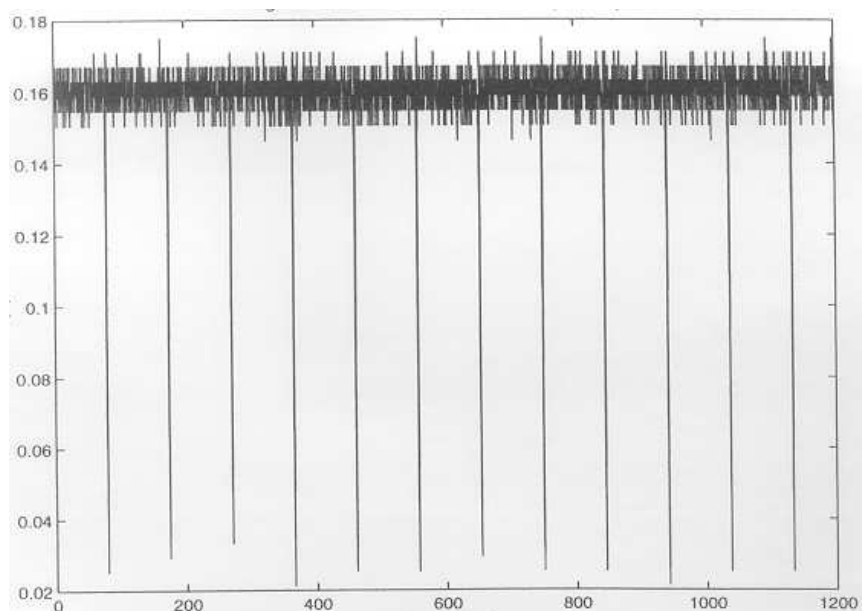


Figure 17. Évolution temporelle du signal DVB-T.

La RTBF exploite un émetteur en Région bruxelloise. Il se situe au sommet de la tour des finances, en face du Jardin botanique. Il couvre l'ensemble de la Région de Bruxelles-capitale et une partie du Brabant flamand. BeTV et TV-Brussel exploitent chacun un petit émetteur à Bruxelles. Le reste de la Belgique est couvert par quelques émetteurs.

Le plan stratégique de transition vers la radiodiffusion numérique élaboré par la Ministre Fadila Laanan prévoit de privilégier autant que possible la télédiffusion numérique par câble : télédistribution par câble coaxial et par ligne bifilaire. De ce fait, l'extinction des émetteurs de télédiffusion analogique en Communauté française n'est prévue que pour le 30 novembre 2011. Comme l'analogique restera en service jusqu'à cette date, il n'y a pour l'instant que très peu de place pour le numérique. La Communauté flamande, par contre, a décidé d'arrêter les émissions en analogique pour passer au numérique dès 2008. On estime actuellement à quelques pourcents la proportion de téléspectateurs qui captent en DVB-T. Un maximum de 2 émetteurs sera nécessaire à terme pour couvrir correctement l'ensemble de la Région. Le nombre de canaux émis et donc la puissance rayonnée dépendront du nombre de chaînes différentes à diffuser.

Le DVB-H est quant à lui destiné à offrir des services de télédiffusion à des terminaux mobiles qui se déplacent, éventuellement à une vitesse de 120 km/h. Des essais sont en cours à Bruxelles. La mise en exploitation est prévue pour le courant de l'année 2008. Un maximum de 10 émetteurs sera nécessaire à terme pour couvrir correctement l'ensemble de la Région. Le nombre de canaux émis et donc la puissance rayonnée dépendront du nombre de chaînes différentes à diffuser.

Le DVB-H est un concurrent de l'extension MDMS de l'UMTS. Les opérateurs UMTS devront en effet choisir entre le déploiement du MDMS ou l'utilisation des signaux DVB-H pour offrir la télévision portable à leurs abonnés.

1.2.2.13. DAB, DRM, T-DAB+ et T-DMB

Il s'agit de normes de radiodiffusion numérique. Le DAB est destiné à remplacer la FM et le DRM est destiné à remplacer la AM. Ils appliquent la technique *OFDM*.

Le DAB doit être émis dans des anciens canaux de télévision analogique. L'idée étant que, suite à la transition vers le numérique, des canaux de télévision vont être libérés et pourront être occupés par le DAB. Vu que les canaux de télévision analogique francophones ne seront pas libérés prochainement, il y a actuellement peu de place pour le DAB. Dans un canal de télévision de 8 MHz, on place 4 canaux DAB qui peuvent contenir jusqu'à 8 chaînes différentes chacun.

Le DAB est déjà en services depuis quelques années. Il y a un émetteur sur la tour des finances. On estime qu'il y a actuellement quelques dizaines de milliers d'utilisateurs. Ces normes devraient commencer à se généraliser dans le courant de l'année 2008. Le DRM est actuellement à l'essai. La RTBF prévoit de l'utiliser pour couvrir le bassin méditerranéen par réflexion ionosphérique à partir de la Belgique. Il n'y a pas d'extinction programmée des émetteurs analogiques étant donné le grand nombre de récepteurs en service.

1.2.3. Conclusion

La transition de l'analogique au numérique continue. C'était déjà fait pour la voix et les données. C'est à présent en cours pour la télédiffusion et la radio.

Les techniques de radiocommunication permettent de transmettre des débits d'informations de plus en plus élevés. Cela permet d'offrir de plus en plus de services à des terminaux de plus en plus mobiles. Il semble également que les consommateurs professionnels et privés soient friands de ces services.

L'augmentation du nombre de services et de l'utilisation de ceux-ci entraîne bien entendu une augmentation du nombre d'émetteurs. Il se fait cependant que la puissance nécessaire pour offrir un débit donné est de plus en plus faible. Ainsi, le système GSM qui produit actuellement la plus grande part de la pollution électromagnétique en ville prend peu à peu un aspect vieillot en regard de ce qui se fait par exemple avec le *OFDMA*.

Un fait marquant de l'évolution actuelle de l'offre de télécommunication est la convergence vers une offre globale de systèmes autrefois cantonnés à un service limité. Les opérateurs de téléphonie fixe offrent à présent l'accès à internet et distribuent la télévision. Les télé distributeurs offrent l'accès à internet et la téléphonie fixe. Les opérateurs GSM/UMTS offrent l'accès à internet et la télévision. L'accès internet offre la téléphonie fixe et mobile.

I.3. VOLET "INFRASTRUCTURES ET ÉQUIPEMENTS"

Le niveau de pollution électromagnétique généré par les émetteurs est directement lié aux caractéristiques techniques de ceux-ci. Le tableau donné aux deux pages suivantes résume les principales caractéristiques des différents émetteurs rencontrés couramment. La première colonne définit le type de système concerné et le type d'émetteur. En effet, pour un même système, il est possible de trouver, par exemple, des stations de base de macrocellule, de microcellule, voire même de picocellule. Il faut évidemment faire aussi la distinction entre la station de base et le portable du même système. La deuxième colonne situe la gamme de fréquence allouée en Belgique au système concerné. La troisième colonne définit le type d'antenne utilisé. Les quatrième et cinquième colonnes donnent respectivement la puissance de l'émetteur et le gain maximum de l'antenne considérée. Pour certains systèmes, des gammes de valeurs sont données puisque cette caractéristique peut varier d'un endroit à l'autre. La sixième colonne précise la hauteur par rapport au sol à laquelle l'antenne se trouvera généralement. Les septième et huitième colonnes donnent l'ouverture angulaire du lobe principal de l'antenne dans les plans vertical et horizontal. La neuvième colonne précise la longueur de l'antenne. Enfin, la dernière colonne fournit une évaluation de la distance à l'émetteur pour laquelle le champ électrique rayonné vaut 3 V/m dans la direction de rayonnement principal de l'antenne.

Les données fournies dans ce tableau sont, pour certaines, des valeurs approximatives qui ont essentiellement pour but de fixer des ordres de grandeur et d'évaluer l'impact des systèmes les uns par rapport aux autres.

Type	Fréquence [MHz]	Type antenne	Puissance de crête [W]	Gain [dBi]	Hauteur [m]	Ouverture V. [degrés]	Ouverture H. [degrés]	Longueur [m]	R _{3V/m} crête [m]
Base macro GSM 900	935 - 960	panneau	10 - 60	15 - 18	20 - 30	7 - 10	60	2 - 2.5	32 - 112
Base micro GSM 900	935 - 960	omni	2 - 4	2 - 8	3 - 10	13 - 60	omni	0.2 - 0.7	3 - 9
Base pico GSM 900	935 - 960		0.5 - 1	3	2 - 4	60	60	0.1	2 - 3
Portable GSM 900	890 - 915	omni	0.2 - 2	0	-	omni	omni	-	1 - 3
Base macro GSM 1800	1805 - 1880	panneau	10 - 60	15 - 18	20 - 30	7 - 10	60	1 - 1.6	32 - 112
Base micro GSM 1800	1805 - 1880	omni	2 - 4	2 - 8	3 - 10	13 - 60	omni	0.2 - 0.7	3 - 9
Base pico GSM 1800	1805 - 1880		0.5 - 1	3	2 - 4	60	60	0.1	2 - 3
Portable GSM 1800	1710 - 1785	omni	0.1 - 1	0	-	omni	omni	-	0.6 - 2
Base UMTS FDD	2110 - 2170	panneau	20	17 - 19	20 - 30	5 - 10	60	1 - 1.6	58 - 73
Portable UMTS FDD	1920 - 1980	omni	0.1 - 2	0	-	omni	omni	-	0.6 - 2.6
Base pico UMTS TDD	1900 - 1920 2010 - 2025		0.5 - 1	3	2 - 4	60	60	0.1	1 - 1.4
Portable UMTS TDD	1900 - 1920 2010 - 2025	omni	0.1 - 1	0	-	omni	omni	-	0.6 - 1.8
Base omni TETRA	390 - 400 420 - 430	omni	22 - 67	7.5	30 - 40	17	omni	3	20 - 35
Base sect. TETRA	390 - 400 420 - 430	panneau	17 - 28	14	30 - 40	20	90	2	38 - 48
Base DECT	1880 - 1900	omni	0.25	0	-	omni	omni	-	0.9
Portable DECT	1880 - 1900	omni	0.25	0	-	omni	omni	-	0.9
Base omni WiMax	3450 - 3500 3550 - 3600	omni	2	10	20 - 50	7	omni	0.9	8
Base sect. WiMax	3450 - 3500 3550 - 3600	panneau	2	15.6	20 - 50	8	90	0.65	16
Modem WiMax	3450 - 3500 3550 - 3600	panneau	0.2	10	-		60		2.6
Point d'accès WiFi	2400 - 2483	omni	0.06	2	2	80	omni	0.16	0.6
Carte WiFi	2400 - 2483	omni	0.10	0	-	omni	omni	-	0.6
Bluetooth	2402 - 2480	omni	0.0025	0	-	omni	omni	-	0.09

Type	Fréquence [MHz]	Type antenne	Puissance de crête [W]	Gain [dBi]	Hauteur [m]	Ouverture V. [degrés]	Ouverture H. [degrés]	Longueur [m]	R _{3V/m} crête [m]
UWB	3 100 – 10 600			0	-	omni	omni	-	
Zigbee	868 2400 - 2483	omni	0.0005	0	-	omni	omni	-	0.04
DVB-T	174 – 230 470 - 862	omni	30	18.2	140	1.5	omni		81
DVB-H	174 – 230 470 - 862	omni	70	7.5	30 - 40	15	omni		36
DAB	174 – 230 470 - 862	omni	30	18.2	140	1.5	omni		81
DRM	4 – 26	omni							

I.4. VOLET "PHYSIQUE ET BIOPHYSIQUE"

I.4.1. Introduction

La question de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques fait intervenir quelques notions de base qui relèvent essentiellement de la physique. L'objectif de ce volet est de présenter ces notions de façon aussi intuitive que possible pour permettre au lecteur d'aborder les volets suivants.

I.4.2. Fréquence et longueur d'onde

La fréquence d'un phénomène physique est le nombre de fois que ce phénomène se répète par unité de temps. Elle fournit donc le nombre de cycles par seconde, ce que les conventions internationales prescrivent de mesurer en hertz (Hz), du nom du physicien Hertz, qui déduisit le concept de propagation des ondes à partir de la théorie élaborée par Maxwell. Le Tableau 1 précise les multiples de cette unité.

1 Hz	1 cycle par seconde
1 kHz	1 000 Hz
1 MHz	1 million de Hz
1 GHz	1 milliards de Hz
1 THz	1 000 milliards de Hz

Tableau 1. Interprétation du hertz et de ses multiples.

Un phénomène électromagnétique peut aussi se caractériser par la longueur d'onde plutôt que par la fréquence. Si on pouvait faire une photographie d'une onde à un instant donné, on verrait une succession de maxima, de passages par zéro et de minima suivant une fonction sinusoïdale. La distance entre 2 maxima successifs est égale à la longueur d'onde. Fréquence et longueur d'onde sont associées parce que leur produit est une constante. La longueur d'onde (notée λ) est donc d'autant plus petite que la fréquence est élevée :

$$\text{fréquence} \times \text{longueur d'onde} = \text{constante}$$

Cette constante est appelée communément la vitesse de la lumière. Il y a lieu de noter soigneusement qu'il s'agit de la vitesse de la lumière dans le milieu considéré. Dans le vide et dans l'air elle vaut environ 300.000 km/s :

$$f \text{ (Hz)} \lambda \text{ (m)} = 300.000.000 \text{ m/s dans le vide et dans l'air}$$

Il est utile de noter qu'une expression commode pour calculer la longueur d'onde (en mètres), **dans le vide**, à partir de la fréquence est:

$$\lambda \text{ (m)} = 300 / f \text{ où la fréquence } f \text{ est en MHz}$$

Le Tableau 2 donne quelques exemples de fréquences et de longueurs d'onde que l'on rencontre dans la vie courante.

Application	Fréquence	Longueur d'onde
Distribution de l'énergie électrique	50 Hz	6 000 km
Radiodiffusion FM	100 MHz	3 m
GSM	900 MHz	33 m
Four à micro-ondes	2.45 GHz	12 cm
Télévision directe par satellite	10 GHz	3 cm
Radars anticollisions	100 GHz	3 mm

Tableau 2. Exemples de fréquences et longueurs d'ondes.

I.4.3. Champs E, H, S et TAS

Le champ électrique peut être défini intuitivement comme l'influence à distance d'une tension électrique sur une particule chargée. Ainsi, deux fils conducteurs entre lesquels existe une tension de 220 V vont avoir un effet à distance sur toute particule chargée (Figure 18(a)). L'effet de cette tension est appelé "champ électrique", il se note E et s'exprime en volts par mètre (V/m).

Le champ magnétique, quant à lui, peut être défini comme l'influence à distance d'un courant électrique sur une particule chargée en mouvement. Ainsi, lorsqu'un fil conducteur est parcouru par un courant (Figure 18(b)), ce courant exerce une influence à distance sur toute particule chargée qui est en mouvement par rapport au fil. L'effet de ce courant est appelé "champ magnétique", il se note H et s'exprime en ampères par mètre (A/m).

Une tension électrique continue produira uniquement un champ électrique. De même, un courant continu produira uniquement un champ magnétique. Par contre, si la fréquence est non-nulle, c'est-à-dire la tension ou le courant varie dans le temps, un champ électromagnétique sera produit. Les champs électrique et magnétique sont alors couplés l'un à l'autre. Ce couplage sera d'autant plus fort que la fréquence est élevée. Ainsi, un fil d'alimentation d'une lampe éteinte amène la tension 220 V à la fréquence de 50 Hz mais ne transporte aucun courant. La tension produira un champ électrique, comme expliqué plus haut, mais également un champ magnétique. Ce dernier sera cependant très faible vu que la fréquence est très basse.

Dans le cas d'un émetteur de radiocommunication (Figure 18(c)), l'antenne est un conducteur parcouru par une tension et un courant à fréquence très élevée (kHz, MHz, GHz). Le couplage entre les champs électrique et magnétique est alors très intense et c'est ce couplage qui explique le phénomène de propagation des ondes électromagnétiques sur de grandes distances. C'est bien entendu le phénomène qui est recherché pour transmettre les signaux de communication.

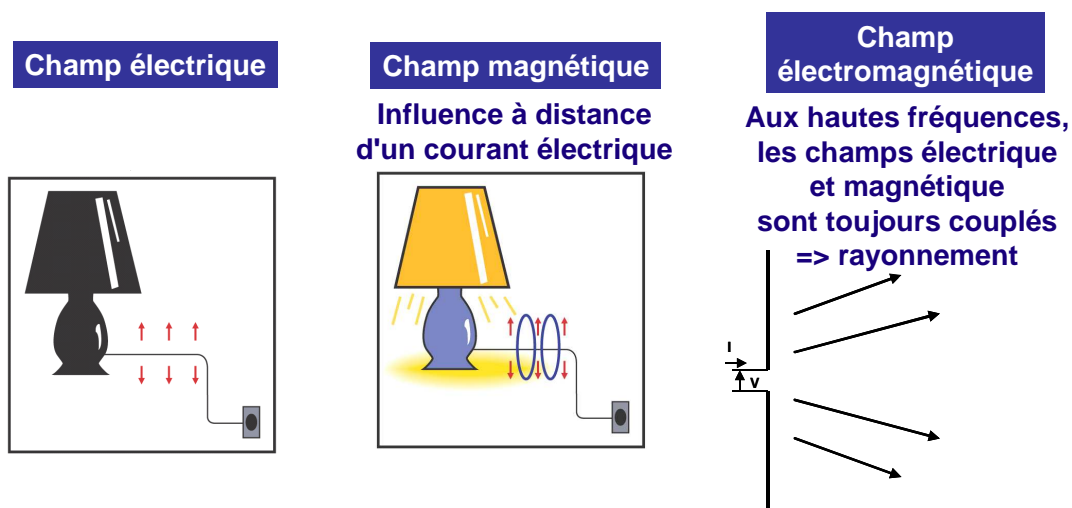


Figure 18. Champs électrique, magnétique et électromagnétique.

Une onde électromagnétique transmet de la puissance. Cette puissance est distribuée sur une surface qui entoure l'émetteur. En un point de cette surface, on trouve donc une densité surfacique de puissance, généralement appelée "densité de puissance". Elle se note S et s'exprime en watts par mètre-carré (W/m^2). Cette densité de puissance est en fait le produit du champ électrique par le champ magnétique.

Lorsque l'onde électromagnétique qui transporte une densité de puissance atteint un matériau dissipatif (par exemple un tissu vivant), une partie de la puissance va être absorbée par le tissu. On peut alors définir une

densité massique de puissance absorbée : nombre de watts absorbés par kilo de tissu. Cette grandeur s'appelle alors le taux d'absorption spécifique (TAS) ou encore *specific absorption rate* (SAR) en anglais. Il s'exprime en watts par kilogramme (W/kg).

I.4.4. Spectre électromagnétique

La fréquence des phénomènes physiques peut être extrêmement variée. On connaît le champ magnétique terrestre qui est généralement considéré comme constant dans le temps (sa fréquence est nulle). On connaît également les rayons X dont la fréquence est de l'ordre de 10^{20} Hz (longueur d'onde de quelques picomètres - pm). Toute cette gamme de fréquence des phénomènes électromagnétiques s'appelle le spectre électromagnétique. Il est représenté à la Figure 19.

Aux fréquences les plus élevées, les photons qui constituent l'onde ont une énergie suffisante que pour ioniser la matière, c'est-à-dire transformer un atome ou une molécule électriquement neutre en un élément électriquement positif en ayant extrait un ou plusieurs électrons. De ce fait, les rayonnements capable d'ioniser sont appelés rayonnement ionisants. Il s'agit en fait des rayonnements dont la fréquence est supérieure à celle du rayonnement visible : UV, X, gamma, etc. Les substances radioactives, par exemple, produisent ces types de rayonnement et leurs effets cancérogènes sont connus depuis longtemps.

Les rayonnements dont la fréquence est inférieure à celle du visible ont une énergie trop faible que pour ioniser la matière. On parle donc alors, par opposition, de rayonnements non-ionisants. On distingue classiquement 4 familles de fréquences parmi ces rayonnements non-ionisants. Les très basses fréquences vont de 0 Hz à quelques dizaines de kHz. Les applications principales sont le transport de l'énergie électrique et le chauffage par induction. Les radiofréquences vont d'environ 100 kHz à quelques centaines de MHz, voire quelques GHz. Il s'agit des fréquences utilisées pour les radiocommunications. Les micro-ondes (ou hyperfréquences) vont de quelques GHz à quelques centaines de GHz. On y trouve les transmissions par satellites, les radars et les liaisons très directives (faisceaux hertziens). Les infrarouges quant à eux se situent dans les THz (térahertz). Les applications sont le chauffage par rayonnement et le barbecue mais aussi les communications de point à point à très large bande.

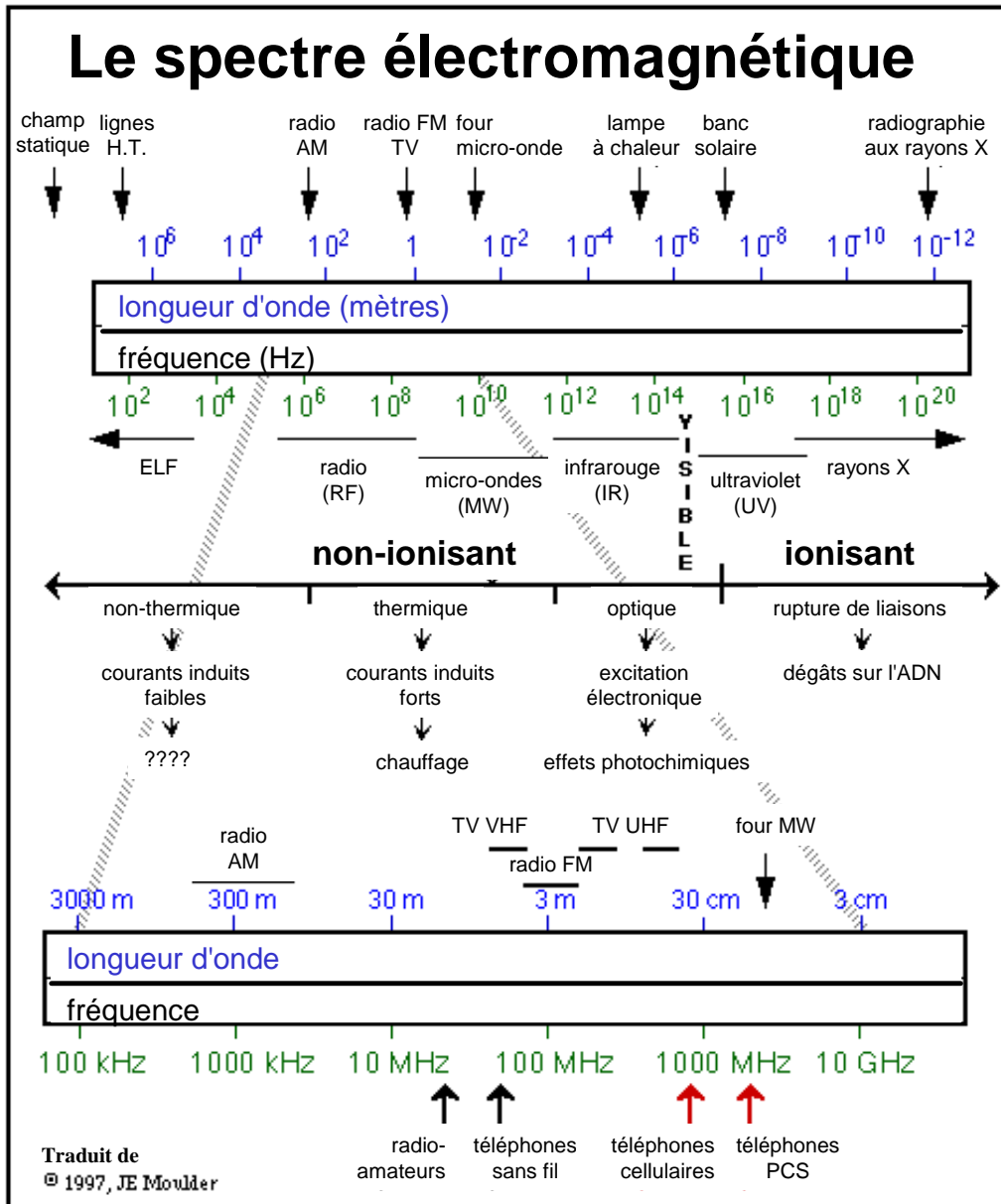


Figure 19. Représentation du spectre électromagnétique.

I.4.5. Profondeur de peau

Contrairement à ce qu'on entend dire parfois, les ondes pénètrent d'autant moins dans un matériau, et notamment dans un corps humain, que leur fréquence est plus élevée. On démontre en effet que la profondeur à laquelle une onde pénètre dans un matériau est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence. Elle est aussi inversement proportionnelle à la racine carrée de la conductivité du matériau. On appelle ce phénomène l'effet de peau. La conductivité d'un matériau, et donc du corps humain, fait que celui-ci absorbe de la puissance. L'amplitude du champ décroît donc en fonction de la profondeur de pénétration. La profondeur à laquelle le champ de l'onde ne vaut plus qu'environ un tiers de sa valeur à la surface du corps s'appelle la

profondeur de peau. Le calcul montre que la puissance à une profondeur égale à trois profondeurs de peau ne vaut plus qu'environ 1% de la valeur à la surface du corps. On peut noter que c'est ce même effet de peau qui permet d'obtenir la croûte appétissante que l'on aime sur une pièce de viande bien grillée, au feu de bois par exemple : le feu dégage des ondes infrarouges et l'effet de peau y est particulièrement marqué, car ces ondes infrarouges sont à fréquence bien plus élevée que les micro-ondes; la profondeur de peau correspondante est donc bien plus petite. Dans le domaine des fréquences non-ionisantes et notamment aux micro-ondes, un organe intérieur du corps humain sera donc d'autant moins illuminé par l'onde que celle-ci est à fréquence plus élevée. Le tableau suivant présente quelques profondeurs de peau aux micro-ondes, obtenues en tenant compte des propriétés électromagnétiques du corps humain et de leur variation en fonction de la fréquence.

	radio FM	émetteur TV	GSM	DCS
fréquence (MHz)	100	450	900	1 800
profondeur de peau (cm)	3	1.5	1	0.7
profondeur à laquelle la puissance vaut 1% (cm)	9	4.5	3	2

La Figure 20 représente la variation de la puissance absorbée à l'intérieur d'un corps humain en fonction de la profondeur de pénétration, à diverses fréquences micro-ondes : nous sommes de moins en moins transparents aux ondes électromagnétiques non-ionisantes lorsque la fréquence augmente. Dans le domaine du visible, la profondeur de peau est quasiment nulle : nous ne sommes plus transparents du tout.

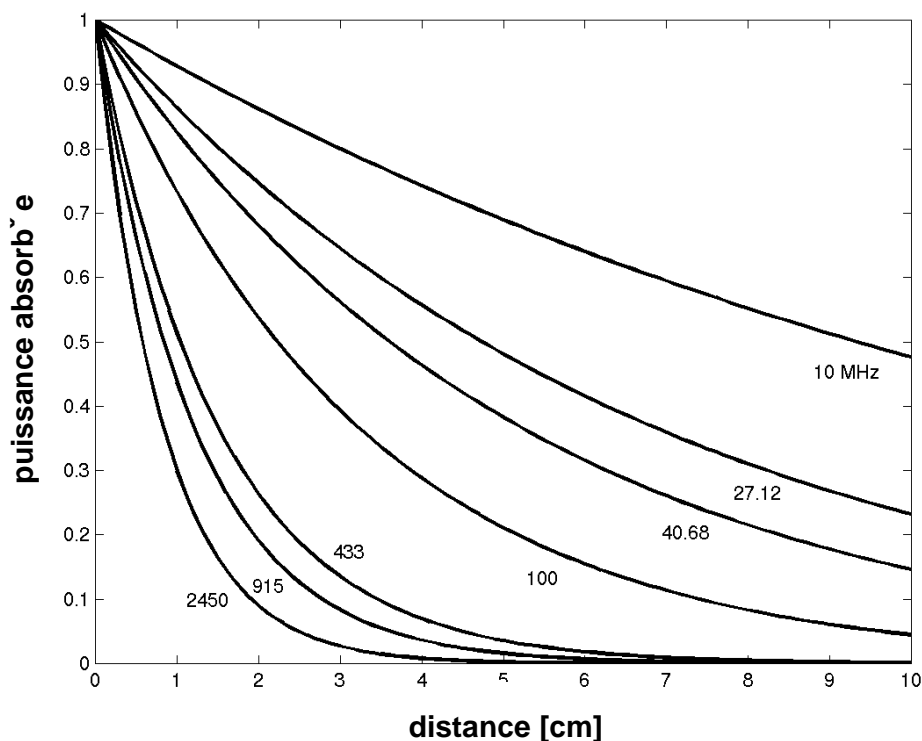


Figure 20. Évolution de la puissance absorbée à l'intérieur d'un tissu vivant pour différentes fréquences exprimées en MHz.

I.4.6. Somme quadratique (RSS)

I.4.6.1. Résultante vectorielle (RSS dans l'espace)

Le champ électrique est un vecteur défini dans l'espace par 3 composantes (x,y,z). L'intensité du champ est définie comme la norme de la résultante de ces 3 composantes vectorielles. Comme les axes x, y et z sont orthogonaux, la norme de la résultante de ces 3 composantes est calculée par

$$|E| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

Il s'agit donc de la racine carrée de la somme des carrés des composantes, soit la somme quadratique. En anglais, on la nomme *root sum square (RSS)*. Dans le cadre de l'analyse de la pollution électromagnétique, c'est cette résultante spatiale qu'il faut considérer.

I.4.6.2. Combinaison de signaux décorrélés (RSS en fréquence)

Lorsqu'on mesure un niveau produit par plusieurs émetteurs, ces signaux n'ont rien à voir l'un avec l'autre. Il n'y a aucune corrélation entre eux, on dit qu'ils sont décorrélés. Dans ce cas, ces signaux doivent être additionnés en termes de densité de puissance et pas en termes de champs. La résultante de N niveaux dus à des signaux décorrélés est alors calculée par

$$E_T = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_N^2}$$

On retrouve également dans ce cas-ci l'expression d'une somme quadratique (RSS). Dans le cadre de l'analyse de la pollution électromagnétique, c'est de cette façon qu'il convient de combiner les niveaux produits par différents émetteurs.

I.4.7. Valeur efficace (RMS)

I.4.7.1. Généralités

Les champs électriques et magnétiques varient dans le temps : l'intensité de la porteuse varie à une fréquence très élevée (100 MHz, 900 MHz, 2450 MHz, etc.) et le signal qui est imprimé sur cette porteuse peut faire varier l'intensité de celle-ci à une fréquence beaucoup plus basse (8.3 Hz, 100 Hz, 217 Hz, quelques kHz, etc.). La valeur efficace est une valeur de champ qui correspond à une densité de puissance équivalente à la moyenne temporelle du signal mesuré. Le calcul de cette moyenne passe par le carré des valeurs de champs mesurées, on l'appelle donc aussi la valeur quadratique moyenne (*root mean square, RMS*).

I.4.7.2. Valeur efficace de la porteuse simple (CW - continuous wave, onde entretenue)

L'expression mathématique du champ E d'une porteuse simple (non modulée) est donnée par :

$$E(t) = E_0 \sin(2\pi f t)$$

Dans cette expression, f est la fréquence de la porteuse et t est le temps qui s'écoule, tandis que E_0 est l'amplitude de la porteuse. Le champ E passe donc alternativement de la valeur $+E_0$ à la valeur $-E_0$. Comme les systèmes biologiques ne peuvent pas réagir à une cadence correspondant à la fréquence des porteuses utilisées dans les systèmes de radiocommunication, on s'intéresse plutôt à la moyenne quadratique (valeur efficace) du champ E. Elle est définie par :

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E_0^2 \sin^2(2\pi f t) dt} = \frac{E_0}{\sqrt{2}}$$

où T est la période de la porteuse ($T = 1/f$).

Dans le cadre de l'analyse de la pollution électromagnétique, c'est toujours cette valeur efficace qui est considérée.

I.4.7.3. Valeur efficace vraie de la porteuse modulée (*true RMS*)

La mesure de la pollution électromagnétique montre un niveau qui varie rapidement dans le temps. Chacun de ces échantillons d'une mesure suffisamment rapide correspond à la valeur efficace de la porteuse à l'instant de prise de l'échantillon. Il est possible d'en extraire des moyennes sur des durées plus longues. En ce qui concerne le champ électrique ou le champ magnétique, la bonne pratique est d'extraire la moyenne quadratique, c'est-à-dire la racine carrée de la moyenne des carrés des échantillons considérés, encore appelée valeur efficace vraie. Elle est calculée comme suit :

$$E_{T\ RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i^2}$$

où N est le nombre d'échantillons pris en compte pour calculer la moyenne quadratique. Cette moyenne est dite "vraie" car elle prend en compte la variation réelle du niveau, elle ne fait pas l'hypothèse que cette variation est sinusoïdale. Ce point est important puisqu'on sait que les variations du signal GSM, notamment, ne sont pas sinusoïdales.

Dans le cadre de l'analyse de la pollution électromagnétique, la façon par laquelle ces variations sont prises en compte peut différer d'une norme à l'autre. L'ICNIRP considère la moyenne quadratique sur 6 minutes alors que l'ordonnance bruxelloise considère la valeur de crête.

I.5. VOLET "NORMES ET SANTÉ"

I.5.1. Introduction

Les compétences de l'ANPI sont essentiellement techniques. Pour traiter les aspects biologiques et sanitaires liés à l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques aux radiofréquences, il a été fait appel à André Vander Vorst, professeur émérite de l'Université catholique de Louvain et membre du Conseil supérieur de santé (CSS). Celui-ci a remis un texte qui est retranscrit intégralement dans l'Annexe 1.

La limitation de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques radiofréquences a fait l'objet d'une activité législative importante durant ces dernières années. Il existe des recommandations internationales qui sont émises par la "International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection" (ICNIRP) et qui découlent de l'organisation mondiale de la santé (OMS). En plus de cela il existe de nombreuses recommandations, normes et chartes qui émanent du Conseil de l'Europe, de la Commission européenne, des états, des régions et même de certaines villes. Certaines de ces limites sont expliquées ci-dessous. On pourra constater la grande diversité des valeurs limites. On relèvera ainsi que le rapport entre la limite la moins stricte et la limite la plus stricte pour le grand public et à la fréquence de 900 MHz est de 4 500.

Les normes ayant force de loi sont recensées sur le site web de l'OMS. On peut atteindre cette base de données à partir de l'adresse suivante :

http://www.who.int/topics/electromagnetic_fields/fr/

en choisissant le lien :

- Champs électromagnétiques : base de données mondiale sur les normes - en anglais

I.5.2. Recommandation de l'OMS

Un texte de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) et datant de 1993 [1] est à l'origine de la plupart des normes et recommandations en vigueur dans le monde. Deux extraits de ce texte sont donnés ci-dessous.

1.1.6.1 Thermal effects

The deposition of RF energy in the human body tends to increase the body temperature. During exercise, the metabolic heat production can reach levels of 3-5 W/kg. In normal thermal environments, an SAR of 1-4 W/kg for 30 minutes produces average body temperature increases of less than 1°C for healthy adults. Thus, an occupational RF guideline of 0.4 W/kg SAR leaves a margin of protection against complications due to thermally unfavourable environmental conditions. For the general population, which includes sensitive subpopulations, such as infants and the elderly, an SAR of 0.08 W/kg would provide an adequate further margin of safety against adverse thermal effects from RF fields.

27

1.1.7 Exposure standards

1.1.7.1 Basic exposure limits

To protect workers and the general population from the possible health effects of exposure to electromagnetic fields, basic exposure limits have been determined on the basis of knowledge of biological effects. Different scientific bases were used to develop the limits for frequencies above and below about 1 MHz. Above 1 MHz, biological effects on animals were studied to determine the lowest value of the whole body average SAR that caused detrimental health effects in animals. This value was found to be in the 3-4 W/kg range.

The vast majority of results pertained to exposures in the low GHz region. Thus, to determine the effects at lower frequencies requires an assumption concerning the frequency dependence of the biological response. Since the observed bioeffects in the 1-4 W/kg range are believed to be thermal, the SAR threshold was assumed to be independent of frequency. It was considered that exposure of humans to 4 W/kg for 30 minutes would result in a body temperature rise of less than 1°C. This body temperature rise is considered acceptable.

A safety factor of 10 is introduced, in order to allow for unfavourable, thermal, environmental, and possible long-term effects, and other variables, thus arriving at a basic limit of 0.4 W/kg. An additional safety factor should be introduced for the general population, which includes persons with different sensitivities to RF exposure. A basic limit of 0.08 W/kg, corresponding to a further safety factor of 5, is generally recommended for the public at large.

23

Ce texte montre clairement que l'effet biologique considéré est l'échauffement des tissus et préconise d'appliquer un facteur de sécurité de 10 pour les travailleurs et de 50 pour le grand public afin de se prémunir de cet effet bien connu. Cette base de travail appelle un certain nombre de critiques. Aucun facteur de précaution n'est prévu dans cette recommandation. Les facteurs de 10 et 50 sont des facteurs de sécurité destinés à prémunir vis-à-vis des effets d'échauffement bien connus. Il manque un facteur de précaution pour prémunir des effets autres que thermiques qui sont mal connus. Une deuxième critique concerne l'application du facteur de sécurité de 50 (10 pour les travailleurs). Celui-ci est appliqué à une TAS (SAR) de 4 W/kg alors que l'OMS écrit "1 à 4 W/kg". Le facteur de sécurité aurait donc dû être appliqué à la borne inférieure. Les critiques sont exposées par le professeur André Vander Vorst dans l'Annexe 1, relative aux aspects sanitaires.

I.5.3. Recommandations de l'ICNIRP

Les recommandations internationales rédigées par l'ICNIRP en 1998 [2] ont été établies sur base du texte de l'OMS présenté à la section précédente. Les recommandations de l'ICNIRP sont structurées en 2 phases. La première définit des restrictions de base exprimées en puissance électromagnétique absorbée par kilogramme de tissus exposés. On parle de taux d'absorption spécifique (TAS) en français et de *specific absorption rate* (SAR) en anglais. En ce qui concerne une exposition de l'ensemble du corps à des champs aux radiofréquences, la limite est de 0.4 W/kg pour les travailleurs et de 0.08 W/kg pour le grand public. Vu que le TAS n'est pas une grandeur facilement mesurable, l'ICNIRP a défini une deuxième phase qui consiste en des niveaux de références qui garantissent le respect des valeurs limites du TAS et qui sont eux directement mesurables sur le terrain. Ces niveaux de référence sont exprimés en champ électrique (E en V/m), champ magnétique (H en A/m), induction magnétique (B en μT) et densité de puissance (S en W/m^2). Vu que le niveau d'exposition peut être variable dans le temps, l'ICNIRP recommande de considérer la moyenne sur une durée de 6 minutes du niveau d'exposition mesuré. Les valeurs du niveau de référence pour le grand public sont données dans le Tableau 3. On constate qu'entre 10 et 400 MHz, le champ électrique garantissant le respect du TAS limite est plus faible que pour le reste du spectre. L'ICNIRP justifie cette limite plus stricte par le fait que des phénomènes de résonance sur l'ensemble du corps peuvent se produire dans cette bande de fréquence et que donc l'absorption de l'énergie électromagnétique incidente y est favorisée.

	E [V/m]	H [A/m]	B [μT]	S [W/m^2]
0.15 – 1 MHz	87	0.73/f	0.92/f	-
1 – 10 MHz	$87/f^{1/2}$	0.73/f	0.92/f	-
10 – 400 MHz	28	0.073	0.092	2
400 – 2000 MHz	$1.375 f^{1/2}$	$0.0037 f^{1/2}$	$0.0046 f^{1/2}$	f/200
2 – 300 GHz	61	0.16	0.20	10

Tableau 3. Niveaux de référence recommandés par l'ICNIRP pour le grand public lors d'une exposition de l'ensemble du corps; f en MHz.

	E [V/m]
Radio FM	28
TV 200 MHz	28
TETRA	28
TV 600 MHz	34
GSM 900	41
GSM 1800 et DECT	58
UMTS, WiFi, WiMax	61

Tableau 4. Niveaux de référence recommandés par l'ICNIRP pour le grand public pour différents services radio.

Les recommandations de l'ICNIRP pour le grand public ont été adoptées dans la législation nationale de nombreux pays. On peut citer notamment la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni. À partir du Tableau 3 on

peut donner quelques exemples de niveaux de référence pour des services radio précis. De tels exemples sont fournis dans le Tableau 4.

Lors de l'évaluation d'une exposition simultanée à des champs de fréquences différentes, les deux inégalités suivantes doivent être satisfaites :

$$\sum_{i=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left(\frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{i>1\text{MHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad ; \quad \sum_{j=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left(\frac{H_j}{d} \right)^2 + \sum_{j>1\text{MHz}} \left(\frac{H_j}{H_{L,j}} \right)^2 \leq 1$$

où

E_i est le champ électrique à la fréquence i

$E_{L,i}$ est le niveau de référence de champ électrique à la fréquence i

H_j est le champ magnétique à la fréquence j

$H_{L,j}$ est le niveau de référence de champ magnétique à la fréquence j

$c = 87/f^{1/2}$ (f en MHz)

$d = 0.73/f$ (f en MHz)

I.5.4. Recommandation et directive européennes

I.5.4.1. Recommandation européenne pour le grand public

En 1999, le Conseil de l'Europe a repris les recommandations pour le grand public de l'ICNIRP comme base d'une recommandation à destination des pays membres de l'Union [3]. Il ne s'agit pas d'une norme mais bien d'une recommandation. Les pays membres restent libres d'adopter une législation éventuellement plus stricte. La structure de cette recommandation est donc identique à celle de l'ICNIRP. Les niveaux de référence sont donc les niveaux donnés dans le Tableau 2. À la différence de l'ICNIRP, le Conseil de l'Europe stipule explicitement que les limites recommandées ne visent qu'à protéger la population vis-à-vis des effets à court terme des champs électromagnétiques.

I.5.4.2. Directive européenne pour les travailleurs

En 2004, la Commission européenne a repris les recommandations de l'ICNIRP pour les travailleurs comme base d'une directive à transposer dans les législations de tous les pays membres de l'Union [4]. Cette transposition doit être faite avant le mois d'avril 2008. La Belgique est en train de préparer un Arrêté royal. Une fois transposée, cette directive obligera tous les employeurs à réaliser un audit de l'environnement électromagnétique sur les lieux de travail. La structure de cette directive est donc identique à celle de l'ICNIRP. Les niveaux de référence sont donc les niveaux pour les travailleurs donnés par l'ICNIRP. À la différence de l'ICNIRP, la Commission européenne stipule explicitement que les limites recommandées ne visent qu'à protéger les travailleurs vis-à-vis des effets à court terme des champs électromagnétiques.

I.5.5. Situation en Belgique

I.5.5.1. Norme fédérale belge

L'exposition du public belge est limitée par l'Arrêté royal d'août 2005 [5]. Les niveaux limites sont basés sur ceux recommandés par l'ICNIRP avec un facteur de protection supplémentaire de 4. Les limites de cette norme, appelée norme fédérale belge, sont résumées dans le Tableau 5. Ces niveaux doivent être considérés comme des moyennes sur 6 minutes.

	S [W/m ²]	E [V/m]
10 à 400 MHz	0,5	13,7
400 MHz à 2 GHz	f/800	0,686 f ^{1/2}
2 GHz à 10 GHz	2,5	30,7

Tableau 5. Limites d'exposition de la norme fédérale belge.

À partir du Tableau 5 on peut donner quelques exemples de niveaux de référence pour des services radio précis. De tels exemples sont fournis dans le Tableau 6.

	E [V/m]
Radio FM	13,7
TV 200 MHz	13,7
TETRA	13,7
TV 600 MHz	16,8
GSM 900	20,6
GSM 1800 et DECT	29,1
UMTS, WiFi, WiMax	30,7

Tableau 6. Limites d'exposition de la norme fédérale belge pour différents services radio.

Ainsi, la norme fédérale belge corrige le fait que l'OMS applique son facteur de sécurité à 4 W/kg au lieu de 1 W/kg. La norme belge, tout comme la recommandation de l'ICNIRP, ne contient pas de facteur de précaution.

I.5.5.2. Initiatives régionales

La Région de Bruxelles-Capitale a voté une Ordonnance le 1^{er} mars 2007 [6]. Elle a été publiée au Moniteur le 14 mars 2007. Une critique de cette ordonnance est donnée dans la Partie III.

En 2000, une règle de bonne pratique avait été décidée pour la Région wallonne. Elle consistait à limiter le niveau d'exposition du public à un champ électrique de 3 V/m. Cette limite n'a jamais fait l'objet d'un décret et les modalités d'applications n'ont jamais été définies. Suite à l'adoption de la norme fédérale belge en 2001, la limite wallonne n'a plus été suivie. La valeur de 3 V/m est cependant bien ancrée dans l'esprit des gens et beaucoup de personnes s'y réfèrent encore.

En avril 2007, deux députés ont déposé une proposition de décret au Parlement wallon [7]. Elle propose une limite de l'ordre de 0,6 V/m à 900 MHz suivant le même gabarit que la norme belge et que la recommandation de l'ICNIRP. Cette proposition est résumée dans le Tableau 7. Elle concerne une moyenne de l'exposition sur 24 heures.

	S [mW/m ²]	E [V/m]
0.1 à 400 MHz	0,4	0,39
400 MHz à 2 GHz	f/1 000 000	0,019 f ^{1/2}
2 GHz à 300 GHz	2	0,87

Tableau 7. Limites d'exposition de la proposition de décret régional wallon.

En août 2006, deux députés ont déposé une proposition de décret au Parlement flamand [8]. Cette proposition est en attente de traitement à la commission de l'environnement. Elle prévoit une valeur limite d'exposition en densité de puissance donnée par $f / 37500$ [W/m²] pour la bande de fréquence allant de 0.1 MHz à 300 GHz. Cette limite est donc de 3 V/m à 900 MHz. Elle semble incomplètement définie car elle mène à un niveau très faible dans le bas de la bande (0.03 V/m) et élevé dans le haut de la bande (55 V/m). Cette proposition prévoit également une valeur d'exposition à atteindre de 1 mW/m² (0.6 V/m). La valeur de crête de l'exposition est considérée : "De vermogensdichtheid [...] mag nooit hoger zijn dan de grenswaarde [...]". La proposition des parlementaires flamands prévoit également de modifier une décision du gouvernement flamand du 1^{er} juin 1995 relative à l'environnement en ajoutant :

- qu'il est interdit d'exploiter une antenne à moins de 300 mètres d'une école, d'une crèche, d'un hôpital ou d'une maison de repos
- qu'il est interdit d'exploiter une antenne à moins de 10 mètres d'un emplacement de stockage de matières inflammables ou explosives
- qu'en cas d'installation de plusieurs antennes en un même endroit, un responsable est nommé pour l'ensemble des antennes.

1.5.5.3. Avis du Conseil supérieur de la santé (CSS – anc. CSH)

En 2001 et 2005, le CSS (appelé CSH à l'époque) a répondu à une demande d'avis du Ministre fédéral de la Santé dans le cadre de la préparation des Arrêtés royaux. Les deux fois, le CSS a recommandé au Ministre une limite située aux alentours de 3 V/m. Le Ministre n'a pas suivi cette recommandation, mais la valeur de 3 V/m est cependant bien ancrée dans l'esprit des gens et beaucoup de personnes s'y réfèrent.

1.5.6. Autres normes et pratiques en Europe

De nombreux États ont adopté les recommandations de l'ICNIRP comme norme nationale. Cependant, certains pays, régions ou villes ont adopté des normes nettement plus strictes. Certains de ces cas sont présentés dans le Tableau 8. Le cas de l'Italie est intéressant. La norme nationale de base limite à des valeurs du même ordre de grandeur que celles de l'ICNIRP. Cependant, pour les lieux où des personnes peuvent séjourner plus de 4 heures par jour, la limite est à 6 V/m. Ce qui est nettement plus stricte. La limite parisienne a été fixée à 2 V/m. Elle présentée de façon plus détaillée à la section III.3. La norme de Salzbourg est souvent citée car elle est très stricte. La limite est à 1 mW/m², ce qui correspond à un champ électrique de 0.6 V/m. Cette limite est cependant difficile à vérifier car il s'agit d'une moyenne sur 1 an.

Organisme	E _{lim} [V/m]	S _{lim} [W/m ²]
Russie 2003	6.1	0.1
Italie (exp. de plus de 4 heures par jour)	6	0.1
Suisse (valeurs limites d'installation)	3	0.024
G.-D. Luxembourg Liechtenstein	3	0.024
Ville de Paris	2	0.011
Salzbourg 2000 Certaines régions d'Italie	0.6	0.001

Tableau 8. Quelques exemples de limites plus strictes.

Partie II

Exposition bruxelloise

II.1. INTRODUCTION

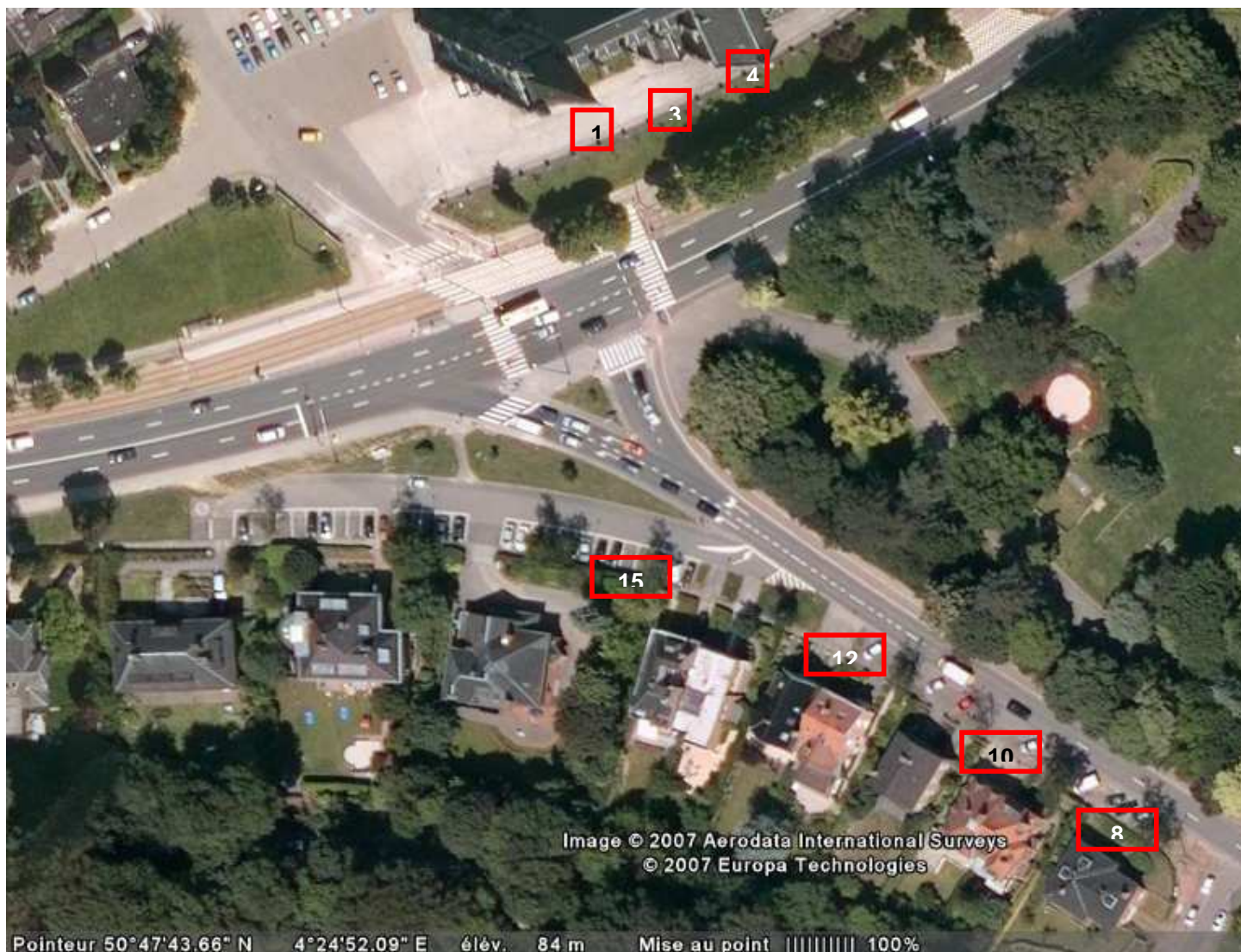
L'objet de cette deuxième partie est de donner une idée précise du niveau électromagnétique présent en Région bruxelloise. Des mesures ont été effectuées en 2006 et 2007 et les résultats sont comparés à des mesures datant de 2000. La comparaison permet de tirer des conclusions sur l'augmentation du niveau sur une période de 6 ans. Le cas particulier des antennes sur façade est abordé également. Deux cas différents ont été analysés en 2007. L'un consiste en une antenne de microcellule GSM sur une façade en briques et l'autre consiste en deux antennes panneau (GSM et UMTS) placés sur une façade en béton armé. Enfin, des éléments permettant d'envisager l'évolution à venir du niveau ambiant sont dégagés.

II.2. MESURES

II.2.1. Évolution depuis l'année 2000

II.2.1.1. Champ des chasseurs

Le niveau électromagnétique a été mesuré dans le quartier du Champ des chasseurs par la société MiC6 en novembre 2006. Les valeurs sont données dans le Tableau 9. Les points de mesure correspondent aux endroits où des mesures avaient été faites par l'Université de Gand (RUG) en 2000 [9].



Lieu	Radio-TV	TETRA	GSM 900-1800	DECT	UMTS	Autres	Total
Pied des antennes (1 [9])	-	-	2.42	-	0.48	0.07	2.47
Pied des antennes (3 [9])	-	-	2.28	-	0.79	-	2.41
Pied des antennes (4 [9])	-	-	1.79	-	2.02	-	2.70
Av. Solvay 21 (8 [9])	-	-	0.93	-	0.12	-	0.94
Av. Solvay 17 (10 [9])	-	-	1.36	-	0.12	-	1.37
Av. Solvay 11 (12 [9])	-	-	1.34	-	0.12	-	1.35
Av. Solvay 5 (15 [9])	-	-	1.00	-	0.13	-	1.01

Tableau 9. Mesures de novembre 2006 au Champ des chasseurs.

Ces résultats récents peuvent être comparés à ceux obtenus en 2000 par la RUG [9] et par l'Institut belge des postes et télécommunications (IBPT) [10]. Ces données avaient déjà été utilisées dans le rapport de l'Université catholique de Louvain (UCL) de 2001 [11]. Le Tableau 10 présente ainsi les résultats de 2000 et ceux de 2006 et quantifie l'augmentation ainsi observée dans les bandes GSM 900 et 1800. L'augmentation est chiffrée en termes de densité de puissance. La moyenne de cette augmentation est de 9, soit un champ électrique multiplié par 3.

Lieu	2000 RUG [V/m]	2000 IBPT [V/m]	2006 MiC6 [V/m]	Augmentation densité de p.
Pied des antennes (1 [9])	1.02	-	2.42	x 5.6
Pied des antennes (3 [9])	0.99	-	2.28	x 5.3
Pied des antennes (4 [9])	0.47	-	1.79	x 15
Av. Solvay 21 (8 [9])	0.45	0.36	0.93	x 4.3 à 6.7
Av. Solvay 17 (10 [9])	0.26	0.49	1.36	x 8 à 27
Av. Solvay 11 (12 [9])	0.36	0.63	1.34	x 4.5 à 14
Av. Solvay 5 (15 [9])	0.34	0.63	1.00	x 2.5 à 8.7
Moyenne				x 9

Tableau 10. Mesures de 2000 et 2006 au Champ des chasseurs et augmentation observée dans les bandes GSM 900 et 1800.

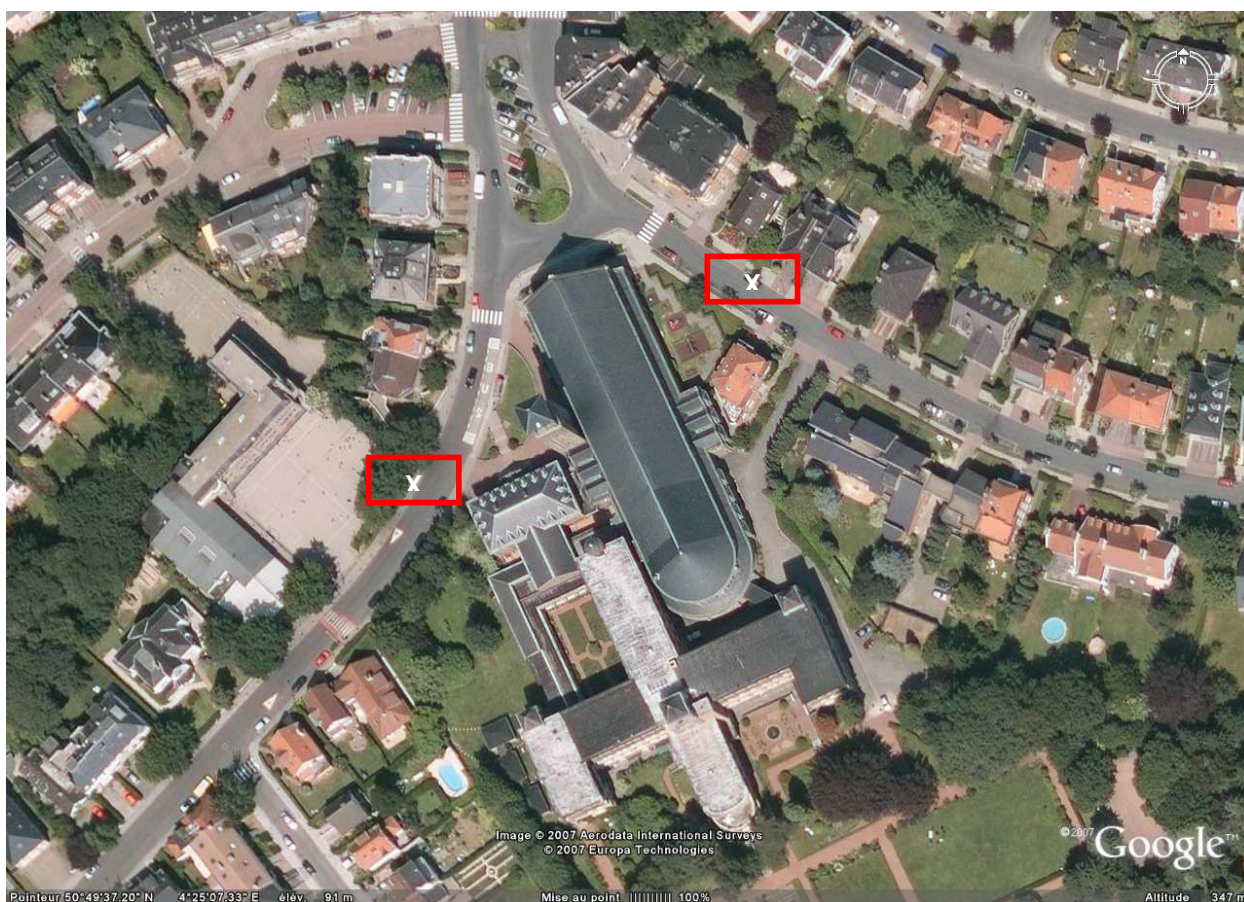
Lieu	GSM 900-1800	UMTS	Augmentation densité de p.
Pied des antennes (1 [9])	2.42	0.48	4%
Pied des antennes (3 [9])	2.28	0.79	35%
Pied des antennes (4 [9])	1.79	2.02	127%
Av. Solvay 21 (8 [9])	0.93	0.12	2%
Av. Solvay 17 (10 [9])	1.36	0.12	1%
Av. Solvay 11 (12 [9])	1.34	0.12	1%
Av. Solvay 5 (15 [9])	1.00	0.13	2%
Moyenne			25%

Tableau 11. Mesures de 2006 au Champ des chasseurs en GSM et UMTS et augmentation due à l'UMTS.

Le système UMTS a été installé entre ces deux périodes de mesure. Le Tableau 11 chiffre l'augmentation due à ce nouveau système. La colonne GSM 900-1800 donne le niveau mesuré en 2006 dans ces deux bandes. La colonne UMTS donne le niveau mesuré en 2006 pour ce système. L'augmentation est alors quantifiée de façon à connaître l'impact de l'arrivée de l'UMTS. Cet impact est en moyenne de 25%.

II.2.1.2. Chant d'Oiseau

La même logique a été suivie pour le cas du Chant d'Oiseau. Les mesures avaient été faites en 2000 par l'Institut scientifique de service public (ISSeP) [12] et en novembre 2006 par la société MiC6. Les résultats des mesures et l'augmentation observée sont présentés dans les Tableaux 12 et 13. L'augmentation dans les bandes GSM est de l'ordre d'un facteur 4 et l'augmentation due à l'UMTS est de l'ordre de 3%.



Lieu	Radio-TV	TETRA	GSM 900-1800	DECT	UMTS	Autres	Total
Trottoir à côté cour	0.07	-	5.08	-	1.13	-	5.21
Av. des Franciscains 14	-	-	2.30	0.28	0.27	-	2.34

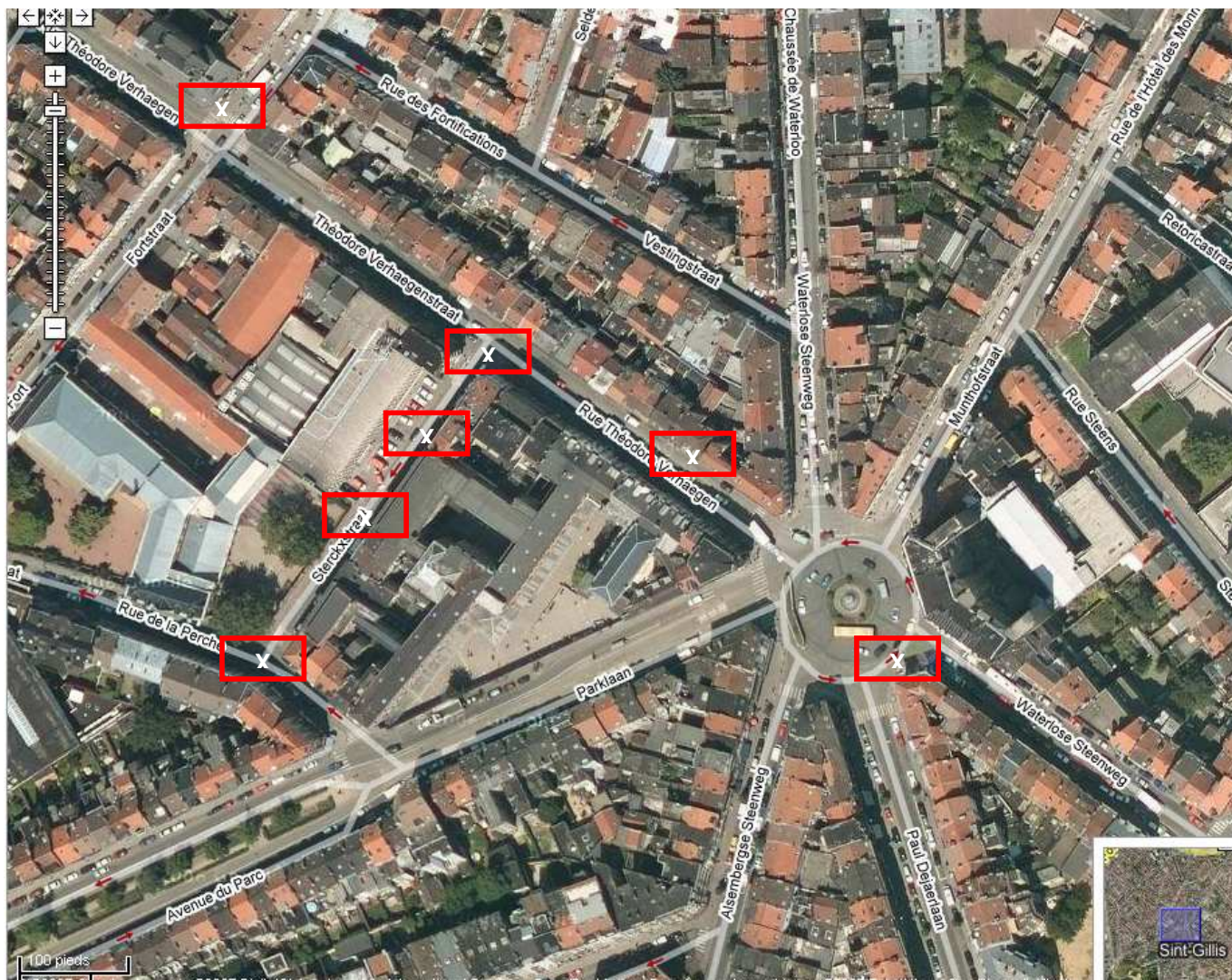
Tableau 12. Mesures de 2006 au Chant d'Oiseau.

Lieu	2000 ISSeP [V/m]	2006 MiC6 [V/m]	Augmentation en GSM	UMTS	Augmentation due UMTS
Cour de récréation	2.74	5.08	x 3.4	1.13	5%
Av. des Franciscains	1.13	2.30	x 4.1	0.27	1%
Moyennes			x 3.8		3%

Tableau 13. Mesures de 2000 et 2006 au Chant d'Oiseau, augmentation observée dans les bandes GSM et augmentation due à l'UMTS.

II.2.1.3. Barrière de Saint-Gilles

Dans le cas de la Barrière de Saint-Gilles, les mesures avaient été faites en 2000 par l'IBPT [10] et en novembre 2006 par la société MIC6. Les résultats des mesures et l'augmentation observée sont présentés dans les Tableaux 14 et 15. L'augmentation dans les bandes GSM est de l'ordre d'un facteur 4 et l'augmentation due à l'UMTS est de l'ordre de 11%.



Lieu	Radio-TV	TETRA	GSM 900-1800	DECT	UMTS	Autres	Total
Barrière	0.34	0.05	0.93	-	0.26	-	1.03
Rue Th. Verhaegen 5	0.11	-	1.41	-	0.50	-	1.50
Rue Th. Verhaegen 13	0.10	-	1.33	0.16	0.25	-	1.37
Coin r. Verhaegen-Sterckx	0.21	-	1.60	0.17	0.44	-	1.68
Rue Sterckx 6	0.19	-	0.99	0.16	0.49	-	1.13
Rue Sterckx 16	0.09	-	0.93	0.31	0.39	-	1.06
Coin r. Sterckx-Perche	0.10	-	1.37	0.32	0.21	-	1.43
Coin r. Verhaegen-Fort	0.21	-	1.73	0.30	0.57	-	1.86

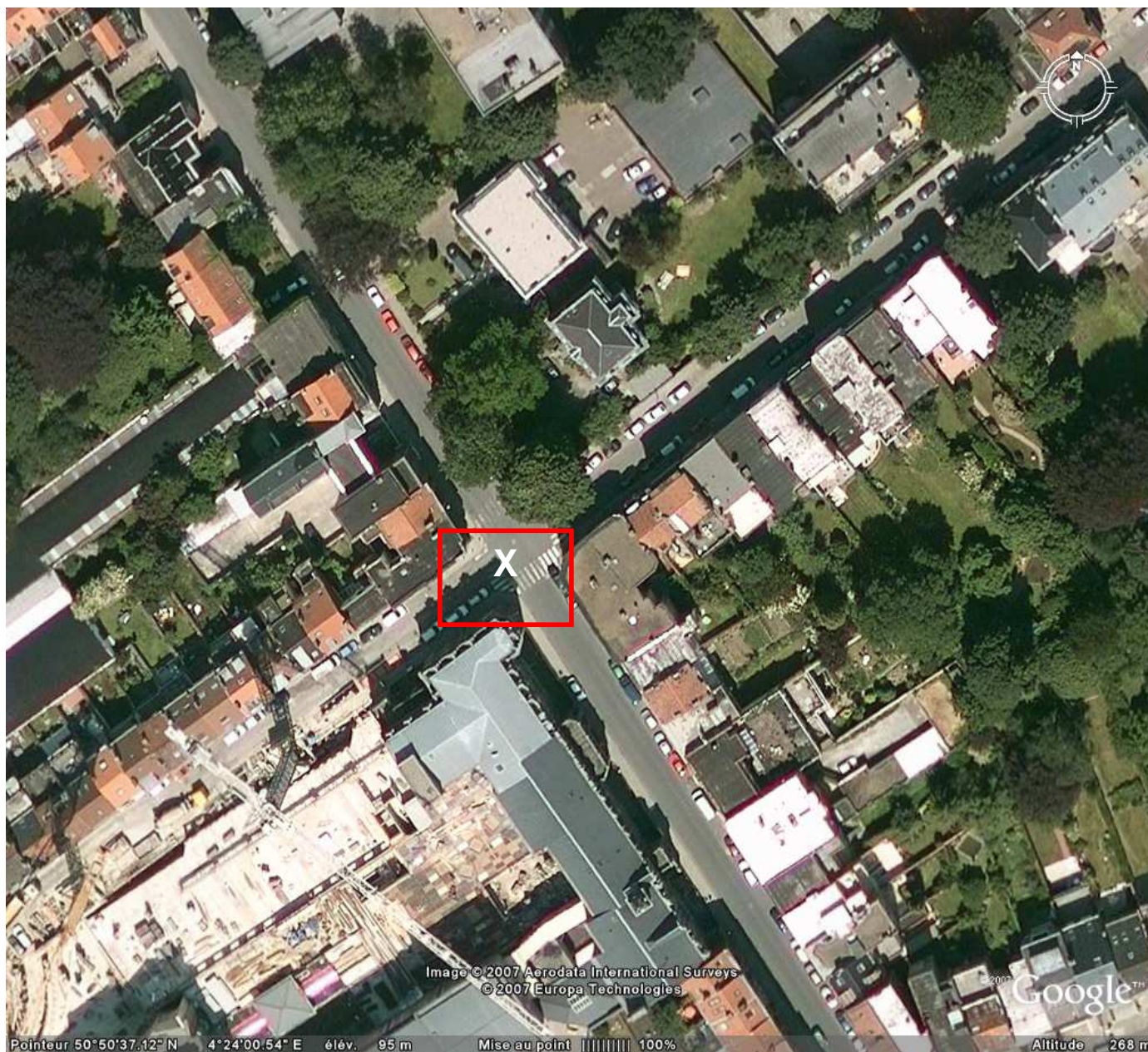
Tableau 14. Mesures de 2006 à la Barrière de Saint-Gilles.

Lieu	2000 IBPT [V/m]	2006 MiC6 [V/m]	Augmentation en GSM	UMTS	Augmentation due UMTS
Barrière	1.58	1.03	x 0.4	0.26	6%
Rue Verhaegen 5	0.56	1.41	x 6.3	0.50	13%
Rue Verhaegen 13	0.54	1.33	x 6.1	0.25	4%
Verhaegen-Sterckx	0.48	1.60	x 11	0.44	8%
Rue Sterckx 6	0.60	0.99	x 2.7	0.49	24%
Rue Sterckx 16	0.66	0.93	x 2.0	0.39	18%
Sterckx-Perche	1.04	1.37	x 1.7	0.21	2%
Verhaegen-Fort	0.81	1.73	x 4.6	0.57	11%
Moyennes			x 4.4		11%

Tableau 15. Mesures de 2000 et 2006 à la Barrière de Saint-Gilles, augmentation observée dans les bandes GSM et augmentation due à l'UMTS.

II.2.1.4. Clinique Saint-Michel

Dans le cas du quartier de la clinique Saint-Michel, les mesures avaient été faites en 2000 par l'IBPT [10] et en novembre 2006 par la société MiC6. Les résultats des mesures et l'augmentation observée sont présentés dans les Tableaux 16 et 17. L'augmentation dans les bandes GSM est de l'ordre d'un facteur 6 et l'augmentation due à l'UMTS est de l'ordre de 6%.



Lieu	Radio-TV	TETRA	GSM 900-1800	DECT	UMTS	Autres	Total
Coin r. Lindthout-Lantsheere	0.06	-	1.25	0.12	0.30	-	1.29

Tableau 16. Mesures de 2006 dans le quartier de la clinique Saint-Michel.

Lieu	2000 IBPT [V/m]	2006 MiC6 [V/m]	Augmentation en GSM	UMTS	Augmentation due UMTS
Coin r. Lindthout-Lantsheere	0.51	1.25	x 6.0	0.30	6%

Tableau 17. Mesures de 2000 et 2006 dans le quartier de la clinique Saint-Michel, augmentation observée dans les bandes GSM et augmentation due à l'UMTS.

II.2.1.5. Conclusions

Grâce aux résultats qui ont pu être rassemblés, l'augmentation du niveau ambiant entre 2000 et 2006 a pu être chiffrée. L'augmentation moyenne dans les bandes GSM est ainsi de l'ordre d'un facteur 6, soit un champ électrique multiplié par 2.4 environ. L'augmentation due à l'UMTS est quant à elle de l'ordre de 11% en moyenne.

II.2.2. Antennes sur façades

II.2.2.1. Antenne omnidirectionnelle sur mur de briques

Il s'agit d'une antenne de microcellule placée sur la façade en briques d'un bâtiment à un coin de rue. Les caractéristiques de cette antenne sont données dans le tableau ci-dessous.

Paramètre	Valeur
Service	GSM 1800
Fréquence	Bande 1800 MHz
Puissance	2.5 W
Ouverture horizontale	Omni
Ouverture verticale	13°
Gain	8 dBi

Les mesures ont été effectuées dans l'appartement qui se trouve au même niveau que l'antenne. Le Tableau 18 résume les résultats. La colonne « Champ E » donne la valeur de crête mesurée à cet endroit dans la bande GSM. La colonne « Champ E normalisé » donne le niveau de champ pour une antenne émettant 1 W. On trouve, à l'intérieur de l'appartement, un champ électrique de l'ordre de 0.7 à 1 V/m pour une antenne émettant 1 W.

Point	Localisation	Champ E	Champ E normalisé
1	Intérieur, à 1 m du mur antenne	1.7 V/m	1.08 V/m
2	Intérieur, à 2.5 m du mur antenne	1.15 V/m	0.73 V/m
4	Intérieur, à 0.5 m du mur antenne	1.2 V/m	0.76 V/m
3	Balcon, à 2 m de l'antenne	2.3 V/m	1.45 V/m

Tableau 18. Champ produit par une antenne sur façade en briques.

Le Tableau 19 donne les résultats de mesure des autres signaux significatifs présents dans l'appartement. On constate que l'environnement électromagnétique est bien dominé par le rayonnement de l'antenne de microcellule placée sur la façade.

Point	Localisation	Radio FM	DECT	WiFi
1	Intérieur, à 1 m du mur antenne	0.07 V/m	0.19 V/m	0.74 V/m
2	Intérieur, à 2.5 m du mur antenne	0.09 V/m	0.25 V/m	-
4	Intérieur, à 0.5 m du mur antenne	0.09 V/m	0.19 V/m	-
3	Balcon, à 2 m de l'antenne	0.05 V/m	0.19 V/m	-

Tableau 19. Émissions autres que GSM mesurées dans l'appartement.

II.2.2.2. Antenne panneau sur mur en béton armé

Il s'agit de deux antennes panneau placées sur la façade en béton armé d'un bâtiment à un coin de rue. Les caractéristiques de ces antennes sont données dans le tableau ci-dessous.

Paramètre	Antenne GSM	Antenne UMTS
Service	GSM 900	UMTS
Fréquence	Bande 900 MHz	2140 MHz
Puissance	10 W	20 W
Ouverture horizontale	61°	63°
Ouverture verticale	10°	5°
Gain	17 dBi	18.8 dBi

Les mesures ont été effectuées dans l'appartement qui se trouve au même niveau que les antennes. Le Tableau 20 résume les résultats. On trouve, à l'intérieur de l'appartement, un champ électrique de l'ordre de 0.4 V/m pour une antenne panneau GSM émettant 1 W et un champ électrique de l'ordre de 0.1 V/m pour une antenne panneau UMTS émettant 1 W. Il est cependant possible que l'antenne UMTS n'émettait pas à pleine puissance au moment de la mesure, le nombre d'utilisateurs UMTS étant encore faible. La valeur normalisée du champ électrique pour l'UMTS doit donc être considérée avec précaution.

Point	Localisation	GSM Champ E	GSM Champ E normalisé	UMTS Champ E	UMTS Champ E normalisé
1	Intérieur, à 0.2 m du mur antenne	1.3 V/m	0.41 V/m	0.42 V/m	0.09 V/m
2	Intérieur, près de la fenêtre	0.96 V/m	0.30 V/m	0.41 V/m	0.09 V/m
3	Intérieur, à 1.5 m du mur antenne	1.0 V/m	0.32 V/m	0.26 V/m	0.06 V/m

Tableau 20. Champ produit par des antennes sur façade en béton armé.

Le Tableau 21 donne les résultats de mesure des autres signaux significatifs présents dans l'appartement. On constate que l'environnement électromagnétique est bien dominé par le rayonnement de l'antenne GSM placée sur la façade. Viennent ensuite le WiFi du bâtiment et l'antenne UMTS placée sur la façade.

Point	Localisation	Radio FM	TV	DECT	WiFi
1	Intérieur, à 0.2 m du mur antenne	-	-	0.20 V/m	0.21 V/m
2	Intérieur, près de la fenêtre	0.10 V/m	0.06 V/m	0.30 V/m	0.59 V/m
3	Intérieur, à 1.5 m du mur antenne	0.16 V/m	0.04 V/m	0.19 V/m	0.39 V/m

Tableau 21. Émissions autres que GSM et UMTS mesurées dans l'appartement.

II.3. AUGMENTATION À VENIR

La section II.2 met clairement en évidence que, depuis l'année 2000, l'augmentation du niveau ambiant est principalement due au renforcement du système GSM. Ce renforcement a été nécessaire pour répondre à l'augmentation de la demande en capacité. Le système UMTS intervient en deuxième place dans l'augmentation du niveau. Sa part actuelle est encore faible, de l'ordre de 11%. Le système TETRA contribue très peu à l'augmentation globale.

Il est particulièrement hasardeux d'évaluer l'évolution du niveau ambiant en Région bruxelloise pour les années à venir. En effet, les contributeurs principaux au niveau ambiant actuel (les opérateurs GSM-UMTS) n'ont pas pu fournir d'indications sur leurs intentions de déploiement. Les questions suivantes restent donc en suspens :

- Le GSM va-t-il encore être renforcé en ville?
- Quelle sera la demande en capacité UMTS dans 2 à 5 ans?
- Un déclin du GSM au profit de l'UMTS est-il attendu? Dans quel délai?

Ces éléments sont bien entendu déterminants. Le GSM apparaît aujourd'hui comme un système vieillot au vu de la puissance nécessaire pour satisfaire la demande en couverture et en capacité. Donc, tant que ce système sera en service, il ne faut s'attendre qu'à une augmentation du niveau. Cette augmentation dépend directement de l'évolution de la demande.

L'augmentation de la demande en services UMTS est certaine. L'ampleur chiffrée de cette augmentation n'est cependant pas disponible. Cette augmentation sera peut-être largement compensée par une diminution de la puissance émise en GSM. Ce scénario paraît fort probable, vu la diminution des coûts liés à l'achat d'un portable UMTS et à l'usage de ce système. En prenant comme hypothèse qu'un watt émis en UMTS permet de faire plus qu'un watt émis en GSM, la transition du GSM vers l'UMTS devrait faire baisser le niveau ambiant. Un autre élément entre cependant en compte. Vu l'augmentation de l'offre de services apportée par l'UMTS, il faut s'attendre à une augmentation de l'utilisation de ce système. Les éléments disponibles au moment de la clôture de cette étude ne permettent pas de conclure plus précisément sur ce point.

L'impact du déploiement du réseau TETRA est faible. En effet, ce système est destiné à un usage occasionnel puisqu'il est réservé aux services de secours. De ce fait, il y a une exigence forte de couverture du territoire mais une exigence faible en termes de capacité. La présence actuelle du TETRA en Région bruxelloise est ainsi discrète. Il n'est pas prévu actuellement de déployer un réseau TETRA commercial à Bruxelles.

L'impact attendu des autres systèmes extérieurs est faible pour les raisons suivantes. Le WiMax et le WiFi en réseau mesh offrent des débits de transmission élevés avec une faible puissance émise par la station de base. La puissance rayonnée est cependant directement liée à l'utilisation de ces systèmes. Le DVB-T et le DVB-H transmettent 4 fois plus de chaînes avec la puissance nécessaire pour émettre 1 chaîne de télévision analogique. Vu l'extinction annoncée pour 2011 des émetteurs de télédiffusion analogique, ce service produira à terme un niveau électromagnétique plus faible qu'aujourd'hui. Quant aux DAB et DRM, ils viennent s'ajouter aux signaux FM et AM mais cet impact est globalement négligeable.

Il n'en va cependant pas de même de la pollution électromagnétique à l'intérieur des habitations. Le nombre d'émetteurs intérieurs a fortement augmenté depuis l'année 2000. Cette augmentation est due pour l'essentiel aux systèmes DECT et WiFi. En effet, même si la puissance de ces systèmes est plutôt faible, les émetteurs se trouvent à quelques mètres des personnes. Il n'est donc pas rare, lorsque des mesures sont effectuées dans une habitation, de constater que le contributeur principal au niveau ambiant n'est pas l'antenne GSM d'en face mais bien la base DECT ou, dans une moindre mesure, le point d'accès WiFi. Le cas du DECT est particulièrement marquant du fait que la base émet en permanence, qu'une communication soit en cours ou non. La valeur de crête du champ rayonné est ainsi constante 24 heures sur 24. La valeur moyenne du champ est cependant 25

fois plus faible en mode veille que pendant une conversation. Il en va de même pour le WiFi mais avec un niveau moyen en mode veille nettement plus faible. A ces deux systèmes viennent également s'ajouter des émetteurs bluetooth, essentiellement pour les périphériques de bureautique, et zigbee, essentiellement dans des systèmes domotiques sans fil.

Partie III

Ordonnance bruxelloise

III.1. INTRODUCTION

La convention IBGE – ANPI prévoit pour cette troisième partie des propositions et recommandations. Étant donné le vote d'une ordonnance le 1^{er} mars 2007, le contenu de cette partie a été modifié sous la forme d'une critique de ladite ordonnance.

L'ordonnance du 1^{er} mars 2007 est relative à la protection de l'environnement contre les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les radiations non ionisantes. Elle a été publiée au Moniteur le 14 mars 2007. Cette partie fournit une critique de cette ordonnance.

III.2. CRITIQUE DE QUELQUES ARTICLES

III.2.1. Titre

Le titre de l'ordonnance évoque "les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les radiations non ionisantes". Le texte ne prend en compte que les radiations aux hautes fréquences (à partir de 100 kHz) alors que le titre laisse croire que tout le spectre des radiations non ionisantes (y compris les basses fréquences) est considéré.

Le titre aurait donc dû préciser ce point.

III.2.2. Définitions, Art. 2

La gamme de fréquences considérées va de 100 kHz à 300 GHz. La borne supérieure a été choisie très haute. Elle englobe de cette façon l'ensemble des applications aux hautes fréquences et aux hyperfréquences. Il n'y a donc pas de risque de confusion d'interprétation comme il pourrait y en avoir dans le cadre de la norme fédérale belge d'août 2005 qui se limite à 10 GHz. Il faudra cependant veiller à ce que les procédures de vérification de la conformité à l'ordonnance traitent de façon raisonnable la partie supérieure du spectre considéré. Il est en effet beaucoup plus coûteux d'effectuer des mesures à 100 GHz qu'à 1 GHz.

L'ordonnance n'est pas applicable aux appareils utilisés par les particuliers (GSM, DECT, WiFi, etc.) On comprend, bien entendu, l'intention du législateur puisqu'il s'agit de choix individuels sur lesquels les utilisateurs ont un certain contrôle. Il faudra cependant surveiller l'évolution et l'expansion de ces technologies, notamment du point de vue du niveau de pollution des habitations voisines.

L'ordonnance n'est pas applicable aux radiations non pulsées des programmes de radiodiffusion et de télédiffusion. Les émissions de radio AM et FM ainsi que les émissions de télévision analogique n'entrent donc pas dans le champ d'application. Cette exclusion est assez surprenante. Elle est basée sur le caractère pulsé ou non des émissions. Ce caractère n'est cependant pas défini précisément. De plus, bien qu'il existe des résultats d'études tendant à montrer que le caractère pulsé peut induire des effets spécifiques, l'évidence de ces effets n'est cependant pas suffisante que pour en faire un critère d'exclusion. Enfin, l'ordonnance est applicable à d'autres émissions non pulsées telles que celle des PMR, par exemple. Il aurait donc été préférable de choisir l'une des deux options suivantes :

- appliquer l'ordonnance à l'ensemble du spectre RF, sans distinction basée sur le caractère pulsé
- exclure du champ d'application toutes les émissions non pulsées en donnant une définition claire de ce caractère.

Une erreur grossière s'est manifestement glissée dans les gammes de fréquences pour lesquelles l'ordonnance n'est pas applicable. Le tableau ci-dessous propose une lecture corrigée du texte.

Bande donnée par l'ordonnance	Correction proposée	Commentaire
87,5 – 108,0 kHz	87,5 – 108,0 MHz	radio FM
153 – 261 kHz	?	pas de correspondance plausible dans la table d'allocation des fréquences
531 – 1602 kHz	526,5 – 1606,5 kHz	radio AM
174 – 223 MHz	OK	télévision analogique
470 – 830 MHz	OK	télévision analogique

Il convient encore d'ajouter que des émissions de radio AM et de télévision analogique existent aussi dans d'autres bandes de fréquence.

III.2.3. Normes d'immission environnementales, Art. 3

L'ordonnance définit la limite en deux temps. D'une part elle définit l'objectif de fixer la limite à 0.024 W/m^2 (3 V/m) pour le GSM 900 et, d'autre part, elle définit un gabarit en fonction de la fréquence. Il y a une inexactitude dans le premier temps. Suivant le gabarit, la limite de 0.024 W/m^2 n'est pas obtenue à 900 MHz mais bien à 960 MHz. Vu que la bande attribuée aux stations de base GSM 900 vont de 935 à 960 MHz, l'idée que l'on peut se faire de l'intention du législateur est donc bien satisfaite, la limite dans cette bande va de 2.97 à 3.01 V/m . La fin de phrase jette la confusion et devrait probablement être supprimée : "*ceci pour les radiations non ionisantes dont les fréquences sont comprises entre 400 MHz et 2 GHz.*" En effet, la limite de 0.024 W/m^2 ne vaut qu'à 960 MHz et pas de 400 à 2000 MHz.

La limite de l'ordonnance est donnée dans la Figure 21 avec quelques autres limites. On constate que la limite de l'ordonnance suit le même gabarit fréquentiel que celui de la norme fédérale belge et de l'ICNIRP, tout en étant 50 fois plus stricte que la norme belge et 200 fois plus stricte que la recommandation de l'ICNIRP. Enfin, la limite définie par l'ordonnance est du même ordre de grandeur que les limites suisse et italienne et que la recommandation du CSH. On peut donc constater que la limite de l'ordonnance bruxelloise introduit un facteur de précaution qui n'existe pas dans la norme fédérale belge. La limite correspond approximativement à un TAS de 0.4 mW/kg .

Le texte de l'ordonnance stipule que le niveau ambiant ne peut dépasser à aucun moment la limite donnée. Cela signifie donc bien que le paramètre pris en compte est la valeur de crête de l'exposition. Il ne s'agit donc pas d'une moyenne sur une certaine durée. La conséquence est importante en ce qui concerne les émissions pulsées. Cette précision rend la limite plus stricte que celle basée sur une moyenne temporelle (Belgique, ICNIRP, etc.). Enfin, cette précision est cohérente avec le souhait de prémunir vis-à-vis d'effets autres que thermiques et avec l'intention de se focaliser sur les émissions pulsées. Le Tableau 22 compare des valeurs de crêtes et des valeurs moyennes sur 6 minutes. On constate que le rapport entre ces deux valeurs est très variable. Une limitation basée sur la valeur de crête est de 1.3 à 10 fois plus stricte (en densité de puissance) qu'une limitation basée sur la valeur moyenne du niveau d'exposition.

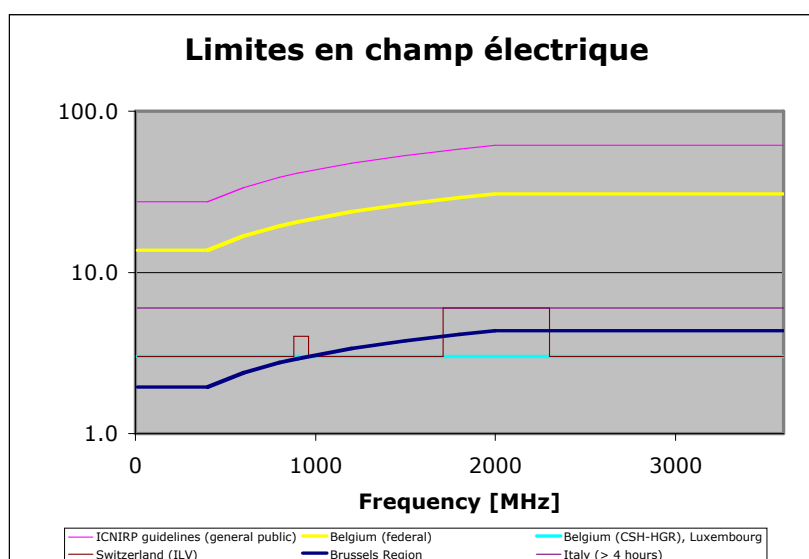


Figure 21..Comparaison des valeurs limites d'exposition de quelques normes et recommandations.

Type d'émission	Champ E de crête	Champ E moyen	Rapport en densité de P.
GSM 900 et 1800	1.67 V/m	1.44 V/m	134%
GSM 1800	1.15 V/m	0.85 V/m	183%
GSM 1800	2.29 V/m	1.80 V/m	162%
GSM 900 et 1800	1.22 V/m	0.64 V/m	363%
GSM 900 et 1800	0.89 V/m	0.53 V/m	282%
GSM 900 et 1800	0.94 V/m	0.39 V/m	581%
UMTS	0.39 V/m	0.12 V/m	1056%
UMTS	0.30 V/m	0.14 V/m	459%
UMTS	0.30 V/m	0.11 V/m	744%
DECT	0.19 V/m	0.07 V/m	737%
WiFi	0.74 V/m	0.23 V/m	1035%
TV analogique	0.04 V/m	0.02 V/m	400%

Tableau 22..Comparaison entre la valeur de crête et la valeur moyenne de l'exposition à différents champs.

III.3. COMPARAISON AVEC LA CHARTE DE LA VILLE DE PARIS

III.3.1. Introduction

Les différentes normes et recommandations visant à limiter l'exposition des personnes sont généralement comparées sur base du niveau auquel la limite est fixée. D'autres éléments doivent cependant être considérés lors d'une comparaison. La présente section effectue une comparaison la plus complète possible entre l'ordonnance bruxelloise et la charte de la Ville de Paris.

III.3.2. Force légale

L'ordonnance bruxelloise a été votée par le Parlement régional. Elle aura donc force de loi et ne pourra en aucun cas être contrevendue. Il n'en va pas de même de la charte de Paris. Il s'agit d'une charte signée en 2002 entre la Ville de Paris et les opérateurs de téléphonie mobile. C'est donc un accord amiable entre deux parties qui y trouvent chacune leur compte. La Ville protège ses citoyens et les opérateurs rencontrent peu d'opposition. Une telle charte n'a pas la force d'une loi et peut être rompue par l'une des parties dès lors qu'elle n'y trouve plus son compte.

III.3.3. Systèmes concernés

L'ordonnance bruxelloise vise les applications aux radiofréquences entre 100 kHz et 300 GHz, à l'exception des radiations non pulsées des programmes de radiodiffusion et de télédiffusion et des appareils utilisés par les particuliers. La charte parisienne ne concerne que les systèmes GSM et UMTS, soit 3 bandes de fréquences bien précises. L'ordonnance bruxelloise couvre donc une portion nettement plus importante du spectre que la charte parisienne. Cependant, comme on le constate en pratique, ce sont bien ces deux systèmes qui produisent l'essentiel de la pollution électromagnétique sur la majeure partie de la Région. Dans les deux textes, la limite doit être interprétée comme la somme appropriée des émissions dans l'ensemble des bandes de fréquence concernées.

III.3.4. Valeur limite

L'ordonnance bruxelloise prend comme base une limite de 3 V/m à 900 MHz et définit un gabarit fréquentiel identique à celui que l'on trouve dans la recommandation de l'ICNIRP. La charte parisienne prend comme base une limite de 2 V/m à 900 MHz et définit des "niveaux équivalents 900" pour les deux autres bandes. Cette façon un peu compliquée de présenter les choses est en fait quasi équivalente au gabarit de l'ICNIRP. La Figure 22 présente une comparaison graphique entre les limites bruxelloise et parisienne.

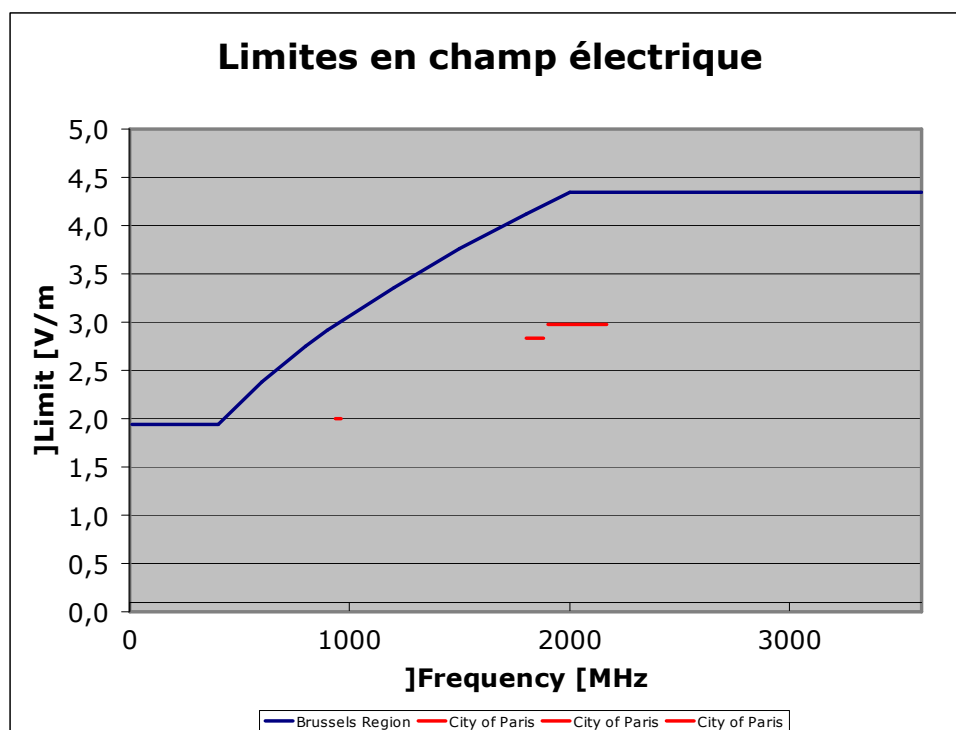


Figure 22. Comparaison des limites d'exposition de l'ordonnance bruxelloise et de la charte parisienne.

III.3.5. Prise en compte de la variation dans le temps

Le niveau électromagnétique ambiant est fortement variable dans le temps. Ce point est illustré dans plusieurs sections de ce rapport. On peut distinguer 2 échelles de temps pour la variation de ce niveau. Des variations sont observées à l'échelle de la milliseconde. Elles sont dues généralement à l'application de techniques d'accès multiple ou de duplexage dans le domaine temporel (TDMA, TDD). Elles peuvent être dues également à la modulation d'amplitude, comme dans la télédiffusion analogique, par exemple. Des variations sont également observées à l'échelle de l'heure. Elles sont dues à la variation du taux d'utilisation du système. Cette variation est très marquée dans le cas des systèmes GSM et WiFi, par exemple.

Vu que le niveau ambiant est variable dans le temps, un texte contenant une limite d'exposition doit préciser comment ces variations sont prises en compte pour comparer une mesure à la limite. Cette prise en compte peut être très différente d'un texte à l'autre. L'ordonnance bruxelloise précise que le niveau ne peut dépasser à aucun moment la limite spécifiée. Cela signifie donc que c'est la valeur de crête du niveau d'exposition qui doit être considérée. La charte parisienne précise par contre que c'est la moyenne sur 24 heures qui doit être considérée. Pour la commodité des mesures, la charte prévoit un facteur de pondération entre la valeur de crête théorique et la moyenne sur 24 heures. Ce facteur est fixé à 0,432. Plus précisément, il est défini comme le rapport entre le niveau moyen d'exposition effective sur 24 heures et le niveau de champ théorique maximal généré par les installations au maximum de leur capacité d'émission. Le texte semble indiquer que ce facteur doit être appliqué au champ électrique, mais il ne le dit pas explicitement.

Si on corrige la limite parisienne par le facteur permettant de convertir la moyenne sur 24 heures en une valeur de crête, on obtient une comparaison plus juste des limites bruxelloise et parisienne. La Figure 23 présente cette comparaison. Indépendamment du spectre considéré, il en ressort donc que la limite bruxelloise est 2.4 fois plus stricte (en densité de puissance) que la limite parisienne.

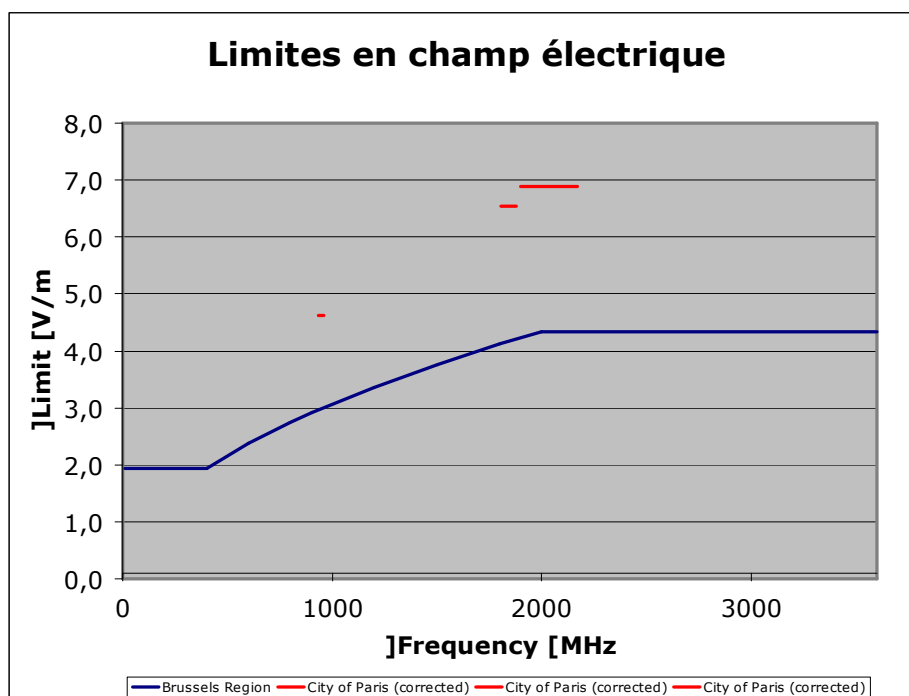


Figure 23. Comparaison de la limite d'exposition bruxelloise et de la limite d'exposition corrigée de la charte parisienne.

Pour être précis, il faut encore signaler que le niveau de champ théorique maximal dont parle la charte parisienne n'est pas équivalent à la valeur de crête considérée dans l'ordonnance bruxelloise. En effet, le maximum théorique n'est atteint que quand tous les émetteurs GSM émettent à leur puissance maximale au même instant. La probabilité qu'une telle condition soit satisfaite est évidemment extrêmement faible. La valeur de crête, par contre, est la plus grande valeur réellement mesurée pendant la période d'observation. Le facteur 2.4 doit donc être nuancé. Il est en effet surestimé si l'on prend en considération la façon de vérifier le respect des valeurs limites.

III.4. RÉSUMÉ DES LIMITES

Le Tableau 23 résume la classement de quelques valeurs clés. Les limites reprises sont, par ordre décroissant, le niveau produisant une augmentation d'un degré centigrade de la température centrale du corps humain, la recommandation OMS-ICNIRP, l'Arrêté royal de 2005, la charte parisienne et l'ordonnance bruxelloise. Les limites de base sont données en caractères gras. Les trois premières origines spécifient un SAR moyen sur 6 minutes, la charte parisienne spécifie un environnement donné en champ électrique (E) moyen sur 24 heures et l'ordonnance bruxelloise spécifie un environnement donné en densité de puissance (S) de crête. Les niveaux de référence correspondants sont donnés en caractères droits. Les équivalences moyenne 6 minutes – crête – moyenne 24 heures sont donnés en petits caractères italiques. Ces équivalences sont données afin de comparer le plus complètement possible les différentes limites.

Origine	Moyenne sur 6 minutes			Crête		Moy. sur 24 heures	
	SAR W/kg	S W/m ²	E V/m	S W/m ²	E V/m	S W/m ²	E V/m
Augm. 1°C	1 à 4	56 à 225	146 à 291	56 à 225	146 à 291	11 à 42	63 à 126
OMS - ICNIRP	0,08	4,5	41	4,5	41	0,83	18
AR 2005	0,02	1,1	21	1,1	21	1,17	21
Paris	<i>0,00103</i>	<i>0,057</i>	4,6	<i>0,057</i>	4,6	0,0106	2
Ord. RBC	<i>0,00044</i>	<i>0,024</i>	3,0	0,024	3,0	<i>0,0045</i>	1,3

Tableau 23. Classement résumé de quelques valeurs clés à 900 MHz pour le grand public.

Les équivalences (italique) ont été calculées sur base des hypothèses suivantes. Le rapport entre la moyenne sur 24 heures et la crête vaut 0.432 en champ (charte parisienne), soit 0.187 en densité de puissance. La moyenne sur 6 minutes est supposée égale à la valeur de crête. Cette hypothèse est contradictoire avec le Tableau 22. Cependant, l'ordonnance couvre un large spectre, donc un grand nombre de canaux. Or au plus il y a de canaux, au moins la différence entre crête et moyenne est marquée. De plus, toutes les mesures sélectives en fréquence effectuées à l'heure actuelle par l'IBPT sont des mesures de la valeur de crête, même lorsqu'il s'agit de comparer à une limite spécifiée en moyenne sur 6 minutes. Ainsi, à moins de changer la méthode de mesure, on peut considérer que des exigences définies en moyenne sur 6 minutes ou en crête sont très proches l'une de l'autre.

III.5. CONCLUSIONS

L'ordonnance bruxelloise a été commentée sur quelques points : le titre, la gamme de fréquence couverte, la non applicabilité à certains types d'émetteurs et la limite d'immission environnementale. Deux problèmes majeurs ont été pointés dans le texte de cette ordonnance. Premièrement, le critère par lequel certains systèmes sont exclus est assez flou. Des suggestions de clarification ont été proposées. Deuxièmement, des erreurs manifestes ont été relevées dans les bandes de fréquences qui ne sont pas concernées par l'ordonnance. Des propositions de corrections ont été formulées.

Enfin, l'ordonnance a été comparée sur plusieurs critères avec la charte parisienne. L'ordonnance bruxelloise impose une limite alors que la charte parisienne repose sur un accord amiable. Le spectre de fréquence couvert est plus important dans le cas de l'ordonnance bruxelloise. Si on corrige la limite parisienne par le facteur permettant de convertir la moyenne sur 24 heures en une valeur de crête, on montre que, indépendamment du spectre considéré, la limite bruxelloise est 2.4 fois plus stricte (en densité de puissance) que la limite parisienne. Ce facteur est cependant exagéré si l'on prend en considération la méthode de mesure sous-entendue dans chacune des deux initiatives. Ainsi, il est raisonnable de considérer que les exigences bruxelloise et parisienne sont très proches l'une de l'autre.

Partie IV

Communication au public

IV.1. INTRODUCTION

La question de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques aux radiofréquences est particulièrement complexe parce que sa compréhension fait appel à des notions issues de plusieurs domaines distincts : la physique, les techniques, la biologie, le droit, l'économie de marché, la politique, etc. Cette partie vise à proposer un contenu de brochure qui éclaire le grand public sur ces différents aspects.

Le texte n'est pas complet. Il suggère une structure, des intitulés, des idées générales et quelques idées précises.

IV.2. STRUCTURE DE LA BROCHURE

IV.2.1. Volet introductif

Le volet introductif doit replacer la problématique de l'exposition des personnes dans son contexte global.

- a. Le déploiement massif, inattendu au départ, du GSM est la conséquence de 2 facteurs : une offre technologique et une très forte demande du consommateur. Beaucoup d'innovations technologiques échouent parce que les consommateurs ne sont pas preneurs. Le GSM est un succès commercial parce que le public a été preneur.
- b. La pollution électromagnétique produite par les systèmes de radiocommunication augmente avec le nombre d'utilisateurs. Le niveau actuel produit par le système GSM est la conséquence directe de l'utilisation massive de ce système. Notons que ce lien entre le niveau de pollution et le nombre d'utilisateurs n'est pas valable dans le cas des systèmes de radio- et télédiffusion.
- c. La question des effets sanitaires des champs électromagnétiques fait l'objet d'une polémique très forte. Cette polémique vient en bonne partie du manque de conclusions tranchées sur le plan scientifique. Des effets biologiques ont été mis en évidence mais il n'y a aucune confirmation ni infirmation que ces effets soient pathogènes pour les niveaux de pollution que nous connaissons actuellement. On peut caricaturer la situation actuelle comme suit. D'une part le lobby des opérateurs cherche à vendre ses services et minimise donc l'aspect sanitaire en disant qu'il n'y a pas d'effet pathogène démontré et qu'il n'y a donc pas de risque. Cette déduction est erronée. D'autre part des associations de consommateurs disent qu'il y a des tas d'effets

biologiques démontrés et que donc c'est très dangereux. Cette déduction est erronée également. La position raisonnable pourrait être exprimée ainsi : "À l'heure actuelle, il n'y a pas d'effets pathogènes démontrés pour les niveaux de pollution que nous connaissons en général. Il n'y a donc pas de danger avéré. Des effets biologiques ont cependant été démontrés à ces niveaux. Il existe donc un risque d'effets pathogènes et il convient dès lors d'être prudent et d'appliquer le principe de précaution."

- d. Cette incertitude scientifique a été interprétée de toutes sortes de façon à travers l'Europe et le Monde. Il en résulte une multitude d'initiatives plaçant les limites d'exposition à des niveaux fortement différents. Ainsi, l'ordre de grandeur du rapport entre les limites les moins strictes et les plus strictes est de 4 500.

IV.2.2. Volet "aspects physiques et techniques"

Les aspects physiques à résumer sont au minimum : les notions de fréquence, de champ électrique, de champ magnétique, de champ électromagnétique, de densité de puissance et de taux d'absorption spécifique.

Les aspects techniques peuvent se résumer à de brèves descriptions des systèmes actuels et futurs (GSM, UMTS, TETRA, WiMax, WiFi, etc.)

IV.2.3. Volet "aspects biologiques"

Dans la présentation des aspects biologiques, il est indispensable d'exprimer clairement la différence entre "effets biologiques" et "effets pathogènes". La présentation succincte des effets biologiques doit mettre en évidence, d'une part, l'effet d'échauffement bien connu et, d'autre part, les effets athermiques moins bien connus.

IV.2.4. Volet "niveau d'exposition"

Ce volet doit fournir des ordres de grandeur des niveaux d'exposition que l'on peut rencontrer en RBC. Ces niveaux doivent être donnés pour différents systèmes de radiocommunication. Il doit également expliquer que le niveau est variable dans le temps et sur 2 échelles de temps, graphiques à l'appui, et que la conséquence en est une différence parfois importante entre le niveau de crête et le niveau moyen de l'exposition. Les ordres de grandeur donnés dans ce volet peuvent éventuellement être exprimés en valeurs de crête et moyennes.

IV.2.5. Volet "limitation de l'exposition en RBC"

L'explication de l'ordonnance doit au moins porter sur les points suivants :

- les systèmes concernés
- la limitation porte sur l'immission globale produite par les systèmes concernés
- le niveau auquel l'exposition est limitée et la justification de ce niveau (en se référant notamment au CSS)
- la limitation porte sur la valeur de crête de l'exposition.

IV.2.6. Volet "comparaison avec d'autres initiatives"

L'ordonnance peut être comparée à d'autres initiatives (recommandation OMS-ICNIRP, norme fédérale belge, Ville de Paris, décret italien, ordonnance suisse) sur base des critères suivants :

- la valeur limite
- les systèmes concernés
- la limitation de l'immission globale ou pour chaque émetteur séparément
- la limitation de la valeur de crête ou de la valeur moyenne.

Il conviendra de mentionner la très large acceptation par les États de la recommandation de l'OMS et de justifier en quelques mots les raisons pour lesquelles cette recommandation est fortement critiquée.

Références

- [1] World Health Organization, *Environmental Health Criteria 137: Electromagnetic Fields (300 Hz to 300 GHz)*. WHO, Geneva: 1993, 290 pages.
- [2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "ICNIRP Guidelines – Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Physics*, avril 1998, Vol. 74, No. 4, pp. 494-522.
- [3] Council of the European Union, "1999/519/EC - Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)", *Official Journal of the European Communities*, July 30, 1999, pp. L199/59-70.
- [4] Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, "Directive 2004/40/CE du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques)", *Journal officiel de l'Union européenne*, 30 avril 2004, pp. L159/1-26.
- [5] Service public fédéral santé publique, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement, "10 août 2005 - Arrêté royal fixant la norme pour les antennes émettant des ondes électromagnétiques entre 10 MHz et 10 GHz", *Moniteur belge*, 22 septembre 2005, Ed. 2, pp. 41189-41193.
- [6] Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale, "1^{er} mars 2007 – Ordonnance relative à la protection de l'environnement contre les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les radiations non ionisantes", *Moniteur belge*, 14 mars 2007, pp. 13693-13696.
- [7] Bernard Wesphael et consorts, "Proposition de décret relative à la protection de l'environnement contre les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les radiations non ionisantes", Parlement wallon, session 2006-2007, 17 avril 2007, 590 (2006-2007) – N^o1.
- [8] Rudi Daems et Eloi Glorieux, "Voorstel van decreet betreffende de bescherming van het leefmilieu tegen de eventuele schadelijke effecten en de hinder van niet-ioniserende stralingen", vlaams Parlement, zitting 2005-2006, 23 août 2006, stuk 937 (2005-2006) – Nr1.
- [9] Christof Olivier et Luc Martens, *Studie over "Standaardprocedure voor elektromagnetische veldmetingen"*. Convention IBGE-BIM / RUG-INTEC, rapport final, novembre 2000.
- [10] IBPT-BIPT, *Mesure des rayonnements émis par les stations de base GSM et mesure des rayonnements émis dans la bande 20 MHz – 2 GHz*. Étude réalisée à la demande de l'IBGE, rapport, juillet 2006.
- [11] B. Stockbroeckx et A. Vander Vorst, *Évaluation de l'impact potentiel de la délivrance de licences de téléphonie mobile supplémentaires sur le champ électromagnétique. Rapport final complet*. Étude réalisée à la demande de l'IBGE, février 2001.
- [12] W. Pirard, *Champs électromagnétiques à proximité des antennes-relais de mobilphonie. Rapport final*. Mai 2000.

ANNEXE 1

Aspects biologiques et sanitaires de l'exposition aux champs radiofréquences

Le texte du professeur André Vander Vorst est donné intégralement dans cette annexe. En complément à ce texte, quelques informations supplémentaires sur le problème de l'hypersensibilité électromagnétique sont donnés ci-dessous.

Complément sur l'hypersensibilité électromagnétique

L'hypersensibilité électromagnétique (ou électro-hypersensibilité) est une sensibilité accrue aux champs électriques, magnétiques ou aux ondes électromagnétiques induisant des symptômes physiques et/ou psychologiques à des niveaux d'exposition généralement considérés comme étant inoffensifs pour la majorité des personnes. Un parallèle peut donc être fait avec le problème des allergies : certaines personnes déclenchent des réactions physiologiques extrêmes en présence de certains agents alors que la plupart des gens ne ressentent absolument rien dans le même environnement. Dans certains cas d'hypersensibilité électromagnétique, les personnes sont tellement affectées qu'elles s'isolent et sont amenées à cesser le travail et changer leur style de vie, alors que d'autres personnes rapportent des symptômes moins sévères qui entraînent un évitement de certaines sources de champs électromagnétiques.

L'hypersensibilité électromagnétique est un trouble reconnu par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) depuis 2004 :

"La sensibilité vis-à-vis des champs électromagnétiques a reçu la dénomination générale; "Hypersensibilité électromagnétique" ou EHS. Elle comprend des symptômes exprimés par le système nerveux comme les maux de tête, la fatigue, le stress, les troubles du sommeil, des symptômes cutanés comme des picotements, des sensations de brûlure, des démangeaisons, des douleurs et des crampes musculaires ainsi que beaucoup d'autres problèmes de santé. Quelles que soient les causes, la sensibilité électromagnétique est un problème invalidant pour les personnes qui en sont affectées, alors que le niveau de champs électromagnétiques dans leur environnement n'est habituellement pas plus élevé que celui rencontré dans le cadre de vie normal".

L'EHS est officiellement considérée comme un handicap (et non comme une maladie) en Suède. Contrairement à ce que l'on peut souvent lire, le gouvernement britannique n'a jamais reconnu ce trouble officiellement. Un communiqué de la "Health Protection Agency" de novembre 2005 [A1] a simplement présenté une revue des connaissances sur le sujet. Cette revue est justifiée par la phrase suivante :

"The starting point for this review is recognition, by the Radiation Protection Division of the Health Protection Agency (HPA RPD), of the need to consider electrical sensitivity in terms other than its aetiology, as this position alone could fail to meet the needs of those who consider themselves to be electrosensitive."

Ce communiqué a été erronément interprété par certains comme une reconnaissance de ce trouble.

[A1] http://www.hpa.org.uk/hpa/news/articles/press_releases/2005/051103_electrical_sensitivity.htm#content

Effets biologiques des champs électromagnétiques aux radiofréquences et micro-ondes

André Vander Vorst
Juillet 2006

1. Introduction
 2. Mécanismes d'interaction
 - 2.1 Champs, puissance, fréquence, longueur d'onde, énergie
 - 2.2 Bioélectricité
 - 2.3 Caractérisation des tissus biologiques
 - 2.4 Thermodynamique
 3. Effets biologiques
 - 3.1 Absorption
 - 3.1.1 Dosimétrie, TAS (*SAR*)
 - 3.1.2 Considérations thermiques
 - 3.2 Système nerveux
 - 3.3 Cellules, membranes, molécules
 - 3.4 Influence de médicaments
 - 3.5 Effets microthermiques et isothermes
 - 3.5.1 Effets microthermiques
 - 3.5.2 Effets isothermes (température constante)
 - 3.6 Études épidémiologiques
 4. Appréhensions
 - 4.1 Exposition de longue durée à faible niveau et modulation numérique
 - 4.2 Hypersensibilité électromagnétique
 - 4.3 Barrière sang-cerveau (barrière hémato-encéphalique) (*BBB*)
 - 4.4 Critique du texte initial de l'OMS
 5. Conclusions
- Références

Effets biologiques des champs électromagnétiques aux radiofréquences et micro-ondes

André Vander Vorst
Juillet 2006

1. Introduction

Avant l'implantation de systèmes de mobilophonie, la seule préoccupation du grand public au sujet des risques éventuels liés à une exposition électromagnétique concernait l'implantation de lignes de distribution d'énergie électrique à très basse fréquence : le public ne se souciait guère de dangers éventuels liés à l'exposition à des champs micro-ondes. Pourtant, depuis plusieurs dizaines d'années, de nombreux émetteurs de télévision et de radiodiffusion en fréquence modulée FM émettaient une puissance parfois fort importante. L'existence de radioamateurs était bien connue. Se sont alors ajoutées des radios libres ainsi que des radios d'école. Personne, ou presque, ne s'en est préoccupé.

La situation a changé au moment de l'implantation de systèmes de mobilophonie. En peu de temps, on a vu surgir rapports, textes, communiqués et interviews. On a vu se manifester presse écrite, radio, télévision, administrations communales, régionales et communautaires, mandataires publics, délégations diverses du personnel, écoles, hôpitaux, particuliers, etc. Fin 1999, nous avons rédigé une brochure à l'intention de celles et ceux que la question préoccupait [1]. Un livre beaucoup plus complet a paru en 2006 [2].

2. Mécanismes d'interaction

2.1 Champs, puissance, fréquence, longueur d'onde, énergie

Un champ est une distribution spatiale d'une grandeur physique.

Ainsi, l'ensemble des valeurs de la température en tout point d'un local peut être appelé le champ de température du local. Ce champ est dit **champ scalaire**, car la température est définie par un nombre et un seul, ce qui est propre aux grandeurs scalaires.

En électromagnétisme, on peut parler de champ électrique, magnétique ou électromagnétique, selon le cas. Ces trois expressions ne sont pas interchangeables: les trois grandeurs sont différentes. Dans les trois cas, il s'agit d'un **champ vectoriel**, défini par deux nombres indispensables : grandeur et direction.

Ainsi, à proximité d'une pile ou d'une batterie, il y a un **champ électrique**. À proximité d'un aimant permanent ou d'un fil conduisant du courant continu, il y a un **champ magnétique**. À proximité d'une ligne de distribution d'énergie électrique, on parlera surtout mais non exclusivement de champ magnétique. En continu et à basse fréquence, les champs électrique et magnétique peuvent être traités séparément et aucune puissance ne leur est associée. À fréquence plus élevée, notamment aux fréquences dites radio et aux micro-ondes, on doit parler de **champ électromagnétique**: le champ électrique n'existe pas sans le champ magnétique et réciproquement. De plus, au produit de ces deux champs est nécessairement associée une **densité de puissance** électromagnétique. Si ces champs sont ceux d'une onde électromagnétique qui se propage dans l'espace, celle-ci peut donc transporter de la puissance à distance.

La **fréquence** d'un phénomène électromagnétique est le nombre de fois qu'il se répète par seconde, mesuré en hertz (Hz). On peut citer ainsi:

- la fréquence industrielle, qui est de 50 Hz dans la plupart des pays (60 Hz aux États-Unis)
- les ondes moyennes en radio (amplitude modulée), à quelques centaines de kHz
- la bande de télévision VHF 1, de 48 à 97 MHz
- la radio en fréquence modulée, de 88 à 108 MHz
- les bandes de télévision VHF 3, de 175 à 287 MHz et UHF 1 de 271 à 855 MHz
- les systèmes de téléphonie mobile GSM, émettant à 900 et 1.800 MHz
- le four micro-onde de cuisine, fonctionnant à 2.45 GHz

- les systèmes WiFi, aux environs de 2.5 GHz
- les systèmes WiMax, notamment aux environs de 3.5 GHz
- des transmissions de télévision par satellite, aux environs de 10 GHz
- des liaisons particulières de télécommunications, à 40 et 60 GHz
- les systèmes prévus pour 2010 pour le trafic routier, de 70 à 100 GHz.

La figure 1 illustre l'extrême variété des fréquences utilisées.

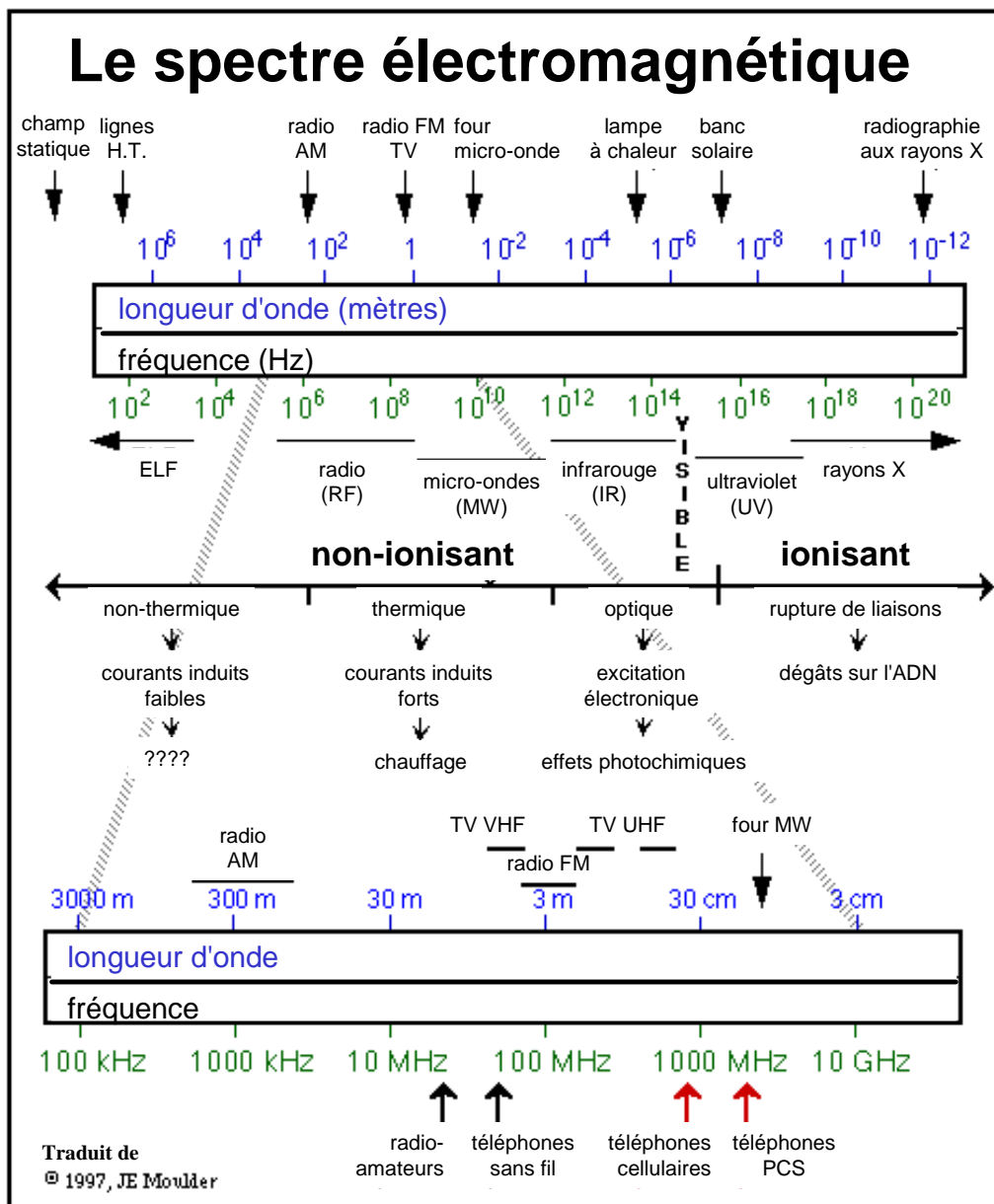


Figure 1. Spectre électromagnétique et applications techniques (site internet du "Medical College Wisconsin")

Un phénomène électromagnétique peut aussi se caractériser par la **longueur d'onde**.

Le produit de la longueur d'onde par la fréquence est une constante : la longueur d'onde est d'autant plus petite que la fréquence est élevée.

Cette constante est la vitesse de phase **dans le milieu considéré** : elle diffère d'après le milieu dans lequel se trouve l'onde. Dans le vide elle est communément appelée vitesse de la lumière et vaut environ 300.000 km/s. Ainsi, dans le vide, la longueur d'onde est de 6.000 km à 50 Hz, 3 m à 100 MHz, 33.3 cm à 900 MHz, 12.25 cm à 2.45 GHz, 3 cm à 10 GHz et 3 mm à 100 GHz.

Dans d'autres matériaux - béton, mur de brique, corps humain - la valeur de cette vitesse est plus faible. À fréquence donnée, la longueur d'onde sera donc plus petite dans ces matériaux, et notamment dans le corps humain, que dans le vide.

L'**énergie** associée à une onde est d'autant plus élevée que la fréquence est élevée. D'après la fréquence, les ondes électromagnétiques sont classées en rayonnement non ionisant et rayonnement ionisant. Les rayonnements **ionisants** sont associés aux fréquences les plus élevées, supérieures à celles des phénomènes visibles, telles que les rayons X. Les rayonnements **non ionisants** sont associés aux fréquences plus basses, ce qui couvre notamment les ondes radio, les micro-ondes, l'infrarouge et le visible.

Les **micro-ondes** (*microwaves*) ou **hyperfréquences** sont non ionisantes. Elles couvrent la bande de 100 MHz à 300 GHz, c'est-à-dire des longueurs d'onde de 3 m à 1 mm dans le vide. Actuellement, on prend l'habitude de considérer la gamme des micro-ondes comme couvrant jusqu'à 1 THz (0.3 mm).

Les micro-ondes ont donc **des longueurs d'onde du même ordre de grandeur que la dimension des objets couramment utilisés**: le mètre, le décimètre, le centimètre, le millimètre. C'est pour cette raison que les théories, techniques et méthodes de mesure aux micro-ondes sont particulières. C'est pour cette raison aussi qu'on s'interroge à propos d'effets particuliers éventuels, notamment biologiques.

2.2 Bioélectricité

Les effets de l'interaction de champs radiofréquences et micro-ondes avec les tissus biologiques peuvent être considérés comme le résultat de trois mécanismes :

1. la pénétration de l'onde électromagnétique et sa propagation dans le système vivant,
2. l'interaction primaire de l'onde avec les tissus biologiques,
3. les effets secondaires éventuels induit par l'interaction primaire.

Le mot **interaction** est important. Il met en évidence le fait que les résultats finaux ne sont pas dus seulement à l'action du champ : ils sont influencés par la réaction du système vivant. Les systèmes vivants disposent d'une très grande capacité à compenser les effets induits par des influences externes, en particulier des sources électromagnétiques. C'est pourquoi des conclusions dérivées de modèles théoriques doivent être traitées avec précaution. Il y a compensation **physiologique** lorsque l'effort imposé par un facteur externe est entièrement compensé et que, dès lors, l'organisme peut fonctionner normalement. Il y a compensation **pathologique** lorsque l'effort imposé conduit à l'apparition de perturbations dans les fonctions de l'organisme et que des altérations structurelles peuvent même apparaître. La frontière entre ces deux types de compensation n'est évidemment pas toujours très nette.

Lorsque la source extérieure est électromagnétique, une partie de l'énergie incidente est absorbée et transformée dans le système biologique. Il y a donc lieu d'étudier une séquence source – rayonnement – cible. Les lois physiques de l'électromagnétisme doivent dès lors être utilisées pour étudier et expliquer les phénomènes observés : théorie des champs, réflexion, diffraction, dispersion, interférence, optique, et effets quantiques.

Les mécanismes bioélectriques naturels sont responsables du fonctionnement des nerfs et des muscles. Des courants électriques appliqués extérieurement peuvent exciter des cellules de nerfs et de muscles. Le système nerveux est impliqué dans la transmission rapide d'information à travers le corps, sous la forme de signaux électriques. On le divise entre système nerveux central et système nerveux périphérique. Le système central est formé du cerveau et de la moelle épinière. Le système périphérique est formé des neurones afférents, qui conduisent l'information vers le système central, et des neurones efférents, qui conduisent l'information du système central vers le corps.

Le système efférent est divisé entre système nerveux somatique et système nerveux autonome. Celui-ci est formé de neurones qui conduisent des impulsions vers les tissus musculaires, le tissu musculaire du cœur et les glandes. Ceci est en général considéré comme involontaire, c'est-à-dire non conscient. Le système nerveux autonome a des divisions sympathique et parasympathique. Elles contrôlent des effets opposés dans des organes variés et, pour cette raison, sont en général considérées comme antagonistes. Le système sympathique tend à mobiliser le corps en cas d'urgence, on peut citer la sécrétion d'adrénaline à titre d'exemple, tandis que le système parasympathique est concerné par les fonctions végétatives du corps, comme la digestion.

Les muscles peuvent être excités directement, ou indirectement par les nerfs. Les niveaux de stimulation des nerfs sont généralement de beaucoup inférieurs à ceux nécessités par une stimulation directe du muscle. C'est pourquoi la compréhension des principes neuroélectriques est une bonne base pour étudier les réponses à une stimulation électrique.

Toutes les cellules vivantes présentent des phénomènes bioélectriques. Seule une variété réduite, toutefois, présente des variations de potentiel électrique qui révèlent leur fonction physiologique et dont on déduit des enregistrements bioélectriques : électrocardiogramme (cœur), électromyogramme (muscle), électroencéphalogramme et magnétoencéphalogramme (cerveau). On utilise à cet effet des électrodes qui enregistrent l'activité des générateurs bioélectriques.

La bioélectricité joue un rôle fondamental dans les organismes vivants. Il est démontré depuis longtemps que l'application directe d'une tension électrique extérieure peut avoir un effet sur la reconstitution d'os et cartilages. Une expérimentation *in vitro* considérable suggère l'utilité clinique de courants électriques pour la reconstitution de tissus mous et peut-être de fibres nerveuses ayant été sectionnées. Il ne fait aucun doute que la bioélectricité doit être prise sérieusement en considération lors de l'étude aussi bien d'applications médicales de champs électromagnétiques radiofréquences et micro-ondes que d'effets pathogènes éventuels sur les êtres humains et les animaux à ces fréquences.

2.3 Caractérisation des tissus biologiques

Le phénomène d'ionisation consiste à "arracher" un électron d'un des atomes constituants, ce qui implique de profondes modifications chimiques. A titre d'exemple, les rayons X sont ionisants. Aux radiofréquences et aux micro-ondes, même aux ondes millimétriques, le rayonnement est non ionisant : à ces fréquences, l'énergie de l'onde n'est pas suffisante pour arracher des électrons de leur environnement atomique. À ces fréquences, les phénomènes produits requièrent bien moins d'énergie que l'ionisation : il s'agit de mécanismes liés notamment à la dépolarisation des matériaux, y compris de membranes cellulaires, à la transduction piézoélectrique, etc. Parmi ceux-ci, le seul effet bien connu est celui de chauffage.

La caractérisation classique des matériaux diélectriques – le corps humain est à peu près exclusivement diélectrique – se fait en supposant un matériau de dimensions infinies. Ce n'est évidemment pas suffisant en ce qui concerne la caractérisation d'un organisme vivant, de configuration essentiellement hétérogène. Elle suppose aussi que la sollicitation extérieure – le champ électromagnétique dans le cas qui nous occupe ici – est suffisamment faible pour ne pas provoquer d'effets non linéaires. Enfin, la théorie classique est macroscopique et ne s'applique pas aux systèmes moléculaires.

Trois mécanismes sont principalement responsables des propriétés diélectriques de tissus biologiques : l'orientation du dipôle diélectrique, la polarisation aux interfaces séparant des matériaux différents dans l'organisme et la diffusion d'ions. .

La théorie classique s'applique mal aux liquides, en particulier à l'eau, alors que l'organisme vivant est essentiellement constitué d'eau et que les pertes diélectriques aux micro-ondes proviennent de la relaxation dipolaire de l'eau contenue dans les tissus.

Lorsque le matériau est inhomogène, des charges électriques apparaissent aux interfaces séparant les constituants et les propriétés de l'interface varient en fonction de l'interface, en particulier de 0.1 à 5 GHz. En même temps, une onde incidente ne traverse l'interface qu'en partie, l'autre partie étant réfléchie.

La présence de charges aux interfaces cause une diffusion d'ions – ce sont des particules chargées – appelée effets de contre-ions. Ces effets apparaissent principalement aux très basses fréquences et non aux micro-ondes.

Les effets diélectriques sont caractérisés par la **permittivité**, plus particulièrement la **permittivité relative** qui compare la permittivité d'un matériau à celle du vide.

La permittivité relative d'un tissu vivant est extraordinairement grande aux très basses fréquences : elle est de l'ordre de 1 à 10 millions à 50 Hz, fréquence industrielle. Cette valeur extrêmement élevée est due à l'effet contre-ion.

La permittivité relative est encore fort élevée aux radiofréquences : pour le sang à 3 MHz, elle est de l'ordre de 2.000.

Aux micro-ondes, la permittivité relative vaut à peu près celle de l'eau. Elle décroît d'environ 80 vers 0.5-1 GHz à une valeur de quelques unités aux fréquences millimétriques élevées.

2.4 Thermodynamique

L'électromagnétisme ne constitue qu'une manière de caractériser un tissu biologique : d'autres disciplines sont nécessaires à cet effet, par exemple en ce qui concerne les propriétés thermiques et les propriétés mécaniques. Il en résulte qu'il y a lieu de définir des formes d'énergie autres que l'énergie électromagnétique. Il faut en particulier faire intervenir la thermodynamique.

La théorie classique de la thermodynamique traite des propriétés moyennes de systèmes contenant un grand nombre de particules : elle évite la description de mouvements individuels de celles-ci.

La thermodynamique n'a pas de connexion avec la structure géométrique du système et elle ignore les mécanismes internes. Elle ne connaît que quatre paramètres : volume, pression, température et entropie. Elle considère l'interaction du système avec son environnement, prenant en considération l'entropie et l'énergie à l'entrée et à la sortie du système. Elle ne traite qu'avec trois types de systèmes :

1. système **isolé**, qui ne réalise aucun échange avec l'environnement,
2. système **fermé**, qui peut échanger de l'énergie avec l'environnement, ce qui peut être le cas de systèmes luminescents,
3. système **ouvert**, qui peut échanger à la fois de l'énergie et de la masse avec l'environnement, ce qui peut être le cas de systèmes photochimiques.

3. Effets biologiques

3.1 Absorption

Il est important de noter que seuls les champs intérieurs à un matériau peuvent influencer celui-ci. Les effets biologiques des micro-ondes ne dépendent pas seulement de la puissance extérieure appliquée, ils dépendent du champ existant à l'intérieur des tissus et systèmes.

L'approche théorique de cette question est une tâche formidable : la présence conjointe d'inhomogénéités et de formes compliquées rend la tâche extrêmement difficile, voire impossible. L'intensité du champ interne dépend d'un très grand nombre de paramètres et des distributions très complexes de champs peuvent exister, à la fois à l'intérieur et à l'extérieur du système biologique. Il peut en résulter des champs et des consommations locales de puissance très peu uniformes.

L'énergie micro-onde absorbée peut être convertie en d'autres formes d'énergie et causer des interférences avec le fonctionnement du système vivant. La plus grande partie de cette énergie est convertie en chaleur : c'est l'**absorption**.

Les ondes ne pénètrent pas nécessairement dans tout le corps : la pénétration est limitée par ce qu'on appelle l'**effet de peau**, caractérisé par la **profondeur de peau**. Son expression théorique montre qu'à une distance intérieure au corps égale à une profondeur de peau, l'intensité de champ ne vaut plus qu'environ 1/2.72 fois sa valeur à la frontière du corps, sur la peau. Elle montre aussi qu'à une profondeur égale à 3 fois la profondeur de peau, la densité de puissance ne vaut plus qu'environ 1% de sa valeur sur la peau.

En d'autres termes, les organes intérieurs du corps sont protégés – « blindés » - du rayonnement externe par les couches les plus extérieures du corps.

La profondeur à laquelle les micro-ondes peuvent pénétrer les tissus est fonction de la fréquence et des propriétés électriques et magnétiques des tissus. La théorie fournit une expression simple de la profondeur de peau :

$$\delta = 1/(\omega\mu\sigma/2)^{1/2} \quad \text{mètres}$$

où δ est la profondeur de peau, ω la pulsation (2π fois la fréquence), μ la perméabilité (paramètre mesurant l'importance des propriétés magnétiques) et σ la conductivité (paramètre mesurant l'importance des phénomènes de conduction électrique). On voit ainsi que, à fréquence identique, l'onde pénétrera d'autant plus profondément dans le tissu que la conductivité de celui-ci est faible, c'est-à-dire qu'il contient moins d'eau (il s'agit d'eau biologique, c'est-à-dire salée, dont la conductivité est élevée): l'onde pénètre plus loin dans un os que dans un tissu musculaire. De même, à contenu en eau identique, l'onde pénètre moins profondément les tissus lorsque la fréquence est plus élevée.

La figure 2 représente la variation de la densité de puissance intérieure à un tissu musculaire, à diverses fréquences.

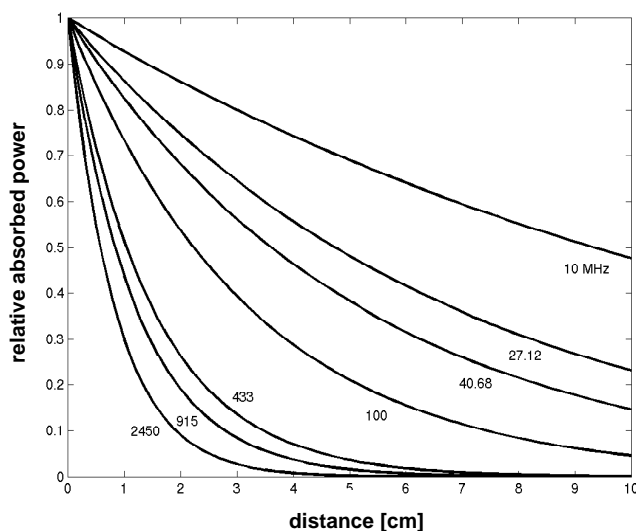


Figure 2. Puissance absorbée par un tissu musculaire à diverses fréquences

3.1.1 Dosimétrie, TAS (SAR)

Le concept de dosimétrie tente de quantifier les interactions des champs avec les tissus et systèmes biologiques.

Le niveau d'exposition micro-onde est assez systématiquement exprimé en **densité de puissance** de l'onde incidente. La règle – hautement recommandée – est de mesurer celle-ci en watts par mètres carré (W/m^2). On la mesure aussi en unités dérivées, comme le milliwatt par centimètre carré (mW/cm^2) ou le microwatt par centimètre carré ou par millimètre carré ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ou $\mu\text{W}/\text{mm}^2$), ce qui est toutefois susceptible d'introduire de la confusion.

On constate d'emblée que cette évaluation est basée sur l'habitude à peu près exclusive de ne s'intéresser qu'aux phénomènes d'échauffement, les effets thermiques.

Il faut reconnaître toutefois que, si l'on s'intéresse à des effets éventuellement autres que ceux-ci, on manque des outils adéquats. On peut évidemment parler de champ électrique, mais à quel endroit du corps l'évaluer? La puissance a le double avantage d'être une grandeur scalaire – un seul paramètre – et moyenne sur un volume donné.

Aux micro-ondes, on continue donc à ne s'intéresser quasi exclusivement qu'aux effets thermiques et au taux de déposition d'énergie par unité de masse. C'est la raison pour laquelle on a défini comme paramètre de dosimétrie micro-onde le taux d'absorption spécifique (TAS), en anglais *Specific Absorption Rate (SAR)*, exprimé en watts par kilo (W/kg). On l'exprime parfois en unités dérivées, comme en mW/kg ou en mW/g . Il y a lieu de noter qu'il s'agit de **watts de puissance absorbée par kilo de matière absorbante**. La matière absorbante ne constitue pas la totalité du corps humain : comme montré au paragraphe 3.1, elle ne correspond qu'à la couche la plus extérieure du corps, d'une épaisseur égale à environ une profondeur de peau.

La possibilité d'effets non thermiques est une question controversée et ne disposer que du TAS (SAR) comme outil d'évaluation quasiment exclusif n'arrange rien. En fait, le TAS (SAR) peut permettre d'évaluer des effets autres que

d'absorption, pour autant toutefois que la direction du champ électrique par rapport à la structure biologique ne soit pas un paramètre nécessaire.

3.1.2 Considérations thermiques

Les effets thermiques ont été étudiés depuis bien longtemps, notamment sur le corps humain. À titre d'exemple, on a mesuré l'élévation de température du visage exposé à l'**émission** d'un téléphone portable de type GSM, en utilisant une caméra infrarouge mesurant plus de 10.000 points du visage afin de déterminer des températures moyennes par zone du visage. Les mesures ont été faites à divers endroits d'un bâtiment et notamment dans la cave, où le téléphone GSM émet davantage pour contrebalancer le mauvais environnement. Excluant l'oreille, qui s'échauffe davantage, on a ainsi constaté un échauffement progressif, atteignant environ 0.7°C après 10 minutes, restant ensuite constant, par suite de l'effet de thermorégulation dû à la circulation du sang. Le visage étant refroidi par l'air ambiant, on peut estimer que la partie intérieure de la tête s'échauffe d'environ 0.8-0.9°C à proximité de la surface de celle-ci [3].

Un grand nombre d'effets thermiques ont été observés. Ils dépendent évidemment de la distribution spatiale du TAS (*SAR*) et du niveau de celui-ci :

1. on estime qu'un TAS (*SAR*) de 1 W/kg produit une élévation de température du corps humain de l'ordre de 1°C, en prenant en considération la thermorégulation du corps,
2. des dommages oculaires (cataracte) ont été observés à 100 mW/cm² et davantage, au-delà de 1GHz,
3. des dommages à la cornée ont été observés sur des singes pour des TAS (*SAR*) de 2.6 W.kg, à 2.45 GHz,
4. des dommages à la rétine ont été observés sur des singes pour un TAS (*SAR*) de 4 W/kg, dans la bande de fréquences 1.25-2.45 GHz,

La dimension du volume sur lequel on détermine une valeur de TAS (*SAR*) à ne pas dépasser est une notion importante : plus ce volume est petit, plus la norme est contraignante. Imposer une valeur à ne pas dépasser pour tout volume correspondant à 1 g de matière vivante, par exemple, est plus contraignant que ne pas dépasser la même valeur pour tout volume de 10 g.

Il semble que les effets comportementaux puissent être détectés à des niveaux d'exposition plus faible que les effets thermiques classiques.

De même, il semble que des ondes pulsées de façon diverse produisent des effets détectables à des niveaux plus faibles que les ondes présentant un caractère continu.

3.2 Système nerveux

Le système nerveux exerce trois fonctions : percevoir les variations aussi bien dans le corps qu'à l'extérieur de celui-ci, interpréter et intégrer ces variations, et répondre à cette interprétation en initiant des actions sous la forme de contractions musculaires ou de sécrétions glandulaires.

Le système sensoriel compte des millions d'organes senseurs, dont les fonctions de base impliquent de rassembler l'information à propos de l'environnement. À titre d'exemple, les nerfs sensoriels de la peau transmettent des impulsions aux endroits appropriés du système nerveux central, où les signaux sont interprétés en sensation de pression, douleur, température, ou vibration. De tels systèmes existent aussi pour l'ouïe, le goût et l'odorat.

Beaucoup de fonctions du système autonome sont contrôlées par l'hypothalamus, situé dans le cerveau. Il affecte notamment le système cardiovasculaire, la température du corps, l'appétit et le système endocrinien. La température du corps et les fonctions endocrines sont sous influence assez directe des champs électromagnétiques.

Si ceux-ci peuvent altérer l'activité et le fonctionnement du système nerveux central, on peut s'attendre à ce que ces altérations se traduisent dans les concentrations de neurotransmetteurs dans diverses régions du cerveau. Il a été montré que

l'excitation de points d'acupuncture par micro-ondes – à des fréquences de 0.2 à 3 GHz – produit un effet antalgique efficace [4].

3.3 Cellules, membranes, molécules

Les membranes cellulaires ont été identifiées comme site primaire d'interaction avec des champs à basse fréquence. La modulation d'événements chimiques à la surface de cellules indique une amplification significative de signaux faibles associés à divers mécanismes : rattachement d'hormones, anticorps et neurotransmetteurs à leurs sites spécifiques. Les flux d'ions, en particulier les ions calcium jouent un rôle primordial dans cette amplification du stimulus. Des champs des millions de fois plus petits que le gradient de potentiel de membrane de 10^7 V/m peuvent moduler la réponse de cellules à des molécules de surface. Il existe une sérieuse évidence que les membranes de cellules sont de puissants amplificateurs d'événements électrochimiques faibles se produisant dans leur voisinage.

On a aussi analysé l'effet de micro-ondes sur des molécules diverses du corps humain, avec un accent particulier sur les questions relatives à l'acide désoxyribonucléique (ADN). Des cellules ont été exposées à diverses fréquences, divers niveaux d'exposition et diverses durées. Il a été montré que les cellules exposées montrent un nombre de lésions chromosomiques sensiblement plus élevé que celles du groupe témoin, non exposé [5].

Un modèle théorique a été proposé pour l'évaluation de propriétés diélectriques du noyau cellulaire entre 0.3 et 3 GHz, en fonction de sa concentration en acides nucléiques. On a trouvé que les TAS (SAR) à des endroits proches l'un de l'autre à l'ordre des nanomètres (1 nanomètre = 1 millième de micromètres) peuvent différer l'un de l'autre, et que la puissance absorbée par unité de volume est d'un ou deux ordres de grandeur supérieure à celle du milieu environnement. Ceci soulève la question d'un éventuel effet biologique dû à une production de chaleur préférentielle et non négligeable à l'endroit des noyaux cellulaires [6].

3.4 Influence de médicaments

Il a été signalé plus haut (§ 3.1.2) que des dommages à la cornée ont été observés sur des singes pour un TAS (SAR) de 2.6 W/kg, à 2.45 GHz. On a aussi constaté qu'après un prétraitement médicamenteux contenant des opioïdes les mêmes dommages ont été observés sous un TAS (SAR) dix fois plus faible qu'en l'absence du prétraitement, dans la gamme 0.26-0.5 W/kg.

De cette observation et d'une série autres, il a été conclu que des opioïdes endogènes peuvent jouer un rôle dans les effets neurologiques des micro-ondes. Plus particulièrement, les micro-ondes peuvent accentuer des effets médicamenteux. Ceci a été mesuré sur rats à propos de divers effets, notamment accentuation de catalepsie, hyperthermie, etc. [7].

Actuellement, il n'est pas démontré que l'exposition répétée aux micro-ondes à faible niveau peut induire des effets neurologiques irréversibles.

Savoir si certains traitements médicamenteux sont susceptibles d'accentuer la sensibilité de certaines personnes aux micro-ondes peut être une question fort importante. Si, en effet, une personne se sent - à tort ou à raison - particulièrement sensible aux micro-ondes et subit un traitement médicamenteux contenant des opioïdes au moins pour réduire son état de stress, il est possible que celui-ci accentue en fait la sensibilité de la personne au rayonnement micro-onde.

3.5 Effets microthermiques et isothermes

L'existence d'effets non thermiques des micro-ondes est controversée.

Cette question n'est pas seulement scientifique : elle est largement politique et commerciale. Accepter en effet l'existence d'effets non thermiques des ondes RF ou micro-ondes implique la possibilité d'effets dus à une exposition à très faible niveau, ce qui n'est pas accepté.

Cette question n'est pas mineure. En 1971 déjà, deux auteurs très respectés à propos de leurs travaux sur les effets biologiques dus aux micro-ondes écrivaient : "L'importance de la différence entre les vues soviétique et occidentale apparaît

dès qu'on réalise que la signification pratique de l'exposition maximum permissible est basée sur l'acceptation ou la réjection des effets non thermiques comme biologiquement significatifs" [8].

L'ensemble de données obtenues quant aux effets des micro-ondes constitue un ensemble hétérogène dans lequel on ne fait pas aisément le classement entre effets "thermiques" et "non thermiques".

Il vaudrait mieux éviter le mot "non thermique" : une définition négative n'est pas une définition. Nous recommandons d'utiliser les mots soit **microthermiques** soit **isothermes**, selon le cas, pour caractériser les effets constatés à des niveaux d'exposition faibles ou très faibles. Ceci sera précisé plus loin.

Lors de l'étude de tels effets, il faut se souvenir que des effets biologiques ne sont pas nécessairement pathogènes pour l'homme.

De plus, lorsqu'on étudie la possibilité d'effets micro-thermiques ou isothermes, il faut être très attentif à prendre en considération toutes les composantes de puissance, afin de pouvoir faire la distinction par rapport à des effets thermiques.

Il y a lieu de noter que la température n'est pas un paramètre électromagnétique : elle est une conséquence de l'absorption d'énergie électromagnétique aux radiofréquences et aux micro-ondes. Autrement dit, l'électromagnétisme ne possède pas l'outil mathématique permettant d'imposer une température constante. Il en résulte qu'il n'est pas possible d'étudier des effets autres que thermiques en n'utilisant que l'électromagnétisme.

Il faut donc, dans ce cas, joindre à l'électromagnétisme une autre discipline, pour laquelle la température est un paramètre. Il s'agit de la thermodynamique (§ 3.2) : celle-ci permet de travailler à température constante et donc d'étudier des effets isothermes.

Les effets microthermiques sont ceux dans lesquels un champ électromagnétique très faible est susceptible de créer un effet biologique significatif, jouant un peu le rôle de "gâchette" (*trigger*) [9].

3.5.1 Effets microthermiques

Les systèmes biologiques font parfois preuve de propriétés semblables à celles d'équipements électroniques les plus raffinés, d'une manière qu'on ne comprend pas encore très bien.

À titre d'exemple, le système visuel humain a une sensibilité proche de la limite théorique : si l'on compare l'énergie d'un quantum de lumière à celle d'une impulsion nerveuse, on trouve un gain de plus d'un million. Autrement dit, le quantum de lumière agit comme une gâchette pour l'impulsion nerveuse, l'énergie de celle-ci étant fournie par le système biologique.

Un exemple théorique montre la possibilité de déclencher des excitations cohérentes, puissantes, de membranes cellulaires sous l'effet d'actions non cohérentes, faibles, lorsque certaines conditions sont réunies [10].

Cela permet d'évoquer l'action de micro-ondes à faible niveau de puissance. Lorsque les micro-ondes pénètrent dans un matériau, elles y délivrent de l'énergie, avec une réponse linéaire proportionnelle à l'intensité du rayonnement et une amplitude et une phase déterminées par la permittivité complexe du matériau. Il y a action des micro-ondes sur le mouvement thermique des dipôles électriques du matériau. Ce mouvement n'est que très légèrement perturbé, ce qui provoque une légère augmentation locale de température. Celle-ci se transmet aux régions avoisinantes, ce qui provoque une légère diminution de température, compensant la précédente. En régime stationnaire, la température est à peu près constante.

Il n'y a évidemment pas d'évidence indiscutable d'excitation cohérente, sinon il n'y aurait plus de controverse à propos des effets « non thermiques ». Il y a toutefois un assez grand nombre de résultats expérimentaux qui supportent cette théorie, essentiellement aux ondes millimétriques : sur *E. coli* à 70-75 et 136 GHz, des cellules de levure à 41-42 GHz, le métabolisme de protéines à 40 GHz, la moelle osseuse de souris à 40 GHz et l'induction de colicines vers 45 GHz [2].

Il existe un argument très général en faveur de ces théories.

On considère que les effets produits aux très basses fréquences (50 Hz) sont dus aux champs, en ne considérant actuellement que le champ magnétique.

De même, on traite les effets dus aux radiofréquences essentiellement en termes de champ électrique, avec les courants que celui-ci induit.

Aux micro-ondes, on semble s'obstiner à ne considérer que l'échauffement, dû à la puissance, et à montrer la plus mauvaise volonté à envisager des effets directement dus aux champs.

Par ailleurs, aux fréquences optiques, une des grandes caractéristiques biologiques est que l'énergie solaire est utilisée en partie pour constituer et maintenir une organisation très complexe dans les systèmes biologiques végétaux.

Le soleil chauffe effectivement les plantes.

Pourtant, personne ne dit que l'action du soleil sur les plantes est exclusivement thermique.

3.5.2 Effets isothermes (température constante)

La thermodynamique, et notamment le concept d'entropie, est nécessaire pour évaluer correctement certains phénomènes en ingénierie électronique. Un exemple typique est celui de la **luminescence**, où de la chaleur est convertie en rayonnement lumineux. La chaleur vient de l'énergie thermique du cristal luminescent. Il a été montré que l'énergie lumineuse peut être plus grande que l'énergie d'excitation absorbée, aux dépens de l'énergie thermique du matériau. Il en résulte un refroidissement du matériau, souvent appelé refroidissement optique. Il est dû au fait que l'énergie lumineuse émise est moins ordonnée que l'énergie d'excitation, transformée par le processus.

Un phénomène semblable peut être observé sur des systèmes biologiques vivants : c'est le cas de la luciole, qui émet de l'énergie lumineuse dans le noir, par transformation de l'énergie lumineuse reçue durant la journée.

La luminescence a été démontrée lors de l'exposition d'une interface air-eau, mesures faites sur de l'eau diversement salée, mais aussi sur une interface air-tissu humain. L'interface est exposée à un faisceau incliné aux ondes millimétriques, allant de 48 à 120 GHz. Il a été constaté que l'interface réémet un rayonnement aux ondes décimétriques. Celui-ci a été mesuré à 0.4 et 1 GHz, respectivement, dans un plan différent de celui du faisceau incident. La densité de puissance incidente est de l'ordre de $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, soit $10 \text{ mW}/\text{m}^2$. À titre indicatif, ce niveau est mille fois plus bas que le niveau limite de densité de puissance incidente admis par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) au-delà de 2 GHz pour l'être humain. La figure 3 montre les résultats obtenus [11].

On ne voit pas comment ce phénomène peut être expliqué par un raisonnement thermique.

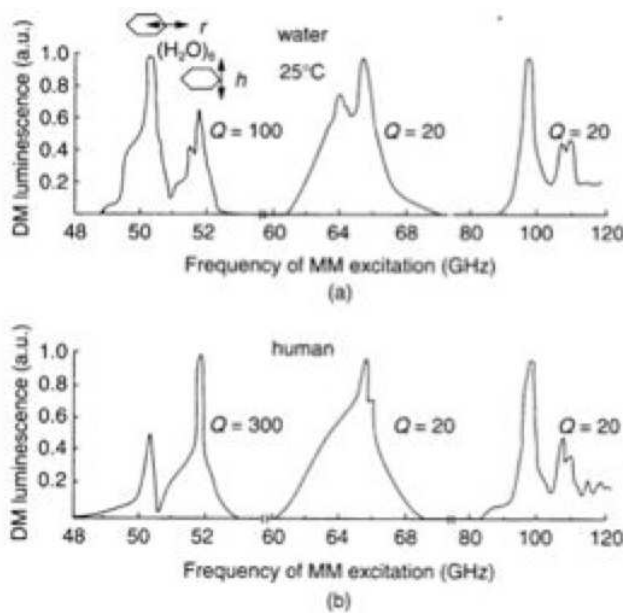


Figure 3. Luminescence mesurée aux ondes décimétriques sur de l'eau et du tissu humain ([2], adapté de [11])

Comme d'habitude, il faut préciser qu'il n'est pas prouvé que ce phénomène soit pathogène ou non pour l'être humain.

3.6 Études épidémiologiques

L'usage du téléphone mobile a suscité de nombreuses questions dans le public, ce que l'exposition à des émetteurs de télévision et de radio à fréquence modulée n'avait pas fait. Il en est résulté des études épidémiologiques visant principalement à étudier les éventualités de cancer et de génotoxicité.

À ce jour, les études n'établissent pas clairement un risque de cancer. La difficulté est d'établir une relation de cause à effet. Il faut se rendre compte, en effet, que même si les installations de mobilophonie n'avaient aucun effet sur le cancer, des milliers d'utilisateurs de téléphones mobiles développeraient un cancer chaque année, étant données les centaines de millions d'utilisateurs dans le monde.

Il faut savoir aussi qu'après l'apparition d'une nouvelle cause de cancer, il faut au moins 10 ans, probablement 15, et peut-être 20, pour que des tumeurs soient décelables.

Le GSM a été introduit dans nos pays le 1^{er} janvier 1994. Il s'est vraiment développé dans les années 1997-1999. Il faudra donc attendre la période 2015-2020 pour pouvoir constater le phénomène éventuel à échelle statistiquement significative.

En d'autres termes : des normes établies aujourd'hui ne doivent pas viser à protéger la population d'un effet connu, elles doivent viser à la protéger d'un effet éventuel, dont on ne connaîtra les résultats que vers 2015-2020 en ce qui concerne le cancer.

On renseigne environ 10 études épidémiologiques sur animal dans la littérature, quoique d'autres aient été menées. Il faut être très prudent lorsqu'on tente d'extrapoler des études sur animal à des résultats sur l'homme, pour diverses raisons, liées principalement à la configuration générale de l'un et de l'autre.

Les études épidémiologiques sur souris, rats et humains ont en général débouché sur un résultat négatif.

En novembre 2004, le TNO (Pays-Bas) a terminé une étude d'effets de signaux GSM sur le comportement humain. Cette étude a en général été jugée fort intéressante, mais à approfondir, car elle portait sur un échantillon trop petit.

En décembre 2004 ont été publiés les résultats d'une étude européenne, appelée Reflex, sur cellule vivante. Elle a montré des effets positifs sur l'ADN. Les résultats n'en sont pas directement généralisables à l'être humain.

En avril 2005, une étude danoise sur le cancer a examiné plus de 1.000 personnes, débouchant sur un résultat négatif quant à un usage accentué de GSM. Les auteurs eux-mêmes précisent qu'il faut une durée d'étude plus longue et qu'il est préférable de limiter l'usage du GSM par les enfants et d'utiliser une oreillette.

En mai 2005, une étude suédoise a considéré 1.400 personnes à tumeur et 1.400 personnes saines. Elle a montré qu'il existe un risque plus élevé à la campagne, liant ce risque à l'existence d'antennes plus disséminées, impliquant l'usage de puissances plus élevées.

Une étude épidémiologique de longue durée et à faible niveau d'exposition sur rats se termine actuellement à l'UCL, Belgique. Les modalités en ont été décrites dans la littérature [12]. Elle porte sur 124 rats, exposés 2 heures par jour pendant 21 mois, ce qui correspond à environ à 70% de leur durée de vie. Les premiers résultats, comparant les résultats obtenus sur les groupes exposés à ceux obtenus sur le groupe témoin, seront bientôt disponibles.

4. Appréhensions

4.1 Exposition de longue durée à faible niveau et modulation numérique

On a montré que l'exposition à faible niveau de micro-ondes pulsées affecte la neurochimie du cerveau d'une manière semblable au stress : activité cholinergique de l'avant du cerveau, l'exposition répétée amenant toutefois une compensation dans la concentration des récepteurs cholinergiques.

Un prétraitement avec des antagonistes narcotiques bloque les effets, donnant un rôle à l'implication d'opioïdes endogènes dans certains effets neurologiques des micro-ondes. La similitude des effets de micro-ondes avec des sources établies de stress a conduit à spéculer sur l'exposition micro-onde comme un facteur de stress [13].

Une conclusion importante des recherches dans ce domaine est que les conséquences à long terme d'une exposition répétée aux micro-ondes dépendent des paramètres d'exposition. Actuellement, il n'y a pas d'évidence que l'exposition répétée à des micro-ondes à faible niveau entraîne des effets neurologiques irréversibles.

Le développement des systèmes de mobilophonie sans fil a résulté dans la transmission et la propagation dans l'atmosphère de signaux très spécifiques, dits **numériques**, en particulier en ce qui concerne les signaux du système GSM. Il s'agit d'un signal à porteuse micro-onde, dont la modulation par impulsions contient des fréquences très basses : 217 Hz de façon permanente, et 8.3 Hz dans certaines conditions. On peut dire que le GSM transmet les micro-ondes en "paquets" (*bursts*). Ceci n'est pas le cas pour les signaux transportés par modulation d'amplitude ou modulation de fréquence, dits **analogiques**.

Le développement de réseaux de transmission sans fil de tels signaux pose la question : l'envoi de "paquets" micro-ondes et la présence de très basses fréquences dans la modulation est-elle susceptible d'exercer une influence négative sur les tissus humains et plus spécifiquement sur le cerveau, en induisant d'éventuels effets non thermiques ?

4.2 Hypersensibilité électromagnétique

Certaines personnes se plaignent de troubles divers qu'elles attribuent à une exposition électromagnétique, notamment micro-onde, à des niveaux bien inférieurs à ceux des effets nocifs connus et à ceux des normes et recommandations. Certaines relient leurs troubles davantage à l'exposition électromagnétique à très basse fréquence, d'autres à des antennes micro-ondes, essentiellement GSM, d'autres encore aussi bien aux lignes à haute tension qu'aux antennes GSM.

Dans certains cas, les personnes sont tellement affectées qu'elles s'isolent et sont amenées à cesser le travail et changer leur style de vie, tandis que d'autres rapportent des symptômes moins sévères qui entraînent un évitement de certaines sources de champ électromagnétique. La plupart des recherches, scandinaves, indiquent des plaintes dermatologiques (rougeurs, picotements, sensations de brûlure, etc.). De plus en plus de personnes présentent des symptômes neurasthéniques et végétatifs (fatigue, céphalées, difficultés de concentration, vertiges, nausées, palpitations, perturbations digestives, etc.). Certaines perturbations psychophysiologiques ont été constatées telles qu'une hyper-réactivité du système nerveux central et un déséquilibre au niveau du système nerveux autonome, sans qu'on ne sache s'il s'agit de facteurs prédisposant ou d'une conséquence de la souffrance de ces personnes. Il est important de noter que ces symptômes sont réels même s'ils ne peuvent être « objectivement » attribués aux champs électromagnétiques [14].

Le type de symptômes rapportés est proche de ce qu'on s'est mis à appeler vers 1960 le syndrome micro-onde, concept mis en évidence en URSS, principalement après l'exposition à faible niveau de l'ambassade des U.S.A. à Moscou par les Soviétiques.

À ce jour, on n'a pas pu établir de relation de cause à effet entre une exposition à faible niveau et les effets rapportés d'hypersensibilité, malgré deux tentatives effectuées en Suède, où existe une association groupant plus de 2.000 personnes hypersensibles.

Pour notre part, nous avons été en contact avec une trentaine de ces personnes et en avons rencontré une vingtaine. La plupart explicitent de façon très précise ce dont elles souffrent, à quels endroits et sous quelles formes cela se manifeste. Nous nous sommes souvent demandés s'il y avait un ou des effets exacerbés par la prise de médicaments divers. Depuis peu, à l'égard de certaines de ces personnes - certaines s'étaient mises à vivre dans leur cave - nous avons commencé à adopter comme hypothèse de travail qu'il y avait bien un lien de cause à effet entre l'exposition micro-onde et les troubles dont elles souffraient. Cela a dès lors ouvert la voie à des exposés techniques sur la façon de se protéger, « se blinder », à l'égard des

micro-ondes, ce qui est possible sans guère de difficultés, sans trop de frais, et de façon relativement conviviale. Cela a heureusement débouché dans quelques cas sur l'accès à une vie plus normale pour certains.

4.3 Barrière sang-cerveau (barrière hémato-encéphalique) (BBB)

La barrière sang-cerveau protège le cerveau des mammifères de composants potentiellement dangereux pour lui et qui se trouveraient dans le sang. C'est une défense naturelle, une « barrière » perméable de façon sélective. Elle peut être traversée par de petites molécules solubles dans les lipides. Son dysfonctionnement permet l'influx dans le cerveau de molécules hydrophiles, normalement exclues. Ceci peut mener à des oedèmes cérébraux, une augmentation de pression intracrânienne et, dans le pire des cas, un dommage cérébral irréversible. L'ouverture non contrôlée de la barrière peut aussi soumettre le système nerveux central à l'action de micro-organismes extérieurs à celui-ci.

Environ 30 investigations expérimentales sur rats à propos des effets des micro-ondes sur la barrière ont été rapportées fin 2001 [15], réparties environ par moitié entre effets positifs et effets négatifs. Certains effets positifs, notamment le transfert de sérum d'albumine, ont été observés à des TAS (SAR) de 0.016 W/kg, soit cinq fois plus bas que le niveau que l'OMS recommande de ne pas excéder pour l'être humain.

On en déduit une question plausible : sous l'effet de téléphones portables, l'albumine ou d'autres molécules toxiques pourraient-elles se porter au cerveau et s'y accumuler [16] ?

Il n'y a aucune réponse à cette question pour le moment, ni positive, ni négative.

4.4 Critique du texte initial de l'OMS

La controverse actuelle au sujet des risques éventuels dus aux micro-ondes est alimentée par le fait que la première recommandation de l'OMS a été publiée en 1993 [17], juste avant l'implantation de GSM en Europe occidentale, le 1^{er} janvier 1994, et plusieurs années avant le développement massif de celui-ci.

Cette recommandation a été maintenue après l'implantation du GSM, sur la recommandation de l'*International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)*, publiée en 1998 [18].

Le texte initial de l'OMS [17] dit, page 21, 1.1.6.1 Thermal effects :

In normal thermal environments, an SAR of 1-4 W/kg for 30 minutes produces average body temperature increases of less than 1°C for healthy adults.

Il établit aussi des facteurs de sécurité visant à protéger la population, page 23, 1.1.7.1 Basic exposure limits

A safety factor of 10 is introduced, in order to allow for unfavourable, thermal, environmental, and possible long-term effects, and other variables, thus arriving at the basic limit of 0.4 W/kg.

An additional safety factor should be introduced for the general population, which includes persons with different sensitivities to RF exposure. A basic limit of 0.08 W/kg, corresponding to a further safety factor of 5, is generally recommended for a public at large.

À titre d'information, un TAS (SAR) de 0.08 W/kg correspond à un champ électrique de 41.2 V/m à 900 MHz.

La norme fédérale belge est 2 fois plus exigeante en champ électrique, imposant une limite de 20.6 V/m à 900 MHz. Elle est donc 4 fois plus exigeante en densité de puissance et en TAS (SAR).

Il faut noter qu'une *safety factor* est un facteur de sécurité, à l'égard d'un effet connu. Ceci n'a rien à voir avec un facteur de précaution, qu'on utilise à l'égard d'un effet non connu

Ce texte initial de l'OMS est particulièrement ambigu, à plusieurs égards.

1. 1-4 W/kg

Le texte introduit un premier facteur de sécurité calculé à partir de 4 W/kg, en déduisant un facteur 10 menant à 0.4 W/kg

Disant que l'effet sur la population existe à partir de 1 W/kg, il faut appliquer le premier facteur de sécurité à partir de cette valeur. Il en résulte un facteur 4 dans l'exigence des normes par rapport à l'OMS.

2. 30 minutes

L'exposition aux diverses stations émettrices est permanente. Il y a donc lieu d'appliquer un facteur de sécurité pour tenir compte de la différence 30 minutes – 24 heures/24.

3. less than 1°C

Quelle élévation permanente de température admet-on et quel facteur de sécurité introduit-on en conséquence ?

4. healthy adults.

Toutes les personnes exposées ne sont pas adultes, quel **facteur** de sécurité introduire ?

Toutes les personnes exposées ne sont pas en bonne santé, quel **facteur** de sécurité introduire ?

Il y a aussi des personnes adultes qui ne sont ni adultes ni en bonne santé, quel facteur de sécurité introduire ?

Enfin, le facteur supplémentaire de sécurité entre travailleurs du secteur et grand public est de 5.

Il faut constater que ce rapport est de 20 en Belgique en ce qui concerne les rayonnements ionisants.

Ceci fait qu'il y a un rapport 4 de différence de sécurité entre rayonnements ionisants et rayonnements non ionisants.

Cette discussion montre qu'il n'y a pas lieu de s'étonner si certains estiment que les recommandations de l'OMS ne sont pas assez exigeantes.

5. Conclusions

La controverse au sujet des normes et recommandations est aussi alimentée par le fait que les mécanismes de chauffage diélectrique sont très bien connus, ce qui n'est pas le cas des mécanismes autres que le chauffage par micro-ondes. En d'autres termes, il n'existe pas ou guère de valeurs chiffrées concernant ces autres effets.

La fixation des normes locales dépend donc surtout de la sensibilité des populations à l'ensemble de la problématique et de l'attention que les politiques locaux portent aux préoccupations de leurs populations.

Le tableau ci-dessous en illustre la grande variété, se limitant aux valeurs pour le grand public, exprimées en V/m, à 900 MHz, et comparées à certain points de repère : barrière sang-cerveau et effets microthermiques ou isothermes.

- (1) OMS, ICNIRP et Union européenne
ne pas dépasser 41.2 V/m
- (2) Plusieurs gouvernements européens ont des normes plus exigeantes
Belgique : 20.6 V/m
Italie : 20 V/m, et 6 V/m pour exposition ≥ 4 heures
Suisse : 6 ou 4 V/m
Luxembourg : 3 V/m
- (3) Effets sur barrière sang-cerveau (*BBB*)
effets positifs dans 50% des études (sur rats)
certains effets positifs observés à 0.016 W/kg, soit 18 V/m
- (4) Effets *isothermes* ou *microthermiques*
facteur supplémentaire d'au moins 100 (en puissance), soit maximum 4 V/m
- (5) Etudes épidémiologiques exposition TV/FM
deux études/quatre : doublement taux leucémie, sous exposition de 2 à 4 V/m
- (6) Conseil supérieur d'Hygiène belge
facteur supplémentaire de 200, soit 3 V/m
il s'agit d'une valeur maximum
elle tient compte de toutes les émissions dans la bande de fréquences considérée
- (7) Notre recommandation a été : 3 V/m
Région wallonne, Région bruxelloise
il s'agit d'une valeur maximum
elle tient compte de toutes les émissions dans la bande de fréquences considérée
- (8) Février 2003, Ville de Paris: de 1 à 2 V/m
il s'agit d'une valeur moyenne par jour
elle ne porte que sur le GSM
(accord entre Ville et opérateurs)
- (9) Juin 2000, Ville de Salzbourg : 0.6 V/m
il s'agit d'une valeur moyenne par an
elle ne porte que sur le GSM

Rapport entre les valeurs extrêmes de champ électrique : $41.2/0.6 = 68.67$

Rapport entre les valeurs extrêmes de puissance : $(41.2/0.6)^2 = 4720$

RÉFÉRENCES

- [1] A. Gérin, B. Stockbroeckx, A. Vander Vorst, *Champs micro-ondes et santé*, Hyperfréquences, 1999, 56 p.
- [2] A. Vander Vorst, A. Rosen, Y. Kotsuka, *RF/Microwave Interaction with Biological Tissues*, Wiley, 2006, 330 p.
- [3] M.D. Taurisano, A. Vander Vorst, "Experimental thermographic analysis of thermal effects induced on a human head exposed to 900-MHz fields of mobile phones", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 48, no. 11, pp. 2022-2032, Nov. 2000.
- [4] J. Teng, D. Vanhoenacker, A. Vander Vorst, "Biological effects of microwaves in acupuncture", *Proc. European Micr. Conf.*, London, pp. 918-923, 1989.
- [5] V. Garaj-Vrhovac, A. Fucic, D. Horvat, "The correlation between the frequency of micronuclei and specific chromosome aberrations in human lymphocytes exposed to microwave radiation in vitro", *Mutation Res.*, no. 281, pp. 181-186, 1992.
- [6] J. Vanderstraeten, A. Vander Vorst, "Theoretical evaluation of dielectric absorption of microwave energy at the scale of nuclear acids", *Bioelectromagnetics*, 25: 380-3890, 2004.
- [7] [45] H. Lai, "Research on the neurological effects of nonionizing radiation at the University of Washington", *Bioelectromagnetics*, vol. 13, pp. 513-526, 1992
- [8] S.M. Michelson, C.H. Dodge, "Soviet views on the biological effects of microwaves - An analysis", *Health Physics*, vol. 21, pp. 108-111, Jul. 1971.
- [9] A. Vander Vorst, "Biological Effects, Introduction to Workshop", *Proc. Workshop Biological Eff. Medical Applic. Microwaves 27th Eur. Microwave Conf.*, Jerusalem, pp. 1-3, Sept. 1997.
- [10] H. Fröhlich, "The biological effects of microwaves and related questions", in *Advances in Electronics and Electron Physics*, pp. 85-152. New York: Academic Press, 1980.
- [11] Y.P. Chukova, *Advances in Nonequilibrium Thermodynamics of the Systems under Electromagnetic Radiation*. Moscow: Academy of Sciences, 2001.
- [12] D. Adang, A. Vander Vorst, "First Results of a Long-Term Epidemiological Study on Low-Level Microwave Exposure of Rats", *Int. Microwave Symp.*, San Francisco, Jun. 2006, pp. 1742-1745.
- [13] L.G. Salford, A. Brun, F. Sturesson, J.L. Eberhart, B.R. Persson, "Permeability of the blood-brain barrier induced by 915 MHz electromagnetic radiation, continuous wave and modulated at 8, 16, 50 and 200 Hz", *Microscopy Res. Tech.*, vol. 27, pp. 535-542, 1994.
- [14] Conseil Supérieur d'Hygiène belge, Note interne 2006.
- [15] J.C. Lin, "The Blood-Brain Barrier, Cancer, Cell Phones, and Microwave Radiation", *IEEE Microwave Mag.*, Vol. 2, no. 4, Dec. 2001, pp. 26-30.
- [16] J.C. Lin, "Microwave radiation and leakage of albumin from blood to brain", *IEEE Microwave Mag.*, Vol. 5, no. 3, Sep. 2004, pp. 22-28.
- [17] World Health Organization, *Electromagnetic Fields (300 Hz to 300 GHz)*. Geneva: WHO, 1993.
- [18] ICNIRP Guidelines, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Physics*, vol. 74, pp. 494-522, Apr. 1998.