

CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES ET TELEPHONIE MOBILE



Juin 2003

**W. PIRARD,
Ingénieur Civil en Electronique,
Chef de la Section
Electronique Appliquée.**

TABLE DES MATIERES

UNITES ET ABREVIATIONS	3
PREAMBULE	4
1. RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS D'ELECTROMAGNETISME	5
2. UTILISATIONS DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES	7
3. CARACTERISTIQUES DES RESEAUX DE TELEPHONIE MOBILE (TETRA, GSM 900 ET DCS 1800)	8
4. EFFETS DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES	12
4.1. Effet thermique	12
4.2. Effets athermiques	13
5. NORMES ET RECOMMANDATIONS	15
6. CHAMPS MESURES A PROXIMITE D'ANTENNES-RELAIS	20
6.1. Champ dans le faisceau d'une antenne panneau	21
6.2. Champ derriere, en dessous et au-dessus d'une antenne panneau	25
6.3. Antennes utilisées dans les micro-cellules et pico-cellules	25
7. COMPARAISON AVEC D'AUTRES SOURCES DE CHAMPS	26
7.1. Portable GSM	26
7.2. Téléphone sans fil	28
7.3. Emetteurs de forte puissance	28



Institut Scientifique de Service Public

8. QUESTIONS DIVERSES	29
8.1. Pacemakers et implants actifs	29
8.2. Interdiction d'utiliser les téléphones portables dans les hôpitaux	30
8.3. Augmentation du nombre d'antennes due à la concurrence entre opérateurs	30
8.4. Confusion entre fréquence et puissance - Profondeur de pénétration	30
8.5. Regroupement d'antennes de plusieurs opérateurs sur un même site	31
8.6. Distances de sécurité	32
8.7. Lobes secondaires d'une antenne	33
8.8. Travaux à proximité d'une antenne de radiocommunication mobile	34
8.9. Réémetteurs passifs	35
9. CONCLUSIONS	36
ANNEXE	40
DETERMINATION DE L'INTENSITE D'UN CHAMP ELECTROMAGNETIQUE	40
A.1. METHODES DE MESURES	40
A.1.1. Méthode « à bande large »	40
A.1.2. Méthode « sélective »	41
A.2. METHODE DE CALCUL	42
A.2.1. Zones entourant une source des champs	43
A.2.2. Formules applicables en pratique	46
REFERENCES	48

UNITES ET ABREVIATIONS

Grandeurs	Symboles	Unités	Abréviations
Champ électrique	E	volt par mètre	V/m
Champ magnétique	H	ampère par mètre	A/m
Champ électromagnétique	C.E.M.	-	
Densité de puissance	S	watt par mètre carré milliwatt par mètre carré microwatt par centimètre carré	W/m ² mW/m ² μW/cm ²
Fréquence	f	hertz kilohertz mégahertz gigahertz	Hz kHz MHz GHz
Longueur d'onde	λ	mètre	m
Taux d'Absorption Spécifique (ou « specific Absorption Rate »)	SAR	watt par kilogramme milliwatt par kilogramme	W/kg mW/kg

Notes :

$$1 \text{ mW/m}^2 = 0,001 \text{ W/m}^2$$

$$1 \text{ μW/cm}^2 = 10 \text{ mW/m}^2$$

$$1 \text{ kHz} = 1000 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ MHz} = 1.000.000 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ GHz} = 1.000.000.000 \text{ Hz}$$

PREAMBULE

En 2000, l'ISSeP avait publié les résultats d'une campagne de mesures des champs électromagnétiques (CEM) générés par les antennes-relais de téléphonie mobile ([1] et [2]) ; cette étude avait été réalisée à la demande de la Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGRNE) du Ministère de la Région wallonne. Le présent document rappelle les principaux résultats déjà publiés en 2000 et comprend une mise à jour des réglementations relatives à l'exposition aux CEM ainsi qu'un exposé plus général qui devrait permettre aux personnes n'ayant aucune notion d'électromagnétisme d'appréhender le sujet. Le lecteur uniquement intéressé pas les résultats essentiels trouvera ceux-ci aux § 6 à 9.

En matière de CEM, les questions qui reviennent de manière récurrente sont d'ordre technique et d'ordre biologique : quel est le niveau d'exposition produisant des effets néfastes pour la santé et à quel niveau sommes-nous exposés ? Alors que la première question n'a pas encore reçu de réponse définitive, il est possible d'apporter des réponses claires et irréfutables à la seconde question, puisqu'elles sont vérifiables « sur le terrain », pour autant, bien sûr, que l'on possède les compétences nécessaires dans les domaines de l'électromagnétisme et de la radiopropagation. C'est cette seconde question qui sera principalement abordée ici et qui est celle dans laquelle l'ISSeP est directement impliqué par ses activités dans le domaine des CEM.

Les effets sur la santé font néanmoins l'objet d'un bref exposé (§ 4) d'avis ou de conclusions disponibles dans la littérature ; ce paragraphe est uniquement donné pour information, notre Institut n'ayant pas à se prononcer sur une question qui n'est pas de ses compétences et qui fait toujours l'objet de recherches dont les conclusions définitives ne seront pas disponibles à très court terme ; le lecteur qui souhaite approfondir cet aspect trouvera, par exemple sur Internet, de nombreuses sources d'informations, notamment le rapport de l'AFSSE [6], publié en mars 2003, qui donne un aperçu très complet des nombreuses études pour lesquelles les conclusions sont connues.

Ce document a été rédigé afin qu'il soit compréhensible par les « non initiés ». Le sujet étant assez complexe, la lecture de certains paragraphes peut néanmoins s'avérer ardue pour les personnes qui abordent le domaine. Dans le but de simplifier l'exposé, certaines questions très techniques, non indispensables à la compréhension du document, ont été reportées en annexe.

Pour clôturer ce préambule, ajoutons que le but de cette publication est d'informer en toute objectivité. Une telle information est sans doute utile, car nous avons eu maintes fois l'occasion de constater que la méconnaissance du sujet était à l'origine de décisions ou de comportements pouvant certainement être qualifiés d'irrationnels.

1. RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS D'ELECTROMAGNETISME

Nous présentons, ci-après, un rappel succinct de quelques notions d'électromagnétisme indispensables à la compréhension de ce document ; ce rappel est destiné aux lecteurs n'ayant pas, ou peu, de connaissances dans le domaine.

Le champ électrique (représenté par le symbole E) est une force qui s'exerce sur une charge électrique (électron, ion ou particule chargée) ; plus précisément, l'intensité du champ électrique, exprimée en V/m (volt par mètre), est la force qui s'exerce sur une charge unitaire (égale à 1 Coulomb).

Un exemple rencontré dans la vie quotidienne est la force d'attraction existant devant un écran de télévision en fonctionnement (ou juste après son extinction) ; ce champ est responsable du dépôt de poussières à sa surface.

Le champ magnétique (représenté par le symbole H) est une force qui s'exerce sur une masse magnétique (aimant, pièce en matériau ferromagnétique) ou sur une charge électrique en mouvement ; plus précisément, l'intensité du champ magnétique, exprimée en A/m (ampère par mètre), est la force qui s'exerce sur une masse magnétique unitaire (égale à 1 Weber). Le champ magnétique terrestre, ainsi que celui produit par un aimant, sont des exemples bien connus.

Un CEM comprend une composante magnétique et une composante électrique ; ces deux composantes sont intimement liées entre elles.

Les champs électriques et magnétiques sont relativement faciles à produire ; le passage d'un courant électrique dans un fil conducteur génère ces types de champs.

Il existe des champs continus et des champs alternatifs. Les champs continus ont une direction fixe et une intensité constante (ou pratiquement constante) au cours du temps. Le champ produit par un aimant permanent, ou le champ magnétique terrestre, sont des exemples de champs continus. Inversement, l'intensité d'un champ alternatif varie au cours du temps. Les champs produits par le réseau électrique ou les antennes de radiocommunication sont des exemples de champs alternatifs.

Généralement, les variations d'intensité d'un champ présentent un caractère répétitif avec des cycles d'une durée constante ; la fréquence est le nombre de fois qu'un cycle se produit pendant une seconde ; elle est exprimée en Hertz (Hz) et par ses multiples. Par exemple, dans le cas de la figure 1, la fréquence est de 4 Hz, puisqu'on dénombre quatre cycles sur une durée d'une seconde.

La fréquence des champs produits par le réseau de distribution d'électricité est de 50 Hz (60 Hz aux USA) ; celle des réseaux de téléphonie mobile GSM 900 et DCS 1800 est respectivement de 900 et 1800 MHz.

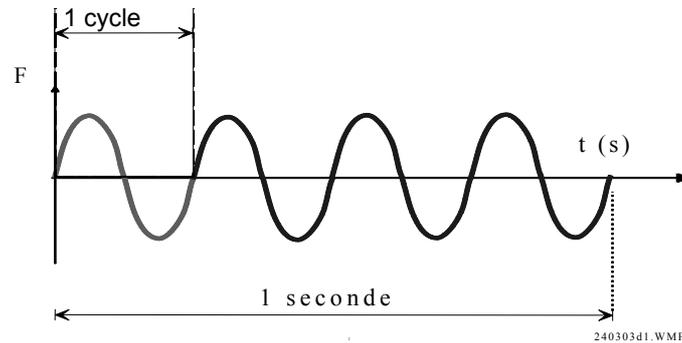


Figure 1 : Fréquence d'un champ alternatif

La notion de rayonnement est liée à la notion de propagation. Lorsqu'un champ se propage, on dit qu'il est rayonné, cette propagation ayant lieu sous forme d'ondes ; ce phénomène est similaire à celui observé lorsqu'on jette un caillou dans un étang, ce qui produit des ondulations qui se propagent en s'éloignant du point d'impact.

Notons également que ce n'est pas parce qu'un champ (électrique, magnétique ou électromagnétique) existe qu'il est nécessairement rayonné. En effet, pratiquement tous les appareils électriques produisent un champ mais, dans la plupart des cas, ce champ reste confiné autour de l'appareil. Au sens strict, on peut parler de rayonnement lorsque le champ se propage avec une intensité qui est inversement proportionnelle à la distance.

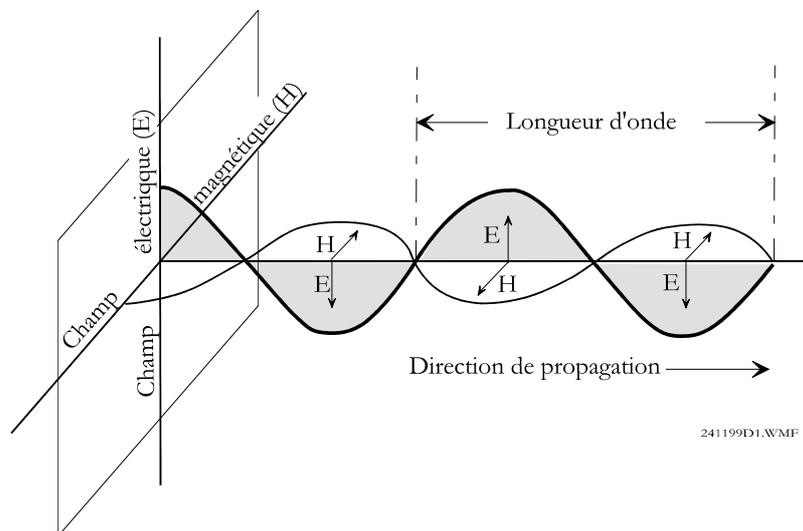


Figure 2 : Onde électromagnétique plane

Si l'on est suffisamment éloigné de la source d'émission, les composantes électrique et magnétique d'un CEM sont perpendiculaires entre elles, ainsi qu'à la direction de propagation, comme le montre la figure 2. Dans un tel cas, on dit que l'onde est plane ; elle a notamment comme particularité que les deux composantes du CEM sont liées par la relation de proportionnalité suivante :

$$\frac{E}{H} = Z \quad (1)$$

dans laquelle Z est l'impédance caractéristique du milieu où l'onde se propage; elle vaut 377Ω (Ohm) dans l'air.

Lorsque cette relation de proportionnalité entre les deux composantes du CEM est applicable, on se contente d'exprimer son intensité par celle du champ électrique, c'est-à-dire en V/m. Dans les mêmes conditions, on peut également utiliser la densité de puissance S en W/m^2 (watt par mètre carré) qui représente la puissance traversant une surface de $1 m^2$ perpendiculaire à la direction de propagation ; cette densité de puissance est donnée par :

$$S = \frac{E^2}{377} \quad (2)$$

De manière à simplifier l'exposé, l'intensité des CEM ne sera exprimée qu'en V/m.

2. UTILISATIONS DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES

Depuis leur découverte à la fin du 19^{ème} siècle, les ondes électromagnétiques ont été utilisées pour leur capacité de transmettre des signaux (sons, images, données,...) à distance. Leur application dans le domaine des télécommunications s'est surtout développée après la Seconde Guerre mondiale. Le tableau 1 donne une liste non exhaustive des principales utilisations des fréquences inférieures à 10 GHz ; on notera que certaines applications existent depuis plusieurs dizaines d'années. L'exposition chronique, à des champs de radiofréquence de faible intensité, de populations vivant près d'antennes, n'est donc pas un phénomène nouveau, contrairement à certaines affirmations. Par contre, il est exact que l'usage, à une large échelle, de sources telles qu'un téléphone portable, lequel expose son utilisateur à des CEM relativement intenses, est un phénomène récent, puisque la téléphonie mobile a commencé à se développer au début des années nonante. Avant cette date, les réseaux dits « de première génération » n'étaient utilisés que par un petit nombre de personnes¹ en comparaison avec le nombre d'utilisateurs des réseaux GSM.

L'emploi d'émetteurs portables, notamment pour un usage professionnel (militaires, policiers, services d'urgence, ...), bien que remontant à plusieurs dizaines d'années, ne concerne qu'une petite fraction de la population ; précisons que les émetteurs qu'utilisent ces catégories de professionnels émettent une puissance bien plus élevée que celle d'un téléphone portable GSM.

¹ Le réseau MOB 2 (prédécesseur du GSM en Belgique) a compté quelques dizaines de milliers d'abonnés.

Tableau 1
Principales utilisations des fréquences inférieures à 10 GHz

Utilisations	Bandes de fréquences
Radiodiffusion en ondes longues et moyennes	130 kHz à 1,6 MHz
Radiodiffusion en ondes courtes	Plusieurs bandes
Radioamateurs	Plusieurs bandes
C.B.	27 MHz
Radiodiffusion en fréquence modulée	88 → 108 MHz
Services d'urgence (police, pompiers, ambulances) et réseaux privés (Touring Secours, flottes de véhicules, ...)	70 → 170 MHz
Réseau ASTRID (Police fédérale et Polices locales, services d'urgence,...)	400 MHz
Emetteurs TV	50 → 840 MHz
GSM 900	900 MHz
DCS 1800	1800 MHz
Téléphones sans fil (normes CT1 et CT2)	900 MHz
Téléphones sans fil (norme DECT)	1900 MHz
Fours à micro-ondes	2400 MHz
UMTS	1900 → 2300 MHz
Militaires	Plusieurs bandes

3. CARACTERISTIQUES DES RESEAUX DE TELEPHONIE MOBILE (TETRA, GSM 900 et DCS 1800)

Les réseaux de téléphonie mobile GSM 900 et DCS 1800² fonctionnent sur le même principe, la seule différence est la bande de fréquences qui se situe autour de 900 MHz pour le GSM 900 et 1800 MHz pour le DCS 1800 ; ces deux réseaux offrent les mêmes fonctions. Dans la plupart des pays, chaque opérateur a reçu une licence pour émettre dans les deux bandes, celle du DCS 1800 n'étant utilisée que dans les zones à forte concentration d'abonnés où le réseau GSM 900 est saturé.

***N.B. :** La situation est un peu particulière dans le cas de BASE (anciennement KPN-ORANGE) dont le déploiement a commencé en 1999 avec un réseau DCS 1800 ; depuis 2002, BASE utilise également la bande de fréquences du GSM 900.*

Les réseaux GSM 900 et DCS 1800 sont avant tout destinés au public, même s'ils constituent, parfois localement, un des moyens de communication utilisés par des services d'urgence.

Le réseau de téléphonie mobile ASTRID répond à la norme TETRA et utilise une bande de fréquences proche de 400 MHz ; il est destiné aux services d'urgence (Polices fédérale et locales, pompiers, ambulances, protection civile, ...).

² Le DCS 1800 est également appelé « GSM 1800 »

En ce qui concerne le réseau GSM 900, la bande de fréquences comprise entre 880 et 915 MHz est utilisée pour la transmission du portable vers l'antenne-relais, tandis que la bande comprise entre 925 et 960 MHz est utilisée dans le sens inverse. La transmission du portable vers l'antenne-relais est habituellement appelée « voie montante » ou « up-link »; la transmission de l'antenne-relais vers le portable est, quant à elle, appelée « voie descendante » ou « down-link ».

De manière similaire, les voies montante et descendante du DCS 1800 utilisent respectivement les bandes comprises entre 1710 et 1785 MHz, d'une part, et entre 1805 et 1880 MHz, d'autre part.

Dans le cas du réseau ASTRID, la voie montante utilise la bande comprise entre 380 et 385 MHz ; la voie descendante se situe entre 390 et 395 MHz.

L'affectation des fréquences est normalisée au plan international ; en Belgique, ces fréquences sont allouées par l'IBPT (Institut Belge des Postes et des Télécommunications). Les différentes bandes de fréquences réservées à la téléphonie mobile sont reprises dans le tableau 2.

Une communication entre un portable et une antenne-relais utilise deux canaux de transmission : un pour la voie montante et un pour la voie descendante. Un canal est constitué d'une onde électromagnétique (appelée porteuse) dont la fréquence, dans le cas des réseaux GSM 900 et DCS 1800, varie dans une plage de 0,2 MHz de largeur et pendant un huitième du temps.

Tableau 2
Bandes de fréquences des réseaux TETRA (ASTRID), GSM 900 et DCS 1800

Normes	Voies	Bandes de fréquences (MHz)
TETRA	Montante	380 - 385
	Descendante	390 - 395
GSM 900	Montante	880 - 915
	Descendante	925 - 960
DCS 1800	Montante	1710 - 1785
	Descendante	1805 - 1880

La couverture radio d'un territoire est calquée sur un maillage constitué de cellules de forme hexagonale (figure 3) au centre desquelles est installée une antenne, si celle-ci est du type omnidirectionnel. L'élément hexagonal peut être subdivisé en trois cellules, si l'antenne omnidirectionnelle est remplacée par trois antennes directives (figure 4) ; on obtient ainsi des cellules dont la forme théorique est un losange ; cette solution permet de tripler la capacité du réseau tout en conservant le même nombre de sites d'antennes. Il faut préciser que le maillage hexagonal de la figure 3 n'est qu'une vue purement théorique ; en effet, la forme réelle des cellules dépend de la portée des antennes dans les différentes directions et qui est fonction de plusieurs facteurs.

Le diamètre des cellules est très variable (comme l'illustre la figure 3). Les deux paramètres qui déterminent la taille des cellules sont :

- les conditions de propagation du rayonnement électromagnétique. Celui-ci se propage relativement bien lorsque le relief est plat et si l'espace est dégagé. La portée d'une antenne GSM 900 peut atteindre, en théorie, 10 km si la propagation ne rencontre aucun obstacle (terrain plat et téléphone portable à l'extérieur) ; par contre, il subit une atténuation importante en zone urbaine ou boisée (due à la végétation) ou lorsque le relief est accidenté ;
- le nombre d'utilisateurs dans la zone. Le nombre de communications simultanées pouvant transiter par une antenne dépend du nombre de fréquences qu'elle émet. Par exemple, il est en théorie possible de transmettre 47 communications simultanément si l'antenne émet 6 fréquences.

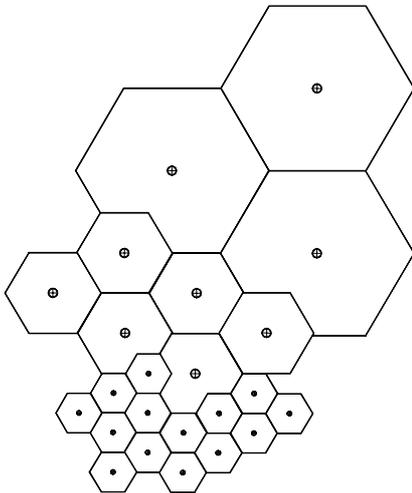


Figure 3 : Maillage cellulaire

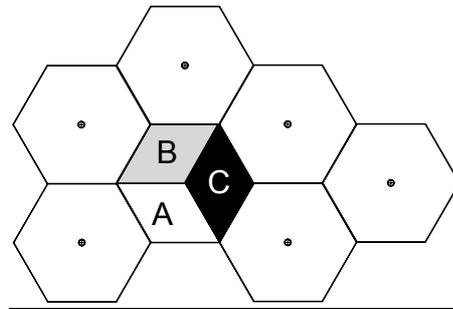


Figure 4 : Site équipé de trois antennes directives

Le rayon des cellules des réseaux GSM 900 et DCS 1800 peut être de quelques centaines de mètres en zone urbaine et de quelques kilomètres en zone peu peuplée ; ces cellules sont couvertes par des antennes dites « macro-cellulaires ». Il existe également des antennes « micro-cellulaires » et « pico-cellulaires ». Les antennes micro-cellulaires couvrent de petites zones (rayon de quelques dizaines, voire quelques centaines de mètres) dans lesquelles peuvent se trouver un grand nombre d'abonnés (zones commerciales, rues piétonnes, gares, ...). Les antennes pico-cellulaires sont destinées à couvrir l'intérieur de grands bâtiments (immeubles de bureaux, hôtels, ...) dans lesquels les CEM pénètrent difficilement.

Les antennes macro-cellulaires directives sont les plus répandues ; elles ont la forme d'un parallépipède rectangle disposé verticalement (voir photographie ci-après) et sont appelées « antennes panneaux ». Pour le GSM 900, la hauteur est généralement comprise entre 1,50 m et 3 m. La largeur dépasse rarement 30 cm et l'épaisseur 15 cm.

Les performances d'une antenne panneau (en termes d'angles d'ouvertures verticale et horizontale, et de gain) dépendent de ses dimensions et de la fréquence à laquelle elle émet ; les dimensions d'une antenne DCS 1800 sont la moitié de celles d'une antenne GSM 900 de caractéristiques identiques ; inversement, elles sont pratiquement le double pour les antennes du réseau ASTRID.



Vue d'un pylône équipé de 6 antennes directives

Dans le cas du réseau ASTRID, les macro-cellules sont plus grandes que pour les réseaux GSM 900 et DCS 1800, car les utilisateurs sont moins nombreux ; le rayon varie entre 10 et 20 km.

Au stade actuel du développement de la téléphonie mobile en Belgique, bien qu'il subsiste encore certains « trous » dans la couverture radio, l'implantation de nouvelles antennes est motivée, d'une part, par la saturation de certains sites existants (à certaines heures de la journée) et, d'autre part, par le souhait de garantir la qualité des communications dans les bâtiments.

4. EFFETS DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES

Les effets des CEM sont habituellement classés en deux catégories :

- l'effet thermique qui produit une élévation de la température du corps ; il nécessite un champ relativement intense ;
- les effets athermiques qui, selon certains scientifiques, apparaîtraient à des niveaux de CEM nettement plus faibles que ceux produisant un échauffement.

Si le premier effet est bien connu depuis de nombreuses années, l'existence d'effets athermiques est loin de faire l'unanimité parmi les scientifiques.

4.1. Effet thermique

L'échauffement des tissus sous l'action des CEM (principalement au-dessus de quelques centaines de kHz) est bien connu et est utilisé, depuis longtemps, dans les fours à micro-ondes et dans certaines applications médicales. Le principe à la base de cet effet est illustré à la figure 5 ; il résulte de la forte teneur en eau de la plupart des tissus constituant le corps humain. La molécule d'eau étant de type polaire (l'atome d'oxygène constituant un pôle négatif et les deux atomes d'hydrogène deux pôles positifs), son orientation dépend de celle du champ électrique auquel elle est soumise. Lorsque le champ est nul, les molécules sont orientées de manière désordonnée. Inversement, lorsqu'un champ est présent, toutes les molécules s'orientent dans la même direction. Dans le cas d'un champ alternatif, son sens varie constamment et l'orientation des molécules tend à suivre celui du champ électrique, ce qui produit des frottements intermoléculaires, d'où une élévation de température.

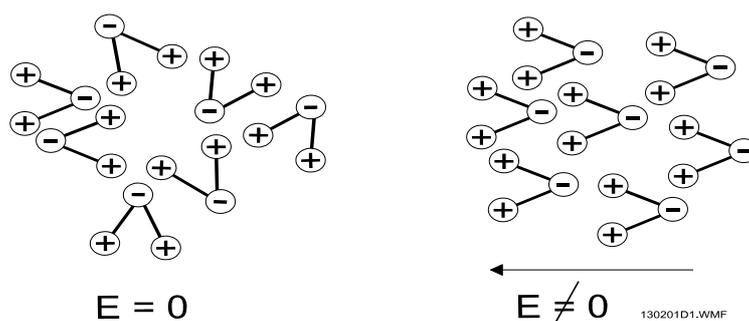


Figure 5 : Principe de l'effet thermique

Lorsqu'un organisme vivant est exposé à un CEM, on n'observe une élévation de température que pour des intensités relativement élevées, car l'apport de chaleur est neutralisé, jusqu'à une certaine limite, par le mécanisme de thermorégulation (circulation sanguine). Des données expérimentales (voir notamment [4]) indiquent que dans le cas d'une exposition totale d'un être humain (c'est-à-dire de la tête aux pieds), il faut absorber une puissance de 4 W/kg pour que la température augmente de 1°C. La durée d'exposition doit être suffisamment longue pour que l'augmentation soit stabilisée ; en pratique, on considère que c'est le cas après

6 minutes. Précisons qu'il s'agit d'une valeur moyenne correspondant à des personnes en bonne santé placées dans des conditions bien précises de température ambiante, de taux d'humidité et de ventilation³.

Le rapport (Puissance absorbée/Masse) s'exprime en W/kg et est appelé « Débit d'Absorption Spécifique » ; il est souvent désigné par l'abréviation SAR⁴ ; ce paramètre joue un rôle fondamental dans les normes ou recommandations basées sur l'effet thermique.

N.B. : *Un simple exemple permet d'appréhender la notion de SAR. Considérons une personne pesant 60 kg dont l'entièreté du corps est exposée à un CEM; le résultat mentionné ci-dessus implique qu'il faudra que cette personne absorbe une puissance de 240 W (60 kg x 4 W/kg) pour que sa température s'élève de 1°C (dans cet exemple, nous faisons l'hypothèse que l'absorption est uniforme dans tout le corps, ce qui n'est le cas en pratique). Le même raisonnement conduit à une puissance de 120 W pour une personne qui ne pèserait que 30 kg.*

Il faut ajouter que l'efficacité du mécanisme de thermorégulation (et donc la capacité qu'a un individu à supporter un apport de chaleur) peut être réduite, notamment chez les malades et les femmes enceintes ; elle peut également être influencée par la prise de certains médicaments et dépend des conditions ambiantes (température, humidité, ventilation, ...). Il en découle que le SAR de 4 W/kg (pour une élévation de température de 1°C) n'est qu'une valeur moyenne ; les variations autour de cette valeur sont néanmoins largement prises en compte dans les normes, comme nous le verrons au § 5.

Sans anticiper sur les conclusions qui seront exposées in fine, il est clair que les CEM générés par les antennes de téléphonie mobile sont insuffisants pour produire une élévation de température dépassant les normes, sauf si l'on se trouve à proximité immédiate d'une antenne émettant une puissance moyenne ou élevée.

4.2. Effets athermiques

Les effets athermiques des CEM sont étudiés depuis de nombreuses années ; on peut classer les études en trois catégories :

- les expérimentations réalisées sur des volontaires. Elles ont notamment permis d'étudier l'influence des CEM sur le temps de réaction, le sommeil et le profil de l'électroencéphalogramme. Pour des raisons pratiques évidentes, la durée de telles études est limitée et il n'est pas possible d'investiguer les éventuels effets d'une exposition chronique ;

³ Le résultat complet, tel que rapporté dans [4], est le suivant : une personne au repos, en bonne santé, portant des vêtements légers, se trouvant à une température ambiante comprise entre 20 et 22°, sous une humidité relative de 50 % et moyennant une ventilation adéquate, est capable d'absorber une puissance de 4 W/kg sans que sa température moyenne n'augmente de plus de 1°C.

⁴ SAR est l'abréviation de Specific Absorption Rate.

- les études épidémiologiques sur des populations exposées à des CEM. Il s'agit notamment de personnes vivant à proximité d'émetteurs puissants (radiodiffusion et télévision) ou de travailleurs exposés dans le cadre de leur activité professionnelle (techniciens radio, policiers, militaires, opérateurs radar, ...). Une des lacunes propres à de telles études est l'imprécision quant à l'intensité et à la durée réelle de l'exposition aux CEM, ces paramètres étant souvent estimés, a posteriori, sur base de données peu fiables. En outre, on ne peut exclure que certains résultats puissent être biaisés par des facteurs confondants (par exemple une autre source de pollution) ;
- les expérimentations sur des animaux ou des cultures de cellules. Dans ce cas, l'extrapolation des résultats à l'espèce humaine n'est pas toujours aisée, notamment du fait de la différence de taille, de constitution des cellules et de système immunitaire. De plus, vu la durée de vie limitée des animaux de laboratoire, certaines études sont menées à des niveaux d'exposition nettement plus élevés que ceux auxquels l'homme est normalement soumis (ceci dans le but d'accélérer les phénomènes) et qui dépassent largement les seuils où les effets thermiques apparaissent, et on ne peut donc plus parler d'effets athermiques.

Selon certains scientifiques, les effets athermiques résulteraient d'une interaction directe avec les tissus et auraient, entre autres, une influence sur le système nerveux. Sont souvent cités, des symptômes subjectifs, tels que : problèmes de concentration, irritabilité, troubles du sommeil, fatigue, ... Des expérimentations animales, ainsi que des études épidémiologiques menées chez des opérateurs radar, ont mis en évidence des effets sur l'œil, (dégénérescence tissulaire de la rétine, de la cornée et de l'iris). Plusieurs scientifiques font également état d'effets sur les systèmes de reproduction, cardio-vasculaire, immunitaire, hormonal, ainsi que sur le matériel génétique (ADN). Selon certaines études, de nombreux effets apparaîtraient pour des niveaux d'exposition nettement plus faibles que ceux produisant un échauffement significatif.

Il faut cependant mentionner que les recherches relatives aux effets athermiques conduisent souvent à des conclusions divergentes, non reproductibles, ou qui ne sont pas statistiquement significatives. De plus, il y a lieu de faire la distinction entre effet biologique et effet sanitaire. Selon le point de vue de diverses Instances Internationales sur le sujet, un effet biologique désigne un changement d'ordre physiologique, biochimique ou comportemental qui est induit dans un organisme, un tissu ou une cellule, en réponse à une stimulation extérieure. Tout effet biologique ne présente pas nécessairement une menace pour la santé, il peut simplement manifester la réponse normale de la cellule, du tissu ou de l'organisme à cette stimulation. Un effet sanitaire est un effet biologique qui peut mettre en danger le fonctionnement normal d'un organisme. La distinction est importante et peut être aisément perçue ; le fait d'entendre un son est un effet biologique (lequel résulte d'une chaîne complexe d'effets biologiques élémentaires : mécaniques, biochimiques et électriques) ; par contre, la perte de l'acuité auditive après une exposition prolongée à des bruits d'intensité élevée est un effet sanitaire grave.

Comme nous l'annonçons en début de paragraphe, l'existence des effets athermiques est une question très controversée ; certains scientifiques, invoquant le principe de précaution, plaident pour l'adoption de normes d'exposition plus restrictives. A l'opposé, les Instances Officielles, comme l'ICNIRP ou l'OMS, affirment qu'il n'y a, actuellement et au vu des résultats des études déjà réalisées, aucune base scientifique solide pouvant justifier une diminution des plafonds d'exposition.

5. NORMES ET RECOMMANDATIONS

Bien qu'il n'y ait aucune norme internationale réglementant l'exposition aux CEM, il existe cependant des recommandations, mais celles-ci n'ont pas force de loi. Plusieurs pays viennent néanmoins de légiférer récemment.

La plupart des recommandations internationales, basées sur l'effet thermique, sont fondées sur les travaux de l'ICNIRP⁵ dont le texte le plus récent a été publié en 1998 ([4]). Dans la gamme des radiofréquences, la Recommandation de l'ICNIRP s'appuie sur l'observation citée au § 4, à savoir qu'il faut, en moyenne, une puissance de 4 W/kg pour produire une élévation de température de 1°C. L'ICNIRP fixe une limite maximale de 0,08 W/kg (moyenne sur tout le corps durant une période quelconque de 6 minutes) dans le cas du public (exposition totale) ; cette limite est donc 50 fois plus faible que le SAR correspondant à une augmentation de température de 1°C.

Bien que le SAR constitue la grandeur la plus pertinente pour quantifier la dose de rayonnement effectivement absorbée, sa mesure ne peut être réalisée que de manière invasive et n'est donc pas possible sur un organisme vivant. Il existe toutefois une relation entre le SAR et l'intensité du CEM, exprimée par la valeur du champ électrique (en V/m) qui est une grandeur plus facilement mesurable. Notons encore que la relation qui relie le SAR et l'intensité du CEM dépend de la fréquence. A titre d'exemple, dans les bandes de 400, 900 et 1800 MHz, un SAR de 0,08 W/kg correspond⁶ respectivement à un champ de 28, 41,2 et 58 V/m.

Le tableau 3 présente une synthèse des principales normes ou recommandations applicables dans le cas d'une exposition totale et continue. Selon la Recommandation de l'ICNIRP, ainsi que pour les normes qui en découlent, l'exposition est considérée comme continue dès que sa durée excède 6 minutes. En outre, ajoutons que des maxima plus élevés sont admis lorsque l'exposition n'est que partielle ; la limite est de 2 W/kg dans le cas de la tête (applicable aux téléphones portables).

⁵ International Committee for Non Ionising Radiation Protection.

⁶ En fait, les niveaux de champs cités (28, 41,2 et 58 V/m) garantissent que le SAR de 0,08 W/kg ne sera pas dépassé ; cette relation inclut donc, implicitement, une certaine marge de sécurité.

Pour d'autres valeurs de champs, la relation suivante permet d'évaluer le SAR :

$$\text{SAR} = 0,08 \times \left(\frac{E}{E_{\text{ref}}}\right)^2 \quad \text{où } E_{\text{ref}} \text{ vaut } 28 \text{ entre } 10 \text{ et } 400 \text{ MHz, } 41,2 \text{ à } 900 \text{ MHz et } 58 \text{ à } 1800 \text{ MHz}$$

La Recommandation de l'ICNIRP a fourni la base scientifique pour l'établissement de plusieurs normes nationales (Allemagne, France, Espagne, Portugal, Pays-Bas, ...) ainsi que pour la Recommandation du Conseil de l'Union Européenne (1999) ; elle est également appuyée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

Tableau 3
Normes ou Recommandations applicables au public
(exposition totale et continue)

Normes ou Recommandations	SAR (W/kg)	Champ électrique (V/m)	Champ électrique (V/m)
	Limite globale		Par installation ou antenne
ICNIRP, OMS, Conseil de l'U.E. (1999) ⁷ , D, F (2002), NL, E (2001), P (2001), ...	0,08	* 28 de 10 à 400 MHz * 41,2 à 900 MHz * 58 à 1800 MHz	-
Suisse (1999)	0,08		4 à 900 MHz 6 à 1800 MHz 5 si 900 et 1800 MHz
Belgique (A.R. des 29/04/01 et 21/12/01) 10 MHz → 10 GHz	0,02	* 13,7 de 10 à 400 MHz * 20,6 à 900 MHz * 29 à 1800 MHz	3,1 de 10 à 400 MHz 4,6 à 900 MHz 6,5 à 1800 MHz (SAR = 1 mW/kg)
Italie, Russie (1978)		6	
Grand-Duché de Luxembourg (2000)			3 par antenne de téléph. mob.
Région wallonne (juillet 2000 → mai 2001)		3 pour les antennes de téléph. mob.	
Ville de Paris (mars 2003)		2 (moy. sur 24 h) pour les ant. de téléph. mob.	
Canton de Salzbourg (Autriche, 1999)		0,6	

* limites applicables si le champ est contenu dans une seule bande de fréquences

Précisons bien qu'en ce qui concerne la Recommandation de l'ICNIRP (ainsi que pour les normes qui en découlent), les limites d'exposition, exprimées en V/m, ne sont applicables que dans les cas d'exposition à une seule bande de fréquences. Par exemple, la limite à 900 MHz n'est effectivement de 41,2 V/m que s'il n'y a aucune autre composante à une fréquence différente, ce qui devient rare puisque nous sommes de plus en plus souvent exposés, simultanément, à des champs provenant de sources diverses.

N.B. : Par exemple, dans le cas d'une exposition simultanée à des champs à 900 et 1800 MHz, il serait inexact d'affirmer que la Recommandation de l'ICNIRP est respectée si les composantes à 900 et 1800 MHz sont respectivement inférieures à 41,2 V/m et 58 V/m.

⁷ Des limites identiques avaient été fixées dans un projet de Directive Européenne (pr ENV 50166) qui fut d'application entre 1994 et 1999.

En fait, dans les cas d'exposition à un champ composé⁸, il faut cumuler les SAR de chaque composante, aux endroits où elles ont une valeur significative pour s'assurer que le SAR « global » respecte bien la limite de 0,08 W/kg ; une telle vérification peut s'avérer compliquée dans le cas d'une exposition à plusieurs antennes, surtout lorsque celles-ci n'émettent pas toutes en permanence (problème de la mesure) et si la zone à contrôler est étendue.

La Suisse a adopté, en 1999, une Ordonnance⁹ qui se fonde sur la Recommandation de l'ICNIRP en ce qui concerne la norme « globale », mais elle fixe des limites pour différents types d'installations (dans le cas de la téléphonie mobile, une installation est définie comme étant l'ensemble des antennes se trouvant à proximité les unes des autres, par exemple, sur un même bâtiment) ; la limite d'installation est de 4 V/m si elle émet exclusivement dans la bande de fréquences GSM 900, de 6 V/m si elle émet exclusivement dans la bande de fréquences GSM 1800 et de 5 V/m pour les installations émettant à la fois dans les deux bandes. La limite d'installation pour les émetteurs de radiodiffusion, de télévision ou pour les autres applications de radiocommunication est de 3 V/m. Précisons qu'il s'agit bien de limites par installation ; l'exposition réelle est supérieure lorsqu'il y a recouvrement des champs provenant d'installations utilisées par des applications différentes.

N.B. : *L'imposition d'une norme limitant les émissions d'une source, considérée isolément, facilite le contrôle par l'Autorité compétente. Au contraire, une norme globale est beaucoup plus difficile à faire respecter dans les cas d'une exposition à plusieurs sources appartenant à des exploitants différents, car lorsqu'un dépassement est constaté, il est très difficile, voire impossible, d'établir les responsabilités.*

Bien que des Organismes Internationaux, comme l'ICNIRP ou l'OMS, affirment qu'il n'y a, actuellement et au vu des résultats des études déjà réalisées, aucune base scientifique solide pouvant justifier un abaissement des plafonds d'exposition, certains pays ont adopté des normes plus sévères au nom du principe de précaution.

En Belgique, le Gouvernement fédéral a adopté, par les A.R. des 29/04/01 et 21/12/01, une norme d'exposition dans la gamme des fréquences comprise entre 10 MHz et 10 GHz. La norme belge introduit un facteur de réduction de 4 par rapport à la Recommandation de l'ICNIRP ; cette norme fixe une limite de 0,02 W/kg pour le SAR global dans les zones accessibles au public, ce qui équivaut aux intensités de champs reprises dans le tableau 4 (2^{ème} colonne) et dans lequel f désigne la fréquence exprimée en MHz; comme pour la Recommandation de l'ICNIRP, ces limites ne sont applicables que pour une exposition à une seule bande de fréquences. Pour les champs composés, c'est-à-dire lorsqu'ils comportent plusieurs composantes de fréquence différente, il y a lieu de cumuler les SAR de chacune des composantes et de vérifier si le total est inférieur à 0,02 W/kg.

⁸ On appelle « champ composé » un CEM comportant plusieurs composantes de fréquence différente.

⁹ Ordonnance sur la Protection contre le Rayonnement Non Ionisant.

L'A.R. du 21/12/01 autorise toutefois l'exploitant à déroger à cette règle lorsque chaque antenne, considérée isolément, ne produit pas, dans la zone accessible au public, un SAR propre dépassant 1 mW/kg (c'est-à-dire un vingtième de la norme imposée pour le SAR global). Il peut être garanti que le SAR est inférieur à 1 mW/kg si l'intensité du CEM est inférieure aux seuils de référence repris dans le tableau 4 (3^{ème} colonne). Par exemple, un SAR de 1 mW/kg correspond à une intensité de 3,1 V/m entre 10 et 400 MHz, de 4,6 V/m à 900 MHz et de 6,5 V/m à 1800 MHz.

Tableau 4
Norme belge - Seuils de référence
garantissant un SAR inférieur à 20 mW/kg et 1 mW/kg
(f : fréquence en MHz)

Fréquences	Champ pour un SAR ≤ 20 mW/kg (E en V/m)	Champ pour un SAR ≤ 1 mW/kg (E en V/m)
10 MHz à 400 MHz	13,7	3,1
400 MHz à 2 GHz	0,686 √f	0,153 √f
2 GHz à 10 GHz	30,7	6,9

La norme russe impose, pour les fréquences comprises entre 300 MHz et 300 GHz, une limite égale à 6 V/m. La même limite a également été adoptée par l'Italie bien que certaines limites plus restrictives soient parfois appliquées localement.

Le Grand-Duché de Luxembourg a adopté, en 2000, une réglementation applicable aux seules antennes de radiocommunication mobile, qui impose un champ maximum de 3 V/m par antenne.

Certains scientifiques, ou associations, ont également rédigé des recommandations. En Belgique, le Professeur VANDER VORST et le Dr STOCKBROECKX (Université Catholique de Louvain), ainsi que le Professeur GERIN (Faculté Polytechnique de Mons), avaient proposé, en 1999, de limiter le champ électrique à 3 V/m. Les auteurs (voir [3] page 41) justifiaient ce choix par le fait qu'il n'existait pas, ou peu, d'effets recensés dans la littérature pour un tel niveau d'exposition. Cette recommandation avait servi de base à une réglementation adoptée par la Région wallonne et qui fut d'application entre juillet 2000 et mai 2001 ; cette réglementation a ensuite été supplantée par la norme belge.

Bien qu'en 2002, la France ait adopté une norme identique à la Recommandation de l'ICNIRP, la Ville de Paris a conclu avec les opérateurs de téléphonie mobile, en mars 2003, une « Charte de bonne conduite » visant à limiter à 2 V/m « équivalent 900 MHz¹⁰ » le niveau moyen sur 24 heures dans les lieux « normalement accessibles au public » ; ce niveau moyen est déduit en multipliant par 0,432 le niveau de champ théorique maximal généré lorsque l'installation émet au maximum de sa capacité ; ce coefficient de 0,432 permet de tenir compte des variations de la puissance rayonnée, laquelle dépend du nombre de communications en cours dans la zone de couverture de l'antenne. La Charte de bonne conduite de la Ville de Paris n'est applicable qu'aux seules antennes de téléphonie mobile.

A notre connaissance, la réglementation la plus restrictive est appliquée dans le Canton de Salzborg qui fixe une limite de 0,6 V/m ; elle repose sur la recommandation défendue par certains scientifiques, dont les plus connus sont le Dr Neil CHERRY, Directeur de l'Unité de Recherche en Climatologie de l'Université de Christchurch (Nouvelle-Zélande) et le Dr Roger SANTINI de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (Laboratoire de Biochimie-Pharmacologie) qui préconisent de limiter l'exposition à 0,6 V/m (moyenne annuelle).

Ajoutons, pour clôturer ce paragraphe, que la comparaison entre réglementations ne doit pas se limiter aux seuls chiffres repris dans le tableau 3, mais doit également tenir compte de la méthode imposée, soit pour mesurer, soit pour calculer le champ. Par exemple, en Belgique, lorsqu'une installation fait l'objet d'une demande de permis d'urbanisme, l'exploitant est tenu de fournir les données techniques permettant de contrôler que l'installation respectera bien la norme d'exposition¹¹. Ce contrôle ne peut évidemment être réalisé que par calcul au moyen de modèles mathématiques (l'installation n'existant pas, il n'est pas possible d'effectuer une mesure). A ce stade, il est rarement possible, pour des raisons pratiques, de tenir compte de l'absorption du rayonnement par les obstacles que constituent les murs et le toit. En fait, l'atténuation dépend de nombreux paramètres (fréquence, nature du matériau, épaisseur, angle d'incidence de l'onde, ...); lorsque la norme fixe des valeurs d'atténuation standards, elles sont souvent sous-estimées. Il en découle que les valeurs réelles du champ, à l'intérieur des bâtiments, sont généralement inférieures aux valeurs calculées, ce qui va bien évidemment dans le sens de la sécurité. Il résulte de cette remarque que deux normes fixant une même limite (exprimée en V/m) peuvent souvent correspondre à des niveaux effectifs assez différents du fait de certaines règles particulières qu'imposent les méthodes de calcul ou de mesure.

¹⁰ Dans la bande 1800 MHz, le champ est multiplié par le rapport 41/58 pour obtenir son équivalent à 900 MHz.

¹¹ Ces données sont reprises dans un document, établi par l'IBPT, intitulé « Dossier technique d'antenne ».

6. CHAMPS MESURES A PROXIMITE D'ANTENNES-RELAIS

L'ISSeP réalise régulièrement, notamment à la demande des Pouvoirs Publics, des mesures de champ à proximité d'antennes. Les résultats présentés ci-après¹² sont représentatifs et correspondent à des cas typiques (implantation sur pylônes, châteaux d'eau, sur le toit ou les façades de bâtiments, ...). De manière à éviter toute suspicion quant à la puissance émise lors du contrôle, les mesures sont toujours effectuées à l'insu de l'exploitant des antennes sauf, bien évidemment, lorsqu'elles sont faites à sa demande.

Il est important de préciser que la puissance rayonnée par une antenne GSM dépend du nombre de communications en cours dans la cellule; ce nombre est relativement faible pendant les périodes creuses et presque nul pendant la nuit. A titre indicatif, une antenne rayonnant 6 fréquences d'une puissance de 10 W émettra une puissance totale pouvant varier entre 10 et 60 W, suivant le nombre de conversations en cours¹³; en fait, une fréquence sera présente en permanence, même en l'absence de communications; celle-ci est notamment utilisée pour la transmission d'un canal de contrôle¹⁴.

Les autres fréquences¹⁵ ne sont émises que lorsque le nombre de communications simultanées augmente. Les résultats ou conclusions, présentés ci-après, se rapportent toujours au cas où l'antenne est utilisée à sa pleine capacité (ce qui correspondrait à une puissance totale de 60 W, dans notre exemple). Par conséquent, l'exposition moyenne sur une durée de 24 heures sera forcément inférieure; l'extrapolation des résultats à d'autres puissances peut se faire par calcul, le champ étant proportionnel à la racine carrée de la puissance émise¹⁶.

¹² La plupart avaient déjà été publiés dans [1] et [2].

¹³ Pour être complet, précisons que la station de base adapte la puissance qu'elle émet vers un téléphone portable aux conditions de propagation. Lorsque la liaison s'effectue dans de bonnes conditions, la puissance émise sera faible; inversement, elle sera maximale si ces conditions sont mauvaises. La puissance émise par l'antenne-relais est donc adaptée durant chaque « time slot ». Un mécanisme similaire existe pour le portable (§7.1)

¹⁴ Pour fonctionner, un réseau GSM (ou DCS 1800) utilise un canal de contrôle par cellule, appelé BCCH ("Broadcast Control Channel"); il s'agit d'un "time slot" d'une fréquence qui diffuse en permanence diverses informations. Celles-ci comprennent, notamment, le code d'identification de l'opérateur et le numéro de la cellule, ce qui permet aux portables de se localiser. Le BCCH transmet aussi le numéro des portables que le réseau est occupé à appeler.

¹⁵ Une antenne-relais émet, en général, dans la bande de fréquences du GSM 900, un nombre de fréquences compris entre 2 et 6; l'émission de plus de 6 fréquences dans cette bande pose des problèmes d'ordre technique. Lorsque le besoin en capacité l'exige, les opérateurs utilisent conjointement des fréquences dans les bandes GSM 900 et DCS 1800 (installation « dual band »).

¹⁶ Cela signifie qu'il faut multiplier la puissance par 4 pour doubler le champ.

Nous traiterons tout d'abord le cas des antennes dites « panneau » ; c'est le modèle le plus couramment utilisé pour la couverture des macro-cellules (les antennes omnidirectionnelles ne sont plus guère employées excepté pour le réseau ASTRID).

Le § 6.3. traite le cas des antennes de types micro-cellules et pico-cellules.

6.1. Champ dans le faisceau d'une antenne panneau

Des champs supérieurs à quelques V/m ne sont observés que dans le faisceau de l'antenne (dont la figure 6 représente une coupe verticale). En pratique, l'essentiel du rayonnement est concentré dans un angle généralement compris entre 6 et 10°. Notons qu'il existe également des antennes présentant un angle d'ouverture verticale plus large, mais celles-ci deviennent rares. Dans le plan horizontal, et dans le cas des antennes directives, le faisceau couvre, selon le type, un angle de 120 à 180°.

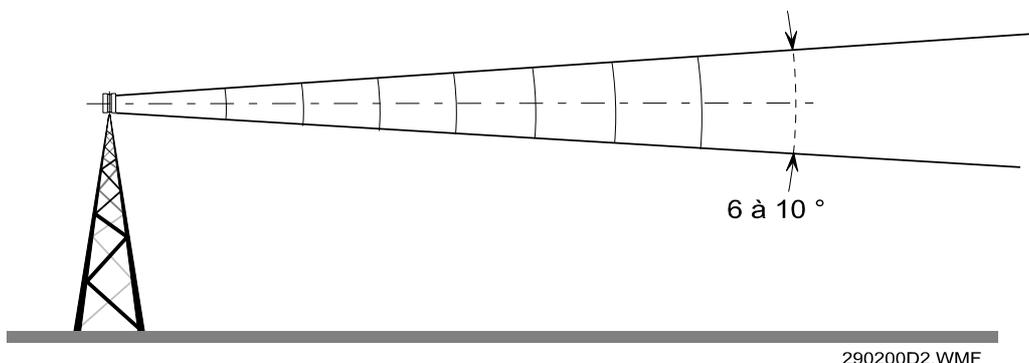


Figure 6 : Coupe verticale du faisceau d'une antenne

La figure 7 donne, à titre indicatif, l'intensité du champ mesurée à proximité d'un château d'eau sur lequel sont installées, à 24 m de hauteur, trois antennes couvrant chacune un secteur de 120° ; cette courbe représente le champ, mesuré à 3 m du sol, le long d'un parcours rectiligne d'une longueur de 550 m et dont le point de départ (abscisse 0 m) se trouve au pied du château d'eau ; ce parcours est situé au milieu d'un des secteurs de 120° (c'est-à-dire là où le champ est le plus élevé) et se trouve en vue directe des antennes. La courbe de la figure 7 correspond au champ cumulé lorsque les trois antennes émettent à leur puissance maximale, ici de 8 W pour chacune.

La figure 7 montre que le champ est très faible au pied du château d'eau et augmente lorsqu'on s'en éloigne ; le maximum est de l'ordre de 0,4 à 0,6 V/m entre 120 et 280 m ; ces valeurs sont très faibles en comparaison avec les limites reprises dans le tableau 3 ; elles sont même inférieures, ou égales, à la plus restrictive. Ajoutons également que la zone où le champ dépasse 0,4 V/m ne comporte qu'un petit nombre de points et qu'il est évident que l'exposition moyenne à laquelle serait soumise une personne se trouvant à cet endroit est inférieure aux maxima qui n'existent que ponctuellement.

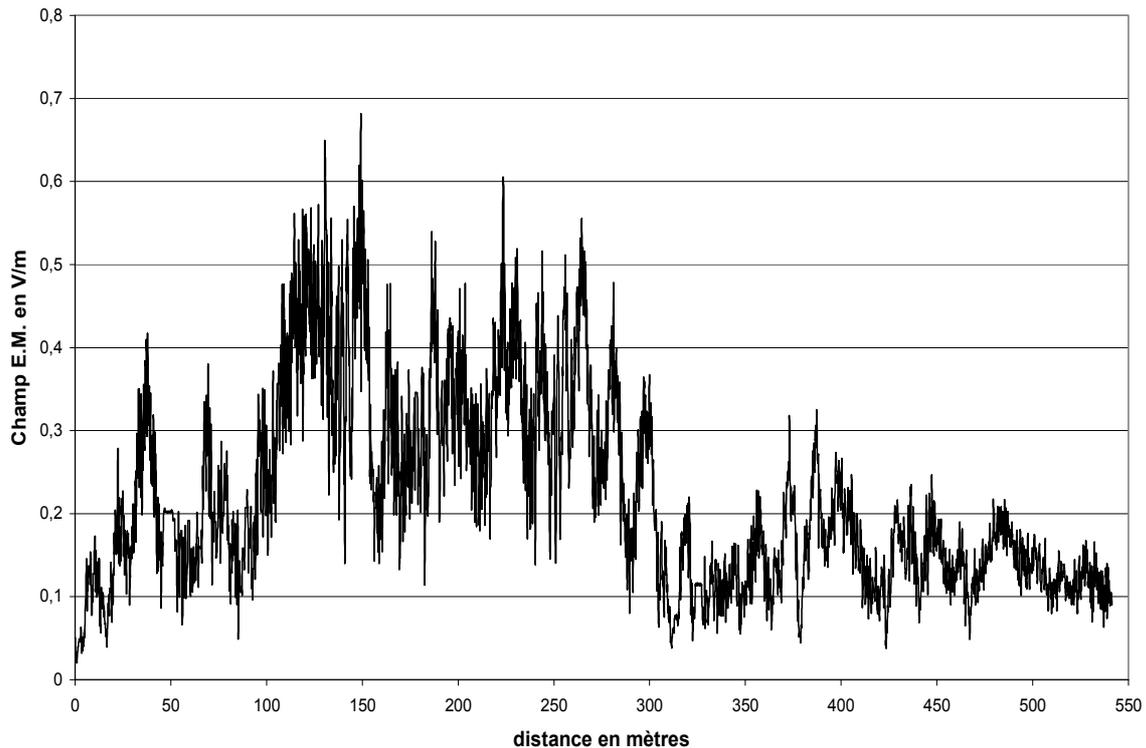
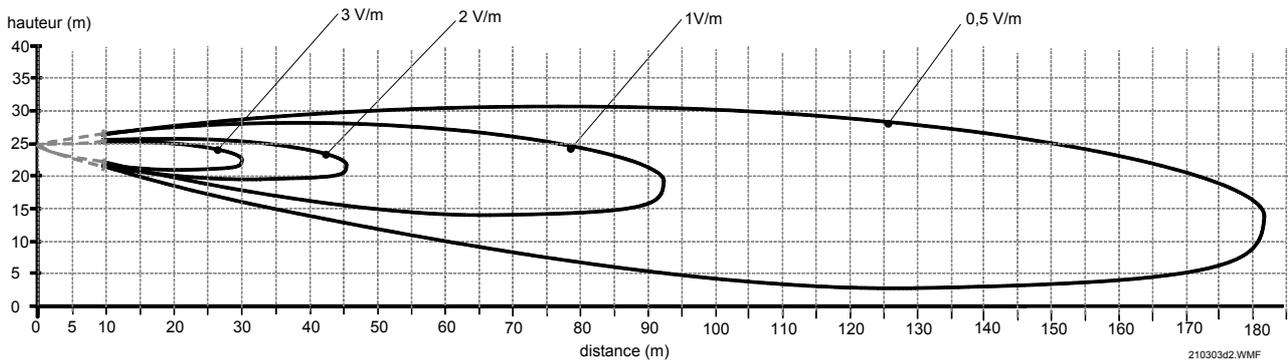


Figure 7 : Enregistrement du champ (en V/m), à 3 m du sol, le long d'un parcours de 550 m (1^{er} opérateur)

Le résultat de la figure 7 s'explique aisément si l'on prend en compte les caractéristiques exactes du faisceau de l'antenne et, plus particulièrement, son diagramme de rayonnement. La figure 8 représente les différents niveaux d'intensité du champ dans un plan vertical et dans la direction où le rayonnement est maximum ; cette figure a été déterminée par calcul en tenant compte des caractéristiques de l'antenne (puissance totale de 8 W, gain¹⁷ de 35, faisceau incliné de 4° par rapport à l'horizontale) ; elle comporte 4 contours (appelés « courbes d'iso-valeur ») correspondant à des intensités de 3, 2, 1, et 0,5 V/m. On constate que le champ est inférieur à 3 V/m au-delà d'une distance de 30 m et en dessous d'une hauteur de 21 m. De même, le niveau de 0,5 V/m se situe à environ 2 m du sol. Cet exemple illustre l'importance de la hauteur de l'antenne, de la forme du faisceau et de son inclinaison. Nous reviendrons sur l'importance de ces différents paramètres dans nos conclusions.

Notons toutefois que les calculs sont peu fiables dans la zone située à quelques mètres devant l'antenne ; la partie en pointillés des courbes d'iso-valeur de la figure 8 est située dans cette zone ; cet aspect a fait l'objet de mesures spécifiques et est abordé au § 7.2.

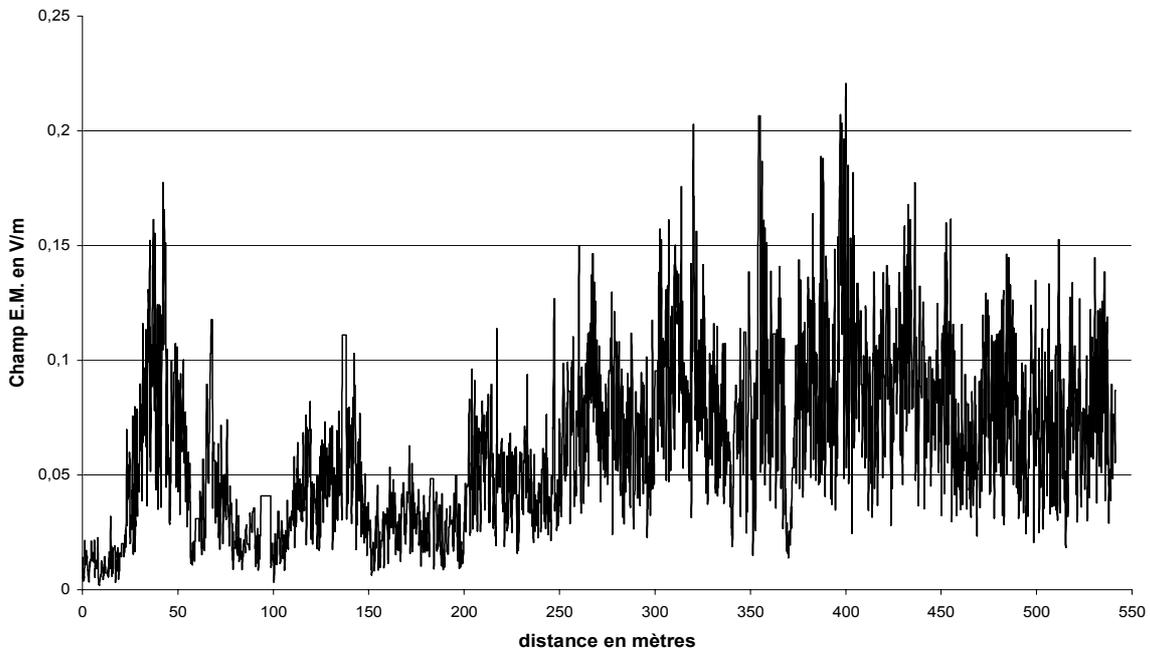
¹⁷ Le gain de l'antenne est de 15,5 dBi.



**Figure 8 : Courbes d'iso-valeur pour 3, 2, 1 et 0,5 V/m
(puissance totale = 8 W - gain = 35 - angle d'inclinaison du faisceau = 4°)**

Ajoutons qu'à l'intérieur des bâtiments, les murs atténuent considérablement le rayonnement (le champ est réduit d'un facteur variant de 2,5 à 5, voire davantage selon le type de murs et la fréquence¹⁸). Par conséquent, aux étages inférieurs des maisons, le CEM est nettement plus faible que ce qu'indique la figure 7.

La figure 9 représente le résultat de la mesure du champ produit par les 3 antennes d'un second opérateur installées sur le même château d'eau. Le trajet de mesure est le même que celui de la figure 7 ; la valeur maximale atteinte pour ces antennes est ici de 0,2 V/m. On notera que les maxima des CEM générés par les deux opérateurs ne se produisent pas aux mêmes endroits ; ceci s'explique par le fait que le faisceau des antennes du premier opérateur est légèrement incliné, alors que celui des antennes du second est horizontal.



¹⁸ La densité de puissance (proportionnelle au carré du champ) est réduite d'un facteur variant entre 6,25 et 25.



Institut Scientifique de Service Public

Figure 9 : Enregistrement du champ (en V/m), à 3 m du sol, le long d'un parcours de 550 m (2^{ème} opérateur)

N.B. : Les mesures correspondant aux figures 7 et 9 ont été réalisées en automne 1999. Depuis lors, le nombre d'abonnés à la téléphonie mobile a considérablement augmenté. Il est donc très probable que les champs que l'on mesurerait aujourd'hui seraient plus élevés. Un doublement de la puissance émise (hypothèse réaliste) impliquerait une augmentation de 41 % du champ¹⁹.

6.2. Champ derrière, en dessous et au-dessus d'une antenne panneau

Le champ mesuré à une distance de 2 m derrière une antenne est presque toujours inférieur, voire très inférieur, à 3 V/m. En dessous et au-dessus de l'antenne, le champ est également inférieur à 3 V/m à une distance de 4 ou 5 m, même s'il n'y a aucun obstacle entre l'antenne et le point de mesure, ceci est dû au fait que le rayonnement en dehors du faisceau est faible.

Lorsqu'une antenne est installée sur le toit d'un bâtiment, les champs mesurés aux étages inférieurs sont minimales ; ils peuvent même être considérés comme négligeables lorsque le toit est constitué d'une dalle en béton armé. Ce résultat a été confirmé par les nombreuses mesures que l'ISSeP a été amené à effectuer dans des situations de ce type. A titre d'exemple, des mesures réalisées au dernier étage d'un immeuble au-dessus duquel 18 antennes étaient installées ont montré que le champ maximum était toujours inférieur à 0,1 V/m, même lorsque les 18 antennes émettaient au maximum de leur puissance. A titre de comparaison, un champ de 0,1 V/m est du même ordre de grandeur que celui que génèrent ces installations à environ 3 km du site dans l'axe du faisceau²⁰ ; ceci est une conséquence de la directivité des antennes et de la protection qu'apporte le toit en béton armé.

Dans le cas où des antennes sont installées le long des façades d'un bâtiment, les murs atténuent fortement le champ et apportent une protection efficace. Il faut néanmoins veiller à ce que le faisceau ne soit pas dirigé vers des fenêtres, ou des terrasses, trop proches des antennes.

6.3. Antennes utilisées dans les micro-cellules et pico-cellules

Les antennes des micro-cellules rayonnent une puissance relativement faible (généralement moins de 1 ou 2 W) et ont un gain peu élevé ; elles consistent souvent en un simple dipôle demi-onde placé en façade d'un bâtiment. Comme de telles antennes ne doivent couvrir qu'une zone restreinte, elles sont, en général, placées à une hauteur de seulement quelques mètres. De plus, étant peu directives (contrairement aux antennes panneaux), ces antennes peuvent générer, à un niveau proche du sol, un champ qui dépasse largement celui produit par des antennes panneaux qui cependant, rayonnent une puissance bien plus élevée ; ce résultat, qui semble paradoxal au premier abord, s'explique par le fait que les antennes utilisées dans les micro-cellules sont placées à une hauteur peu élevée et ont une faible directivité.

¹⁹ Le champ est proportionnel à la racine carrée du champ et $\sqrt{2} = 1,41$

²⁰ Ce calcul a été établi en tenant compte de la puissance totale des installations.

Les antennes des pico-cellules rayonnent une puissance de l'ordre de quelques centaines de mW et ont un faible gain ; elles sont employées pour couvrir l'intérieur de grands bâtiments (plusieurs antennes de ce type sont souvent nécessaires) et sont placées au plafond ou contre un mur (certaines ont l'apparence d'un détecteur d'incendie). De telles antennes émettent un rayonnement comparable à celui produit par un téléphone portable GSM (le modèle 2 W émet en fait une puissance moyenne maximale de 250 mW). Le niveau d'exposition d'une personne se trouvant à proximité dépend donc de la distance qui la sépare de l'antenne. Par exemple, à 5 m d'une antenne émettant une puissance de 200 mW, le champ peut atteindre 0,5 V/m s'il n'y a pas d'obstacle.

7. COMPARAISON AVEC D'AUTRES SOURCES DE CHAMPS

Nous donnons, dans ce paragraphe, quelques indications concernant l'intensité des CEM produits par d'autres sources ; ces indications apportent les éléments de comparaison permettant de « resituer » les niveaux d'intensité rencontrés à proximité d'antennes-relais de téléphonie mobile.

7.1. Portable GSM

Le modèle de téléphone portable le plus répandu est capable d'émettre une puissance crête variant entre 20 mW et 2 W, selon les conditions de propagation²¹. Le portable n'émettant que pendant un huitième du temps²², la puissance moyenne émise varie donc entre 2,5 mW et 250 mW.

Des calculs, confirmés par des mesures, montrent qu'il existe, au niveau de la tête de l'utilisateur du portable, un champ moyen (RMS²³) compris entre :

- 5 et 10 V/m lorsque la puissance crête est de 20 mW ;
- 50 à 100 V/m lorsque la puissance crête est de 2 W ;

la valeur exacte étant notamment fonction de la distance entre la tête et le portable, ainsi que des caractéristiques de son antenne.

²¹ Le portable GSM adapte automatiquement sa puissance au minimum permettant une communication de qualité. Par conséquent, un portable proche d'une antenne-relais émettra une puissance crête dans le bas de la plage 20 mW – 2 W. Inversement, un portable très éloigné d'une antenne-relais, ou placé dans de mauvaises conditions (en sous-sol d'un bâtiment ou à l'intérieur d'une voiture sans antenne extérieure, la voiture se comportant dans ce cas comme une cage de Faraday), émettra une puissance crête de 2 W.

²² Le portable émet pendant un « time slot » de 577 µs toutes les 4,615 ms.

²³ L'abréviation RMS correspond à l'intensité du champ en valeur efficace.

Par un calcul élémentaire²⁴, on peut démontrer que l'utilisation, pendant 15 secondes par jour, d'un portable GSM émettant une puissance crête de 2 W produit un SAR moyen du même ordre qu'une exposition permanente à un champ de 0,6 V/m ; ce niveau doit être comparé aux résultats de mesures présentés au § 6.

Signalons également que, contrairement aux apparences, ce n'est pas parce qu'un téléphone portable GSM génère un champ supérieur à 41,2 V/m qu'il n'est pas conforme à la Recommandation de l'ICNIRP ; en effet, selon cette Recommandation, il s'agit ici d'une exposition partielle (de la tête en l'occurrence) et la limite à prendre en considération est un SAR de 2 W/kg (§ 5) et non un champ de 41,2 V/m applicable lorsque l'exposition est totale.

Sachant qu'un portable GSM produit, au niveau de la tête, un champ comparable à celui fixé par la Recommandation de l'ICNIRP (41,2 V/m à 900 MHz lorsque l'exposition est totale et continue), il est permis de s'étonner de l'attitude de certains Etats qui, d'une part, recommandent de faire un usage modéré du téléphone portable en raison des incertitudes liées à une technologie récente pour laquelle on ne dispose pas du recul suffisant pour évaluer les éventuels effets à long terme et qui, d'autre part adoptent la Recommandation de l'ICNIRP comme norme d'exposition, ce qui revient à autoriser qu'une antenne, quel qu'en soit le type, puisse soumettre les riverains, 24 heures sur 24, à un champ de 41,2 V/m (à 900 MHz). Une telle position se révèle incohérente puisque l'emploi du téléphone portable n'est forcément pas permanent (de plus, c'est délibérément que l'utilisateur accepte de courir un risque éventuel), alors que l'exposition aux CEM émis par une antenne peut être continue et que les riverains n'ont souvent pas d'autres choix que de la subir.

Notons toutefois que cette remarque est purement de principe, car il est probable qu'il n'existe guère de zones accessibles au public qui soient exposées en permanence à des niveaux comparables à la limite de la Recommandation de l'ICNIRP.

²⁴ Un champ moyen de 50 V/m (RMS) émis par un portable GSM durant 15 secondes de conversation par jour produit un SAR moyen sur 24 heures donné par :

$$SAR_{\text{moyen}} = 0,08 \times (50/41,2)^2 \times \frac{15}{24 \times 3600} = 2 \times 10^{-5} \text{ W/kg}$$

Une exposition permanente à 0,6 V/m produit un SAR donné par :

$$SAR_{\text{moyen}} = 0,08 \times (0,6/41,2)^2 = 1,7 \times 10^{-5} \text{ W/kg}$$

Signalons toutefois que le fait d'avoir des SAR comparables dans ces deux situations ne signifie pas que les éventuels effets biologiques (ou sanitaires) soient les mêmes puisque, dans un cas, l'exposition est intense, mais de courte durée, dans le second cas elle est chronique, mais de faible intensité.

7.2. Téléphone sans fil

Le téléphone sans fil est l'appareil qui comporte une station de base reliée à la prise du téléphone et un combiné utilisable dans un rayon généralement compris entre 100 et 300 m. Les modèles les plus répandus répondent aux normes CT2 et DECT ; ils émettent, respectivement, dans des bandes de fréquences proches de 900 et 1900 MHz. Le coût d'une communication avec un tel appareil étant celui d'une ligne fixe, la durée d'utilisation peut parfois être très longue.

Le téléphone sans fil émet une puissance moyenne de 10 mW, avec une émission pulsée d'un type assez voisin de celle d'un portable GSM. Des calculs identiques à ceux effectués pour le portable GSM montrent qu'il existe, au niveau de la tête, un champ moyen (RMS) compris entre 10 et 20 V/m.

7.3. Emetteurs de forte puissance

Il existe, parfois depuis plusieurs dizaines d'années, de nombreux émetteurs de radiodiffusion et de télévision, des émetteurs militaires, des radars (civils ou militaires) qui rayonnent des puissances bien plus élevées que celles émises par des antennes des réseaux de radiocommunication mobile.

Concrètement, une antenne-relais GSM émet une « Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente » (égale au produit de la puissance injectée à l'antenne par le gain dans la direction du maximum de rayonnement et qui est représentée par le symbole « PIRE ») comprise entre 300 W pour les plus faibles et 3500 W pour les plus puissantes ; les valeurs les plus fréquentes sont inférieures à 1000 W.

A titre d'exemple, certaines radios privées (appelées « radios libres » dans le langage courant), rayonnent une PIRE comprise entre plusieurs centaines et plusieurs milliers de W dans la bande de fréquences comprise entre 88 et 108 MHz. Les émetteurs de diffusion nationaux émettent des puissances encore plus élevées. Bien que les antennes de ces émetteurs soient souvent placées sur des pylônes très élevés, elles sont moins directives (dans le plan vertical) et le champ qu'elles produisent au sol peut être supérieur à celui que produisent la plupart des antennes-relais GSM.

Enfin, signalons qu'en Belgique, comme dans tous les autres pays, plusieurs émetteurs de télévision rayonnent une PIRE comprise entre 500 et 1000 kW dans une bande de fréquences qui varie de quelques dizaines à plusieurs centaines de MHz. De tels émetteurs rayonnent chacun l'équivalent de 500 à 1000 antennes-relais GSM. L'intensité du CEM au sol reste relativement basse (grâce à la hauteur des pylônes), mais elle dépasse néanmoins les niveaux rencontrés à proximité des antennes-relais de téléphonie.

Le cas de la Tour Eiffel est sans doute un cas qui mérite d'être cité, car connu de tous. Selon [6], la puissance de l'ensemble des émetteurs de télévision et de radiodiffusion FM installés est d'environ 300 kW. Compte tenu des caractéristiques habituelles pour ce type d'antennes, la PIRE devrait être de l'ordre de 5000 kW. On

peut donc considérer que les émetteurs de la Tour Eiffel rayonnent l'équivalent de 5000 antennes-relais de capacité moyenne.

Force est de constater que les antennes-relais de téléphonie suscitent, au sein de la population, bien plus de craintes que les émetteurs de radiodiffusion ou de télévision dont certains existent depuis plus de quarante ans ; une telle différence de comportement peut certainement être qualifiée d'irrationnelle. La différence de fréquences, souvent citée, n'est pas un argument pertinent. En effet, la bande de fréquences la « mieux absorbée » par le corps humain est celle comprise entre 10 et 400 MHz. Au-dessus de 400 MHz, le rayonnement pénètre moins en profondeur, l'essentiel de l'énergie étant absorbé par les tissus superficiels (peau, graisse, boîte crânienne) ; c'est d'ailleurs pour cette raison que les normes sont les plus restrictives entre 10 et 400 MHz (voir tableau 3). Pour une même densité de puissance incidente, les organes internes (cerveau, cœur, foie, ...) sont moins irradiés à 900 MHz qu'ils ne le sont, par exemple, à 100 MHz. Rappelons enfin (voir tableau 1) que le haut de la bande de fréquences allouée aux émetteurs de télévision (840 MHz) est très proche de celle du réseau GSM 900.

Un autre argument souvent avancé concerne le caractère pulsé des ondes émises par les antennes-relais de téléphonie mobile étant donné que l'amplitude de ces signaux est modulée en très basse fréquence (à 0,16 - 4,2 - 216,7 et 1733,1 Hz). Tout d'abord, il s'agit d'une hypothèse qui, à notre connaissance, n'a pas été démontrée. En fait, pour que des tissus biologiques soient sensibles aux modulations de basses fréquences, il faudrait qu'ils aient un comportement non linéaire, ce qui ne semble pas être le cas aux fréquences utilisées en téléphonie mobile (voir [6], page 16). En outre, il convient de préciser que le champ rayonné par un émetteur de télévision doit également être considéré comme pulsé en raison des impulsions de synchronisation des images, des trames et des lignes dont la périodicité est respectivement de 25, 50 et 15.625 Hz.

En conclusion, il n'y a, dans l'état actuel des connaissances, aucun argument scientifiquement fondé qui justifie que les ondes rayonnées par une antenne-relais soient considérées différemment de celles émises par les antennes des émetteurs de radiodiffusion ou de télévision.

8. QUESTIONS DIVERSES

Nous apportons, ci-dessous, des réponses à plusieurs questions qui nous sont fréquemment posées.

8.1. Pacemakers et implants actifs

Les implants actifs, tels que pacemakers, pompes régulatrices du liquide céphalo-rachidien, implants cochléaires, ... comportent des circuits électroniques ; de ce fait ils sont susceptibles d'être perturbés par des CEM intenses. Les implants les plus récents présentent une immunité aux CEM nettement améliorée par rapport aux modèles plus anciens. L'expérience montre que certains implants peuvent être

perturbés par les CEM générés par le téléphone portable, lorsque celui-ci se trouve à courte distance ; c'est ce qui justifie que l'on recommande aux personnes ayant un pacemaker de tenir le téléphone portable du côté droit. En ce qui concerne les antennes des réseaux de téléphonie mobile, les CEM rayonnés par ces antennes sont, dans les zones accessibles au public, trop faibles que pour perturber les implants actifs ; les riverains des antennes, qui sont porteurs de tels implants, ne courent donc aucun risque. Il n'en va pas de même lorsqu'on se trouve à proximité immédiate d'une antenne, et surtout face à celle-ci. Il est donc déconseillé aux porteurs d'implant actif de se trouver sur un toit à proximité d'antennes ou d'escalader un pylône.

8.2. Interdiction d'utiliser les téléphones portables dans les hôpitaux

Cette interdiction se justifie par le risque de perturber les appareils médicaux (de diagnostics, de monitorings, ...) ; elle n'est nullement motivée par des considérations liées à la santé.

8.3. Augmentation du nombre d'antennes due à la concurrence entre opérateurs

La fin du monopole d'Etat dans le secteur des télécommunications a permis l'arrivée de nouveaux opérateurs et, actuellement, il y a 3 ou 4 réseaux concurrents dans la plupart des pays européens. Certains considèrent que l'existence de plusieurs réseaux est en partie responsable de la multiplication des antennes et de l'augmentation de l'exposition du public aux CEM. C'est inexact car, à ce stade du développement des réseaux, c'est le nombre d'utilisateurs qui détermine le nombre d'antennes nécessaire et la puissance qu'elles rayonnent. A ce jour, la Belgique compte environ 8 millions d'utilisateurs de GSM pour une population de plus de 10 millions d'habitants. Le fait d'avoir ces 8 millions d'utilisateurs répartis sur trois réseaux ne nécessite pas beaucoup plus d'antennes que s'ils étaient tous clients d'un opérateur unique ; il en va pratiquement de même pour l'exposition aux CEM.

8.4. Confusion entre fréquence et puissance - Profondeur de pénétration

Comme exposé au § 2, la fréquence d'un signal périodique est égale au nombre de cycles par seconde ; elle est exprimée en Hertz (Hz) et par ses multiples (kHz, MHz, GHz, ...). La puissance rayonnée par une antenne est, quant à elle, exprimée en W ; c'est la quantité d'énergie émise pendant une seconde. Nombreux sont ceux qui confondent ces deux notions et considèrent, à tort, que plus la fréquence est élevée, plus les risques sont importants ; c'est totalement inexact, car le rayonnement pénètre d'autant moins que la fréquence augmente car la plus grande partie de l'énergie est absorbée par les tissus superficiels (peau, graisse, boîte crânienne) ; c'est d'ailleurs pour cette raison que les normes sont moins restrictives au-dessus de 400 MHz qu'elles ne le sont entre 10 et 400 MHz (voir tableau 3). Pour une même densité de puissance incidente, les organes internes (cerveau, cœur, foie, ...) sont donc moins irradiés à 900 MHz qu'ils ne le sont, par exemple, à 100 MHz.

L'affaiblissement d'une onde électromagnétique traversant un matériau dépend de plusieurs paramètres et est proportionnel à la racine carrée de la fréquence ; cet affaiblissement est caractérisé par la « profondeur de pénétration » ; c'est l'épaisseur à laquelle le champ est diminué d'un facteur 2,7 ; la densité de puissance, proportionnelle au carré du champ, est donc réduite d'un facteur 7,3.

Dans le cas du corps humain [3], la profondeur de pénétration d'une onde électromagnétique à 100 MHz est de 3 cm ; elle n'est plus que de 1 cm à 900 MHz et de 0,7 cm à 1800 MHz ; ces quelques données sont résumées dans le tableau 5. On peut également en déduire l'épaisseur de tissu au-delà de laquelle le champ est divisé par un facteur 10 et la densité de puissance par un facteur 100 ; cette distance est égale à 2,3 fois la profondeur de pénétration.

Il est à noter que l'augmentation de l'atténuation avec la fréquence se produit avec tous les matériaux ; que ce soit pour un mur ou pour un toit, elle sera toujours plus importante à 1800 MHz qu'elle ne l'est à 900 MHz ; c'est ce qui explique qu'il faille plus d'antennes pour couvrir un territoire avec un réseau DCS 1800 (1800 MHz) qu'avec un réseau GSM 900 (900 MHz).

Tableau 5

Profondeur de pénétration et épaisseur au-delà de laquelle le champ est réduit d'un facteur 10 et la densité de puissance réduite d'un facteur 100

	100 MHz	450 MHz	900 MHz	1800 MHz
Profondeur de pénétration	3 cm	1,5 cm	1 cm	0,7 cm
Profondeur à laquelle E est divisé par 10 et S est divisé par 100	7 cm	3,5 cm	2,3 cm	1,6 cm

8.5. Regroupement d'antennes de plusieurs opérateurs sur un même site

Etant donné que l'ajout d'antennes sur un pylône existant n'a qu'un faible impact visuel, il est préférable, du point de vue esthétique, de regrouper les antennes des différents exploitants sur un même site.

En ce qui concerne l'exposition des riverains, elle s'accroît forcément, puisque les CEM générés par les différentes sources²⁵ doivent être cumulés.

²⁵ Les champs ne s'additionnent pas de manière arithmétique. En fait, le champ résultant E_{res} est égal à la racine carrée de la somme des carrés des différentes composantes, c'est-à-dire :

$$E_{res} = (E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots)^{1/2}$$

Dans le cas des antennes de téléphonie mobile se trouvant nettement au-dessus des bâtiments voisins (plusieurs dizaines de mètres), l'augmentation de l'exposition est souvent négligeable. Inversement, cette augmentation peut être importante si les antennes sont basses et proches des bâtiments voisins.

Ajoutons, qu'en Belgique, l'utilisation de structures existantes (pylônes, bâtiments, ...) ainsi que le partage des sites sont obligatoires depuis 2001.

8.6. Distances de sécurité

Certaines publications recommandent l'adoption d'un périmètre de sécurité autour des antennes-relais (par exemple : aucune antenne à moins de 50, 100, voire 300 m de toute habitation). De telles recommandations ne résistent pas à l'analyse. La figure 7 montre clairement que le CEM sur les 100 premiers mètres est beaucoup plus faible qu'à 150 m. De même, la figure 9 montre que le CEM, jusqu'à une distance de 300 m, est inférieur à la valeur mesurée à 400 m.

La recommandation la plus souvent citée est de 300 m ; son objectif « implicite » est de limiter l'exposition à 0,6 V/m (voir dernière ligne du tableau 3) ; elle repose sur l'application de la formule suivante qui permet de calculer l'intensité du CEM dans l'axe du faisceau :

$$E = \frac{1}{d} \sqrt{30 P \cdot G} \quad (3)$$

dans laquelle d représente la distance (en m) et le produit P . G est la PIRE (voir § 7.3). En transformant cette expression, on obtient :

$$d = \frac{1}{E} \sqrt{30 P \cdot G} \quad (4)$$

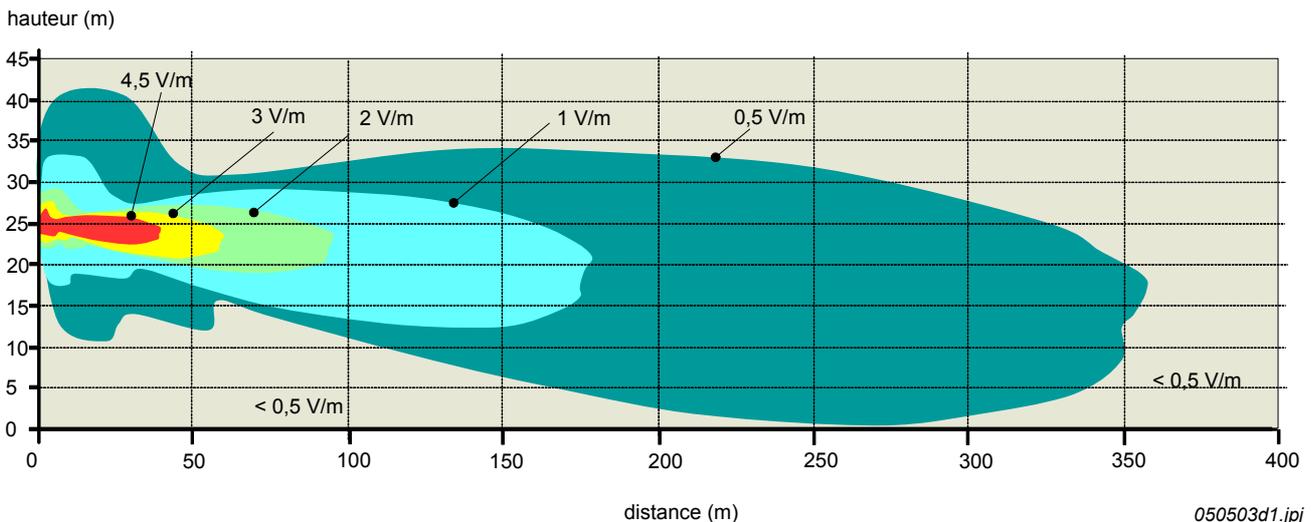
En tablant sur une PIRE de 1100 W (équivalant à une puissance de 20 W et à un gain de 55, soit 17,5 dBi) et en remplaçant E par 0,6 V/m, on obtient 300 m.

Cette manière de procéder est à la fois simpliste et erronée :

- la relation (3) fournit l'intensité du CEM dans l'axe du faisceau ; dans de nombreux cas, il n'y a personne à cet endroit. Un calcul correct doit prendre en compte la directivité dans le plan vertical (à partir du diagramme de rayonnement) afin d'obtenir des courbes d'iso-valeur semblables à celles de la figure 8 ;
- la méthode ne tient pas compte de l'atténuation dues aux obstacles, alors que celle-ci est très élevée dans le cas d'une installation sur un toit en béton armé ;
- comme mentionné précédemment la PIRE des antennes de téléphonie mobile est comprise entre 300 W pour les plus faibles et 3500 W pour les plus puissantes. Baser la méthode sur une puissance standard, alors que celle-ci peut varier dans un rapport de 1 à 12, n'est pas équitable.

Bien que nous n'ayons pas à émettre de jugement par rapport à la pertinence²⁶ de la recommandation de 0,6 V/m, il est clair que l'utilisation de la relation (3) dans laquelle on assimile une antenne directionnelle à une antenne isotrope est une erreur grossière pouvant conduire à des décisions aberrantes. Pour illustrer notre propos, il est sans doute utile de mentionner que l'application de la relation (3), dans le cas d'une antenne de radiodiffusion et de télévision rayonnant une PIRE de 1000 KW, conduirait à un rayon de plus de 9 km ; une telle antenne ne pourrait donc être installée qu'au centre d'un cercle de 18 km de diamètre et qui ne comporterait aucune habitation. Dans le cas de la Tour Eiffel, le diamètre dépasserait 40 km !

Il en résulte que les recommandations visant à imposer une distance de sécurité autour des antennes sont à abandonner au profit de méthodes de calcul plus correctes et qui font partie des connaissances de base en radiocommunication. La figure 10 fournit un exemple de tracé pour une antenne émettant une PIRE de 1000 W, placée à 25 m du sol et dont le faisceau est incliné de 2° vers le bas (angle de « tilt mécanique »). L'axe vertical de la figure 10 a été dilaté pour améliorer la lisibilité.



**Figure 10 : Courbes d'iso-valeur pour 3, 2, 1 et 0,5 V/m
(puissance totale = 20 W - gain = 52 - angle d'inclinaison du faisceau = 2°)**

8.7. Lobes secondaires d'une antenne

Les antennes sont caractérisées par leurs diagrammes de rayonnement, qui représentent leur gain dans les différentes directions de l'espace. La figure 11 est un exemple de diagramme de rayonnement dans le plan vertical ; il comporte :

- un lobe principal qui correspond à la direction vers laquelle la plus grande partie de la puissance est rayonnée ;
- des lobes secondaires qui indiquent qu'une fraction de la puissance de l'antenne est rayonnée dans des directions non souhaitées.

²⁶ Voir préambule.

Toutefois, le gain maximum correspondant aux lobes secondaires des antennes panneaux utilisées couramment est au moins 10 ou 20 fois inférieur au gain du lobe principal ; il en résulte que le champ dans ces directions reste dans des limites acceptables comme le démontre les figures 7 et 9 où les pics observés à 40 m de l'antenne sont dus à un lobe secondaire. De nombreuses mesures effectuées avec d'autres antennes confirment ce résultat.

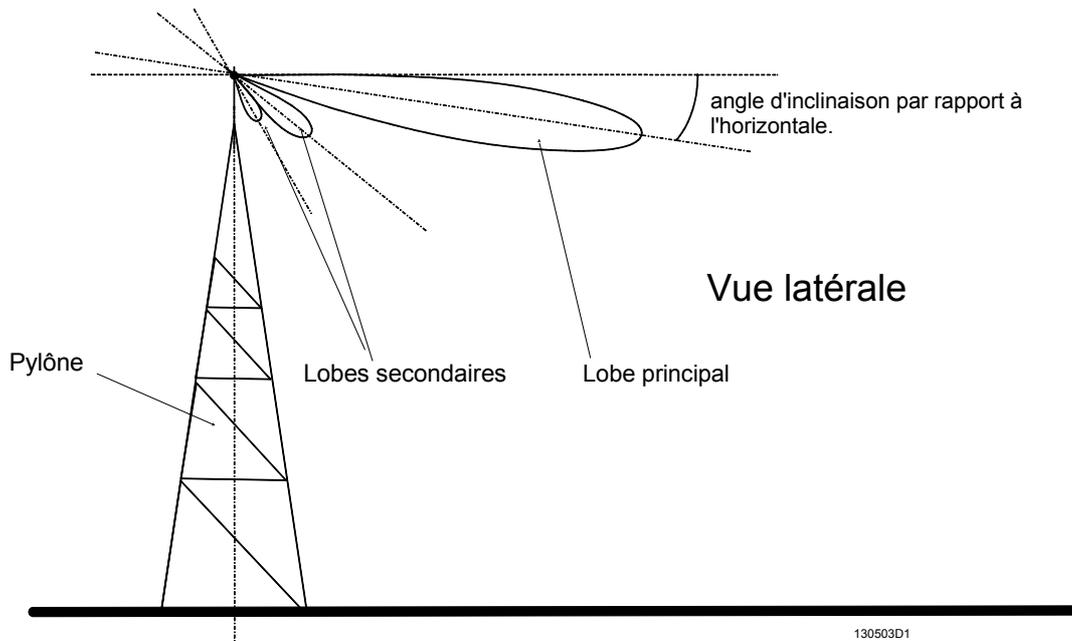


Figure 11 : Diagramme de rayonnement et lobes secondaires

8.8. Travaux à proximité d'une antenne de radiocommunication mobile

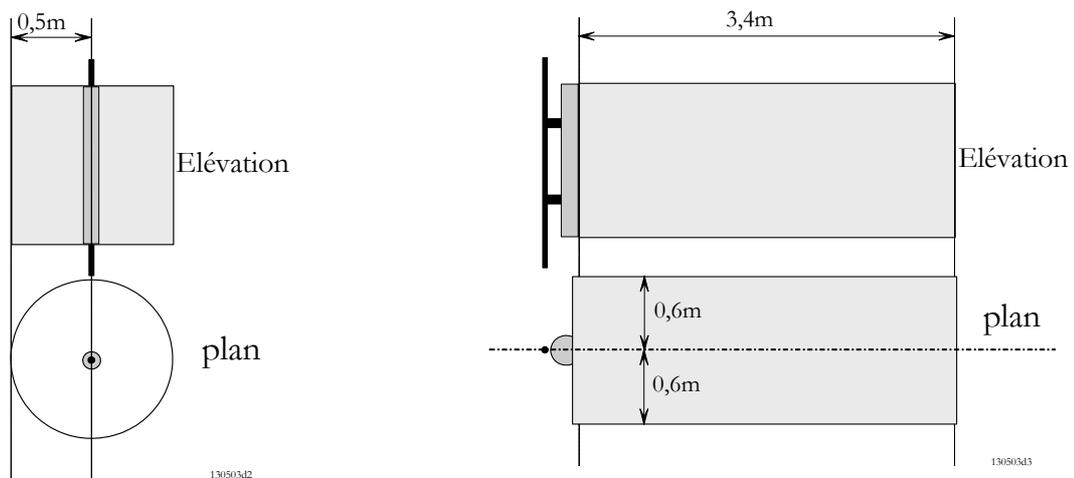


Figure 12 : Dimensions du gabarit de sécurité pour les antennes omnidirectionnelles et directionnelles

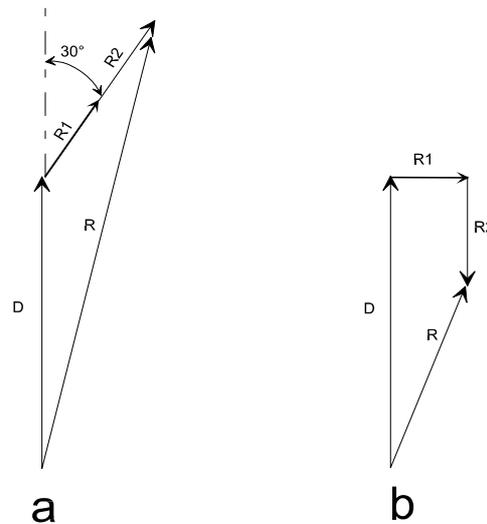
Les opérateurs de téléphonie mobile ont établi, en concertation avec l'Inspection Technique et Médicale du Ministère Fédéral de l'Emploi et du Travail, un document intitulé « Manuel de Sécurité pour les Travaux sur ou à Proximité d'une Infrastructure GSM » ([8]); ce document précise qu'il est interdit de se trouver dans le gabarit de sécurité des antennes sauf pour un bref passage (moins de 60 secondes) ; il y a donc lieu de mettre une antenne hors service pour l'exécution de travaux à l'intérieur de cette zone. Les dimensions du gabarit de sécurité, pour les antennes omnidirectionnelles et directionnelles, sont reprises à la figure 12.

8.9. Réémetteurs passifs

Certaines publications affirment que les objets conducteurs (rampes métalliques, barres à béton, miroirs, ...) produisent une « amplification » des CEM ; elles recommandent également de retirer les miroirs (ou tout objet conducteur) des locaux où l'on vit. En réalité, la présence d'objets réflecteurs (ceux-ci ne se limitent pas aux seuls métaux) sont la cause des variations importantes du champ, mais en aucun cas il n'y a augmentation de la valeur moyenne, ce qui serait contraire aux principes de base de la physique.

L'explication du phénomène observé est la suivante : les ondes électromagnétiques, dans la gamme des radiofréquences, sont susceptibles d'être réfléchies par la plupart des matériaux ou surfaces, comme le sont également d'autres ondes, telles que la lumière et le son. L'importance de la réflexion des CEM dépend de la conductibilité électrique du matériau ; elle est donc plus importante avec les métaux. Le sol, et dans une certaine mesure les murs, sont d'assez bons réflecteurs. Ces réflexions conduisent à des variations du CEM dans l'espace qui sont relativement importantes. En effet, en certains points, l'onde directe émise par l'antenne et les ondes réfléchies sur les obstacles (sol, murs, ...) arrivent à peu près en phase ; c'est ce que représente la figure 13a qui illustre le cas très simple où l'on reçoit une onde directe D et 2 réflexions, R1 et R2, de plus faible amplitude et qui sont déphasées de 30° . Le champ résultant, au point considéré, est égal à la somme vectorielle de l'onde directe et des réflexions ; la résultante R est ici plus élevée que le signal direct et les réflexions ont pour effet d'accroître le champ. En d'autres points de l'espace, la résultante R est inférieure à l'onde directe, ce qui se produit, par exemple dans le cas de la figure 13b où les 2 réflexions sont déphasées respectivement de 90° et 180° par rapport à l'onde directe. Il peut même y avoir des points où l'onde directe est totalement neutralisée (c'est ce que les physiciens appellent un « nœud de vibration »).

Une onde radio, lorsqu'elle se propage, subit un grand nombre de réflexions et de diffractions. Par conséquent, en un point A de l'espace, on reçoit un grand nombre de signaux dont l'amplitude et la phase varient de manière aléatoire. De plus, si l'on se déplace au point B (voisin du point A), on recevra toujours plusieurs signaux, mais chacun aura une amplitude et une phase différentes de celles qu'ils avaient au point A, ce qui a pour conséquence que la résultante aura une autre valeur.



181299D2.WMF

Figure 13

Influence des réflexions sur les fluctuations du champ

Les variations du CEM sont d'autant plus importantes que le nombre de réflexions est grand. Par exemple, à l'extérieur, on mesure des variations de champ dont le rapport entre le maximum et le minimum peut atteindre la valeur 3. Il en résulte que les variations de densité de puissance sont dans un rapport de 1 à 9. La distance entre un maximum et un minimum peut être aussi courte qu'un quart de longueur d'onde, c'est-à-dire 7,5 cm à la fréquence de 900 MHz. Les variations du CEM dans les enregistrements des figures 7 et 9 sont d'ailleurs l'illustration de ce phénomène.

Les variations sont encore plus grandes à l'intérieur d'un bâtiment, car le nombre de réflexions y est plus important ; on y mesure couramment des variations du champ dont le rapport entre le maximum et le minimum est égal à 10 ; les variations de densité de puissance sont donc dans un rapport de 1 à 100.

En résumé, les réflexions sur les obstacles environnants donnent donc lieu à des variations importantes du champ mais, à l'échelle du corps humain, il n'y a pas d'augmentation de la valeur moyenne ; ces réflexions se font à énergie totale constante et donc sans amplification du signal. Un mécanisme d'amplification est tout autre, car il impliquerait que l'énergie reçue soit supérieure à l'énergie émise. L'élimination des miroirs (ou tout objet conducteur) des locaux où l'on vit n'a par conséquent guère de sens, puisque le sol et les murs suffisent pour produire ce phénomène.

9. CONCLUSIONS

Tant les calculs que les mesures réalisées à proximité d'implantations de différents types démontrent que des champs supérieurs à quelques V/m n'existent que dans le faisceau de l'antenne, ou juste en dessous de celle-ci.

La figure 14 illustre l'exemple d'un bâtiment se trouvant à proximité du pied d'un pylône ; ce cas suscite, souvent à tort, des inquiétudes, car le rayonnement passe nettement au-dessus du sommet des habitations. Toutes les mesures, effectuées dans des situations semblables à celles de la figure 14, indiquent qu'à l'extérieur (cas le plus défavorable puisqu'il n'y a aucun obstacle pour atténuer le rayonnement), à une quinzaine de mètres sous les antennes, le CEM ne dépasse jamais quelques dixièmes de V/m.

A l'intérieur des bâtiments, les murs et les toitures atténuent considérablement le rayonnement et apportent une protection supplémentaire. Aux fréquences utilisées en téléphonie mobile, un mur extérieur réduit le champ d'un facteur compris entre 2,5 et 5, voire davantage selon son épaisseur, sa composition et la fréquence de l'onde porteuse.

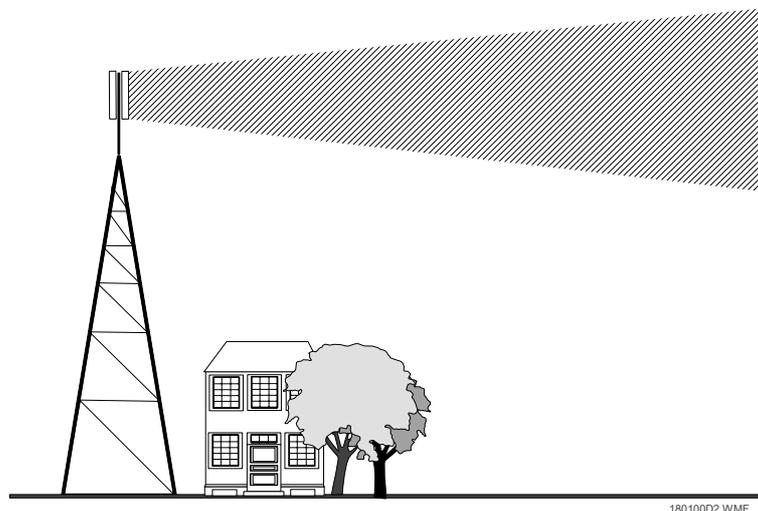


Figure 14 : Antennes situées nettement au-dessus des habitations

L'exemple de la figure 15 mérite plus d'attention, puisqu'un bâtiment se trouve dans le faisceau à une distance relativement courte. Dans ce cas, il faut tenir compte des caractéristiques de l'antenne (puissance, gain, angle d'inclinaison du faisceau, profil du terrain, ...), afin de contrôler si les limites prescrites sont bien respectées. Dans le cas contraire, une solution consiste à utiliser un pylône plus élevé. Dans de telles situations, il y a lieu de tracer la courbe d'iso-valeur correspondant à la limite de champ imposée (courbe semblable à celles des figures 8 et 10) ; cette courbe peut être tracée avec une bonne précision au moyen de modèles de calcul prenant en compte le diagramme de rayonnement d'une antenne. Si l'on trace la courbe d'iso-valeur à 4,7 V/m (valeur égale à la limite par antenne, fixée par la norme belge à la fréquence de 925 MHz), la distance, dans le faisceau, à partir de laquelle le CEM est inférieur à la limite varie entre 25 et 70 m, selon le type de l'antenne et la puissance rayonnée.

La hauteur de l'antenne par rapport au sol et aux bâtiments voisins est une donnée beaucoup plus importante que la distance. Pour s'en convaincre, il suffit d'examiner la figure 8 (établie pour un type d'antennes et une puissance relativement faible). Avec les antennes à 24 m de hauteur, on atteint un champ de 0,5 V/m à environ 2,5 m du sol ; si ces antennes ne se trouvaient plus qu'à 12 m de hauteur, on

atteindrait 1 V/m à 2,5 m du sol. Inversement, si les antennes se trouvaient à une hauteur de 36 m, le champ à 2,5 m du sol serait, au maximum, de 0,3 V/m. Des conclusions comparables peuvent être déduites de la figure 10 qui correspond à une antenne de puissance moyenne placée à 25 m de hauteur.



Figure 15 : Bâtiment situé dans le faisceau

Dans le cas des antennes installées sur un toit peu absorbant (tuiles, ardoises, ...), ses occupants ne sont exposés qu'à des champs faibles (moins de quelques dixièmes de V/m sous la toiture), du fait que les antennes concentrent leur rayonnement dans la direction horizontale. Il en va de même lorsqu'une antenne panneau est accolée à un mur, car le rayonnement émis vers l'arrière est atténué par les murs. Il convient évidemment de veiller à ce qu'il n'y ait pas, face aux antennes, de bâtiments trop proches.

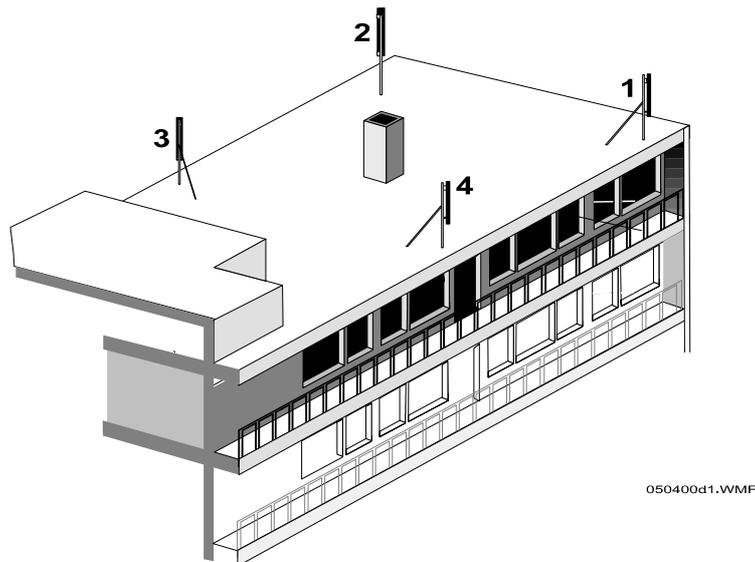


Figure 16 : Antennes sur un bâtiment avec toit en béton

Lorsque des antennes sont installées sur le toit de bâtiments en béton armé (figure 16), celui-ci apporte une protection extrêmement efficace et le champ en dessous des antennes est négligeable (moins de 0,1 V/m au dernier étage). Par conséquent, les craintes soulevées par l'implantation d'antennes sur les toits de telles constructions (notamment les hôpitaux et les écoles) ne sont pas justifiées, car les mesures prouvent, dans tous les cas, qu'il est de loin préférable d'installer les antennes sur le toit du bâtiment que l'on veut protéger, plutôt que de les éloigner. Il est à noter que nous insistions déjà sur cette évidence dans nos publications parues en 2000 ([1] et [2]) et qui a été confirmée par des mesures effectuées par d'autres organismes. L'idée très répandue selon laquelle les personnes vivant dans un bâtiment sous des antennes de téléphonie mobile sont soumises à des CEM importants est donc dénuée de tout fondement.

Enfin pour conclure, il est sans doute rassurant de constater que, sur l'ensemble des sites où l'ISSeP a réalisé des mesures (plusieurs dizaines à ce jour), aucune situation alarmante n'a été rencontrée ; ceci ne signifie pas qu'il n'y en ait aucune, mais si elles existent, elles ne devraient pas être très fréquentes et auraient sans doute pu être évitées par un choix réfléchi de la localisation des antennes et sans que cela n'implique nécessairement un surcoût significatif pour l'exploitant. Cette constatation constitue également la démonstration qu'il est possible de développer des réseaux de téléphonie mobile sans exposer les riverains des antennes à des CEM importants, même dans les zones à forte densité de population où il est impossible de trouver un endroit sans habitation à moins de 300 m ; elle démontre aussi que l'adoption d'une norme « raisonnable » ne rend pas impossible le développement de la téléphonie mobile.

ANNEXE

DETERMINATION DE L'INTENSITE D'UN CHAMP ELECTROMAGNETIQUE

L'intensité d'un CEM peut être déterminée, soit par une mesure sur site, soit par calcul au moyen de modèles de prédiction ; cette seconde solution est la seule envisageable lorsque l'installation n'est pas encore opérationnelle et qu'il s'agit de vérifier que le champ qu'elle générera respectera la norme d'exposition.

A.1. METHODES DE MESURES

Dans la gamme des fréquences attribuées à la téléphonie mobile, la mesure de l'intensité d'un CEM est réalisée au moyen d'une sonde constituée d'une antenne sensible à la composante électrique du champ. Les limites fixées par les normes étant exprimées par l'intensité de la composante électrique du champ, le résultat de la mesure est donné en V/m. Lorsque cela s'impose, et pour autant que l'on se trouve dans la zone de champ éloigné (voir §A2), la composante magnétique et la densité de puissance peuvent être déduites à partir des relations (1) et (2).

Il existe deux méthodes de mesures : la première s'effectue au moyen d'appareils dits « à bande large », la seconde est appelée « méthode sélective ».

A.1.1. Méthode « à bande large »

Cette méthode utilise des appareils qui sont sensibles dans une gamme de fréquences très large (d'où leur nom) qui s'étend depuis quelques centaines de kHz à quelques GHz. Ces appareils, d'un usage très simple, ne nécessitent que très peu de connaissances techniques et fournissent un résultat immédiat (aucun calcul n'est nécessaire). Il existe divers appareils de ce type disponibles sur le marché ; le prix des plus performants avoisine 10.000 €. Les mesureurs de champ à bande large présentent néanmoins certains inconvénients, particulièrement lorsqu'il s'agit de mesurer les CEM émis par des antennes de téléphonie mobile :

- Sensibilité et précision : les appareils les plus performants ont une sensibilité et une précision de l'ordre de 0,5 à 0,6 V/m. Sachant que, dans de nombreux cas, le CEM dans les zones accessibles au public est du même ordre de grandeur lorsque les antennes émettent au maximum de leur puissance (voir résultats présentés au §6), il en résulte que, la plupart du temps, un appareil à bande large indique un CEM nul, ou s'il affiche un résultat, celui-ci est entaché d'une erreur relative importante (si un appareil affiche un résultat égal à 0,8 V/m avec une précision de 0,6 V/m, la valeur réelle se situera dans l'intervalle allant de 0,2 V/m à 1,4 V/m).

- Variations de la puissance rayonnée par l'antenne : comme expliqué au § 7, une antenne de radiocommunication mobile rayonne une puissance qui dépend du nombre de communications en cours. Par conséquent, une mesure au moyen d'un appareil à bande large fournira un résultat qui variera selon la puissance émise au moment de la mesure ; lorsque celle-ci est faite à l'insu de l'exploitant de l'antenne, on ne connaît pas le facteur correctif à appliquer. S'il l'on veut avoir un résultat significatif, il faut donc effectuer la mesure à un moment où le trafic est important et durant une certaine période.
- Manque de sélectivité en fréquence de certains appareils : un mesureur à bande large étant sensible dans une bande de fréquences qui s'étend depuis quelques centaines de kHz à quelques GHz, il fournit un résultat qui est le cumul des CEM dont la fréquence est comprise dans cette bande. Cependant, il existe sur le marché des appareils aux performances médiocres et qui sont sensibles, notamment, aux champs électrique et magnétique générés par le réseau de distribution d'électricité (50 Hz) ou par des sources telles que téléviseurs ou écrans d'ordinateurs (alors que la fréquence de ces champs est en dehors de la bande dans laquelle l'appareil est étalonné). En conséquence, l'utilisation de tels appareils par des personnes non initiées peut donner lieu à de grossières erreurs.

En conclusion, l'utilisation d'un appareil à bande large pour mesurer les CEM émis par une antenne-relais de téléphonie mobile ne doit être envisagée que si l'on se contente d'un résultat approximatif ; cet avis est aussi celui du Groupe de Travail mis en place par le CEPT²⁷ pour mettre au point une procédure de mesures des CEM dans la gamme de fréquences comprise entre 9 kHz et 300 GHz (voir [7]).

A.1.2. Méthode « sélective »

Cette méthode utilise un analyseur de spectres²⁸ connecté à une antenne de mesures (par exemple un dipôle calibré). L'analyseur de spectres est un équipement complexe dont l'usage nécessite une très bonne connaissance des principes de base de la radiocommunication. Le coût de ces appareils a fortement chuté durant ces dernières années et on trouve maintenant des analyseurs de spectres de bonne qualité aux environs de 12.000 € auquel il faut ajouter le coût des antennes calibrées. Un analyseur de spectres permet la mesure de chaque composante fréquentielle du champ et présente une très grande sensibilité (1 mV/m, et même moins, selon le type d'antenne de mesures et la résolution spectrale choisie).

²⁷ Conférence Européenne des Postes et Télécommunications.

²⁸ En variante, on peut également utiliser un récepteur de test.

Dans le cas des antennes de radiocommunication mobile, une manière de procéder consiste à mesurer le champ à la fréquence du canal de contrôle ; cette fréquence est présente en permanence et est émise à puissance constante. Le champ correspondant au cumul des différentes fréquences est déduit par calcul en multipliant le résultat de la mesure par la racine carrée du nombre de fréquences rayonnées ; ce nombre peut être déterminé en relevant le spectre dans la bande de fréquences allouée à l'exploitant de l'antenne ; une observation du spectre pendant 1 ou 2 minutes suffit généralement pour déterminer le nombre de fréquences émises²⁹.

Il est intéressant de souligner que cette méthode conduit à un résultat qui est indépendant de la puissance effectivement rayonnée par l'antenne au moment de la mesure ; le champ ainsi obtenu est celui qui serait atteint lorsqu'une antenne émet à sa pleine capacité (en terme de nombre de communications simultanées) ; le résultat obtenu par cette méthode correspond donc au « scénario maximaliste ».

Etant donné que le champ électrique est caractérisé par de fortes variations dans l'espace (l'explication de ce phénomène est exposée au § 8.7.), il est impératif d'enregistrer l'intensité du CEM le long de trajets de quelques longueurs d'ondes, de manière à pouvoir déterminer les valeurs maximale et moyenne.

Le Groupe de Travail mis en place par le CEPT recommande d'adopter la méthode sélective pour les cas où une investigation détaillée est nécessaire.

A.2. METHODE DE CALCUL

Avant de présenter la méthode permettant de calculer l'intensité du CEM rayonné par une antenne, il faut préciser les limites de la zone dans laquelle elle s'applique.

Lorsqu'on se rapproche d'une antenne, on doit distinguer les champs réactifs du champ rayonné. Des champs électriques ou magnétiques sont dits réactifs lorsque l'énergie électromagnétique circule localement sans être transportée à grande distance ; inversement, les champs sont dits rayonnés lorsqu'ils se propagent à grande distance par un mécanisme ondulatoire. Le cas du transformateur, où l'énergie circule dans le noyau et celui du condensateur, où elle circule entre les plaques, constituent des exemples de champs presque purement réactifs. A l'opposé, lorsqu'on est suffisamment éloigné d'une antenne, il ne subsiste qu'un champ purement rayonné.

Toute antenne produit un CEM comprenant une composante réactive et une composante de rayonnement ; la première décroît très rapidement avec la distance par rapport à l'antenne et devient généralement négligeable à une distance de l'ordre de la longueur d'onde.

²⁹ Cette évaluation est toutefois plus laborieuse avec certains types de « frequency hopping ».

A.2.1. Zones entourant une source des champs

L'espace entourant une source de CEM peut être décomposée en quatre zones appelées zone des champs réactifs, zone de Rayleigh, zone de transition et zone de champ éloigné ; l'ensemble comprenant la zone de Rayleigh et la zone de transition porte également le nom de zone de champ proche rayonné. La figure A1 représente, dans le cas d'une antenne GSM 900 de 2,7 m de hauteur, une coupe verticale (l'antenne coïncide avec l'origine des axes du graphique) des trois principales zones, la zone de champs réactifs n'ayant pas été représentée, car trop petite.

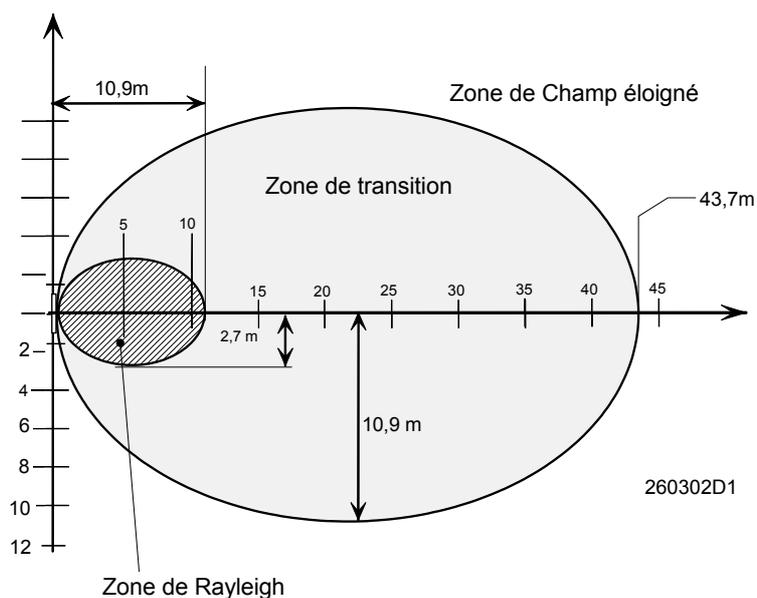


Figure A1

Coupe verticale des zones de Rayleigh, de transition et de champ éloigné pour une antenne GSM 900 de 2,7 m de hauteur

a) Zone de champs réactifs

La zone des champs réactifs s'étend jusqu'à une distance de l'ordre de la longueur d'onde ; dans cette zone, la décroissance des champs électrique et magnétique est fonction de l'inverse du carré et du cube de la distance. Aux fréquences utilisées en téléphonie mobile, la taille de la zone de champs réactifs est très limitée (quelques dizaines de cm) ; du point de vue de la sécurité, elle ne présente d'intérêt que pour les personnes amenées à travailler à proximité immédiate d'une antenne.

Dans le cas des antennes monopoles ou dipôles, il est établi que le champ proche rayonné est supérieur aux champs réactifs au-delà d'une distance égale à λ/π (où λ représente la longueur d'onde) ; cette distance ne devrait pas être très différente avec les antennes panneaux utilisées en radiocommunication mobile, puisqu'elles sont constituées d'une ou plusieurs rangées de dipôles.

b) Zone de champ éloigné

Il s'agit de la zone où le CEM est exclusivement rayonné (onde plane); elle débute à une distance de la source d'émission (appelée distance de Fraunhofer) donnée par :

$$d_{FR} = \frac{2 D^2}{\lambda} \quad (A1)$$

où :

D : plus grande dimension de l'antenne mesurée dans la direction perpendiculaire à la direction du rayonnement (en m) ; en fait, il s'agit de la plus grande dimension de l'antenne « vue » depuis le point considéré. Lorsqu'il s'agit d'une antenne panneau, D est maximale lorsqu'on se trouve en face de l'antenne;

λ : longueur d'onde (en m) qui est liée à la fréquence f (en MHz) par la relation :

$$\lambda = \frac{300}{f} \quad (A2)$$

Le contour délimitant les zones de champ éloigné et de transition (figure A1) est obtenu en représentant, dans un diagramme polaire, la relation :

$$d_{FR}(\alpha) = \frac{2 H^2 \cos^2 \alpha}{\lambda} \quad (A3)$$

avec :

α : angle entre l'axe horizontal et la direction de propagation

$d_{FR}(\alpha)$: distance de Fraunhofer dans la direction formant un angle α avec l'axe horizontal

Le terme $H \cos \alpha$ au numérateur de l'expression (A3) représente la plus grande dimension de l'antenne « vue » depuis le point considéré.

Dans notre exemple de la figure A1 (antenne GSM 900 de 2,7 m de hauteur), la distance de Rayleigh atteint une longueur de 10,9 m dans la direction horizontale ; ensuite, elle diminue lorsque α augmente pour tendre vers zéro lorsque α s'approche de 90° (ou de -90°). Il y a toutefois lieu de noter que, sous l'antenne, c'est-à-dire lorsque α est proche de 90° , la plus grande dimension de celle-ci dans la direction perpendiculaire à la direction de propagation est la largeur de l'antenne (généralement moins de 30 cm) ; il lui correspond une distance de Fraunhofer égale à 60 cm qui, en principe, devrait être représentée par deux arcs de cercle (au-dessus pour $\alpha = -90^\circ$ et en dessous pour $\alpha = 90^\circ$) ; ce rayon de 60 cm est tellement court,

notamment par rapport à la hauteur de l'antenne, que les deux arcs de cercle se confondent pratiquement avec l'origine des axes de la figure A1.

Précisons que ce qui précède s'applique aux antennes panneau ; ces antennes ont au moins une dimension égale à plusieurs longueurs d'onde. Pour les antennes de petite taille (antenne quart d'onde, dipôle demi-onde, ...) la distance de Fraunhofer est égale à 10λ , c'est-à-dire 3,3 m à 900 MHz.

Dans la zone de champ éloigné, les champs électrique et magnétique sont inversement proportionnels à la distance et sont respectivement donnés par les relations (A4) et (A5), généralement appelées « formules du champ éloigné ».

$$E = \frac{1}{d} \sqrt{30 P \cdot G / A(\phi, \theta)} \quad (A4)$$

$$H = \frac{1}{d} \sqrt{0,08 P \cdot G / A(\phi, \theta)} \quad (A5)$$

avec :

- P : puissance injectée à la base de l'antenne (en W)
- G : gain de l'antenne, par rapport à une antenne isotrope, dans la direction où l'intensité du rayonnement est maximale (nombre sans dimension)
- $A(\phi, \theta)$: perte de puissance dans la direction considérée par rapport à la direction où l'intensité du rayonnement est maximale (nombre sans dimension)
- θ : angle d'élévation (en degrés)
- ϕ : angle formé avec l'azimut de référence (en degrés)
- d : distance par rapport à l'antenne (en m)

Le terme $A(\phi, \theta)$ est déduit des diagrammes de rayonnement horizontal et vertical de l'antenne. θ et ϕ sont généralement mesurés par rapport à la direction où l'intensité du rayonnement est maximale (axe du faisceau).

c) Zone de transition

Entre la zone de Rayleigh et la zone de champ éloigné se trouve la zone de transition; le champ y présente des variations plus importantes en fonction de la distance. A l'intérieur de la zone de transition, il est couramment admis que les relations (A4) et (A5), normalement applicables en champ éloigné, permettent de calculer la valeur moyenne du champ (moyenne calculée sur une courte distance pour éliminer l'influence des variations spatiales) avec une assez bonne précision. En fait, dans la zone de transition, ces deux relations ont plutôt tendance à fournir un résultat supérieur à la moyenne du champ réel ; un tel écart est néanmoins acceptable, puisqu'il va dans le sens de la sécurité.

d) Zone de Rayleigh

La zone de Rayleigh est comprise entre la zone des champs réactifs et la zone de transition ; elle s'étend jusqu'à la distance de Rayleigh donnée par :

$$d_R = \frac{D^2}{2\lambda} \quad (A6)$$

où λ et D ont la même signification que dans la relation (A1). La distance de Rayleigh vaut le quart de la distance de Fraunhofer.

Comme pour la zone de transition, le contour de la zone de Rayleigh est obtenu en représentant, dans un diagramme polaire, la relation :

$$d_R(\alpha) = \frac{H^2 \cos^2 \alpha}{2\lambda} \quad (A7)$$

avec :

$d_R(\alpha)$: distance de Rayleigh dans la direction formant un angle α avec l'axe horizontal

Dans la zone de Rayleigh, il peut être démontré que, pour les antennes de type « panneau », la valeur moyenne du champ électrique et du champ magnétique évolue approximativement avec la distance selon une loi en $1/\sqrt{d}$ et la densité de puissance suivant une loi en $1/d$; ce résultat permet d'estimer les champs électrique et magnétique en deçà de la distance de Rayleigh. Il suffit pour ce faire d'extrapoler les champs ou la densité de puissance obtenus à partir des formules du champ éloigné pour la distance de Rayleigh.

Le volume complet correspondant aux zones de Rayleigh et de transition est obtenu en faisant pivoter la figure A1 d'un angle de 360° autour de l'axe vertical ; ces volumes ont donc la forme d'un tore aplati.

A.2.2. Formules applicables en pratique

En pratique, il s'avère que la relation (A4) permet de traiter la toute grande majorité des cas d'exposition du public aux champs générés par les antennes de téléphonie mobile, puisque la zone « normalement accessible » se trouve, soit dans la zone de champ éloigné, soit dans la zone de transition. En effet, la figure A1, établie pour un cas représentatif, montre que la zone de Rayleigh et la zone des champs réactifs se trouvent en face de l'antenne et à proximité immédiate.

Ajoutons toutefois que l'expression (A4) ne tient compte que de l'onde directe, c'est-à-dire le signal venant directement de l'antenne. Or, tout point de l'espace reçoit

généralement une onde directe et des signaux ayant subi une ou plusieurs réflexions sur des obstacles. Le champ résultant, au point considéré, est égal à la somme vectorielle des différentes contributions, ce qui donne lieu, dans l'espace, à des variations importantes de l'intensité du CEM. Il est clair que les relations (A4) et (A5) ne tiennent pas compte de ce phénomène ; cependant, l'expérience montre que le résultat qu'elles fournissent correspond à la valeur moyenne du champ calculé sur une courte distance (quelques longueurs d'onde).

Le découpage en zones, comme présenté ci-dessus, appelle plusieurs remarques :

- les limites des zones ne dépendent que des dimensions de l'antenne et de la longueur d'onde ; elles ne dépendent en aucun cas de la puissance émise (les diverses zones pour une antenne sont les mêmes, que ce soit pour 1 mW ou pour 10 kW ;
- les zones de champs réactifs et de Rayleigh sont des zones où les formules du champ éloigné, c'est-à-dire (A4) et (A5), ne sont pas applicables ; cela ne signifie pas nécessairement que l'intensité du champ y soit importante ;
- dans les zones de champs réactifs et de Rayleigh, les champs électrique et magnétique peuvent être déterminés par calcul, mais ceux-ci sont relativement complexes ;
- dans les zones de champs réactifs et de Rayleigh, les champs électrique et magnétique peuvent être mesurés, notamment au moyen d'un analyseur de spectres et d'antennes appropriées à chacune de ses composantes³⁰.

³⁰ A notre connaissance, il n'existe pas, sur le marché, d'antenne sensible au champ magnétique aux fréquences de 900 et 1800 MHz. L'ISSeP a construit une antenne de ce type pour ces besoins propres.

REFERENCES

- [1] PIRARD W. - Champs électromagnétiques à proximité des antennes-relais de mobilophonie - Rapport final - Mai 2000 (www.issep.be).
- [2] PIRARD W. - Conclusions de l'étude menée par l'ISSEP concernant les champs électromagnétiques à proximité des antennes-relais de mobilophonie - Mars 2000 (www.issep.be).
- [3] GERIN. A. STOCKBROECKX B. et VANDER VORST A. - Champs micro-ondes et santé - 1999.
- [4] ICNIRP Guidelines - Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz) – 1998.
- [5] PIRARD W. - Etude des risques liés à l'exposition aux champs électromagnétiques rayonnés par les faisceaux hertziens utilisés par les opérateurs de téléphonie mobile - Etude réalisée à la demande de la Région de Bruxelles-Capitale - Novembre 2001 (www.issep.be).
- [6] AFSSE - Rapport à l'Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale : Téléphonie Mobile et Santé - Mars 2003 (www.afsse.fr).
- [7] CEPT - Measuring non-ionising radiation (9 kHz - 300 GHz) – Draft CEPT/ERC/Recommendation – January 2002.
- [8] GOF - Manuel de Sécurité pour les Travaux sur ou à Proximité d'une Infrastructure GSM – avril 2001.