

**CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES A PROXIMITE**

**DES ANTENNES-RELAIS DE MOBILOPHONIE**

**RAPPORT FINAL**

**Mai 2000**

**Willy PIRARD**  
Chef de la Section  
Electronique Appliquée.

# TABLE DES MATIERES

Introduction

Exécution et suivi de l'étude

Chapitre 1 : Synthèse des normes et recommandations

Chapitre 2 : Principe de fonctionnement des réseaux GSM et DCS 1800

1. Ondes radio – Notions de champs lointain et proche
2. Bandes de fréquences
3. Canaux de transmission
4. Puissances instantanée et moyenne
5. Antennes
6. Diagrammes de rayonnement des antennes
7. Diversité d'antennes et diversité de polarisations

Chapitre 3 : Méthode de travail

- a. Représentativité
- b. Bandes de fréquences
- c. Accessibilité

Chapitre 4 : Antennes PROXIMUS et MOBISTAR implantées sur le château d'eau de Méan

Chapitre 5 : Antennes PROXIMUS et KPN-ORANGE implantées sur le château d'eau de Soheit-Tinlot

Chapitre 6 : Antennes PROXIMUS implantées sur le toit de la Résidence Marchandise à Seraing

Chapitre 7 : Antennes PROXIMUS implantées le long des façades de l'Institut de Mathématiques de l'Université de Liège

Chapitre 8 : Mesures des champs électriques et magnétiques à proximité d'antennes directives

Chapitre 9 : Mesures des champs électriques et magnétiques à proximité d'une antenne MICROCELL

Chapitre 10 : Mesures des champs électromagnétiques rayonnés par l'antenne RTFB du Bol d'Air

## Chapitre 11 : Conclusions et recommandations

1. Antennes directives
  - a. Champs dans le faisceau de l'antenne
  - b. Champs derrière une antenne
  - c. Champs en dessous d'une antenne
2. Antennes MICROCELL
3. Recommandations

## ANNEXES

- Annexe 1 : Méthode de mesure
- Annexe 2-1 : Antennes MOBISTAR implantées à proximité du terrain de football de l'Olympic de Seraing à Ougrée
- Annexe 2-2 : Antennes PROXIMUS et MOBISTAR implantées sur le château d'eau de Méan
- Annexe 2-3 : Antennes PROXIMUS implantées sur le château d'eau de Soheit-Tinlot
- Annexe 2-4 : Antennes KPN-ORANGE implantées sur le château d'eau de Soheit-Tinlot
- Annexe 2-5 : Antennes KPN-ORANGE implantées sur un swesite à Horion-Hozémont
- Annexe 2-6 : Antenne PROXIMUS implantées sur un bâtiment de BELGACOM à Ocquier
- Annexe 2-7 : Antennes PROXIMUS implantées sur le toit de la Résidence Marchandise à Seraing
- Annexe 2-8 : Antennes PROXIMUS implantées le long des façades de l'Institut de Mathématiques de l'Université de Liège
- Annexe 2-9 : Mesures des champs électriques et magnétiques à proximité d'une antenne MICROCELL

## Unités et abréviations utilisées

Symbole	Grandeur	Unité	
E	Champ électrique	V/m	Volt par mètre
H	Champ magnétique	A/m	Ampère par mètre
S	Densité de puissance	W/m <sup>2</sup> , mW/m <sup>2</sup> , μW/cm <sup>2</sup> (1 mW/m <sup>2</sup> = 0,1 μW/cm <sup>2</sup> )	Watt par mètre carré MilliWatt par mètre carré MicroWatt par centimètre carré
f	Fréquence	Hz, kHz, MHz	Hertz, kiloHertz, MégaHertz
λ	Longueur d'onde	m	Mètre
z	Impédance caractéristique	Ω	Ohm
SAR	Taux d'absorption spécifique (Specific Absorption Rate)	W/kg	Watt par kg

## INTRODUCTION

Le développement rapide du marché de la téléphonie mobile et l'arrivée de nouveaux opérateurs de télécommunications a comme conséquence la multiplication d'antennes-relais. Suite aux inquiétudes de la population concernant les éventuels effets sur la santé des champs électromagnétiques, la Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGRNE) du Ministère de la Région wallonne a confié, à l'ISSeP, une étude comportant des mesures des champs au voisinage des antennes-relais des 3 opérateurs de mobilophonie. Cette étude, d'une durée d'un an, a débuté en mars 1999. L'objectif principal était de comparer les résultats de mesures aux normes ou recommandations internationales<sup>1</sup> et d'apprécier l'intérêt éventuel de soumettre l'exploitation des antennes-relais à un contrôle administratif.

La réalisation de mesures se justifiait par le fait qu'il n'existait que peu de données disponibles, et de source neutre, concernant les champs produits par ces antennes. Il est à noter qu'il existe bien des modèles théoriques permettant le calcul du champ, mais ceux-ci s'avèrent assez complexes à proximité de l'antenne.

La campagne de mesures a été précédée d'une analyse des normes et recommandations relatives aux rayonnements électromagnétiques. Un rapport de synthèse sur les normes et recommandations a été publié en novembre 1999; un résumé de ce rapport est présenté au chapitre 1. L'objectif de cette première étape était de disposer d'un tableau de référence reprenant les différents "plafonds" d'exposition avec lesquels les résultats des mesures pouvaient être comparés.

Le chapitre 2 présente quelques notions d'électromagnétisme et décrit brièvement le principe de fonctionnement du système GSM.

La méthode de travail suivie lors de cette étude est présentée au chapitre 3.

Les chapitres 4 à 9 présentent les résultats relatifs à 4 sites les plus représentatifs, ainsi qu'à des mesures complémentaires réalisées à l'ISSeP. Etant donné la complexité du sujet, et afin de rendre la lecture de ce document aussi aisée que possible, nous nous sommes limités, dans ces chapitres, à une description des caractéristiques des sites et du matériel (type d'antennes, puissance d'émission, etc, ...), aux résultats et aux conclusions. Les détails des mesures, ainsi que les calculs intermédiaires, ont été reportés en annexe, car ils requièrent une bonne connaissance du domaine de la radiopropagation et du fonctionnement du GSM.

Il était également intéressant de comparer le champ électromagnétique produit par les antennes-relais de mobilophonie avec celui produit par un émetteur de radio et de télévision de forte puissance. Dans ce but, des mesures ont été réalisées à proximité de l'émetteur RTBF du Bol d'Air, près de Liège. Les résultats sont présentés au chapitre 10.

---

<sup>1</sup> Il faut préciser qu'il n'existe actuellement, en Belgique, aucune norme spécifique pour le rayonnement électromagnétique

Les conclusions, et un certain nombre de recommandations concernant l'installation d'antennes, sont présentés au chapitre 11.

Les méthodes de mesures utilisées dans cette étude sont exposées dans l'annexe 1.

L'annexe 2 comprend l'intégralité des résultats relatifs aux 7 sites étudiés ainsi que ceux concernant les mesures effectuées à proximité d'une antenne MICROCELL à l'ISSeP; en plus des descriptions et résultats présentés aux chapitres 4 à 9, on y trouve tous les détails des mesures et les calculs intermédiaires.

## EXECUTION ET SUIVI DE L'ETUDE

Ce rapport présente les résultats et conclusions de l'étude réalisée dans le cadre de la Convention entre la Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGRNE) du Ministère de la Région wallonne et l'ISSeP.

Un Comité d'Accompagnement, constitué de représentants de la DGRNE et de l'ISSeP, a été chargé du suivi de l'étude. Le rôle de ce Comité d'Accompagnement était, notamment, d'assurer :

- le suivi de l'état d'avancement
- l'approbation du programme détaillé et de ses différentes phases
- l'examen et l'acceptation des rapports intermédiaires et du rapport final
- l'assistance technique de l'ISSeP

Le Comité d'Accompagnement comprenait :

### **1. Pour le Ministère de la Région wallonne :**

Monsieur Bernard Pendeville  
Inspecteur Général à la Division de la Prévention et des Autorisations (DPA)  
Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGRNE),  
Avenue Prince de Liège, 15, 5100 JAMBES.

Monsieur Bernard Bequet  
Directeur de la Coordination de la Prévention des Pollutions (DCPP)  
Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGRNE),  
Division de la Prévention et des Autorisations (DPA)  
Avenue Prince de Liège, 15, 5100 JAMBES.

Madame Laurence NICK, Docteur en Médecine  
Directrice à la Direction Générale de l'Action Sociale et de la Santé  
Division de la Santé et des Infrastructures - Direction de l'Hygiène  
Avenue Gouverneur Bovesse, 100, 5100 NAMUR

Monsieur Arthur DEGEE, Ingénieur Civil  
Directeur du Centre de Liège de la Division de la Prévention et des Autorisations (DPA)  
Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGRNE)  
Montagne Ste-Walburge, 2 - Bât.II, 4000 LIEGE

Monsieur Jean-Paul BROWET, Ingénieur Industriel  
Attaché à la Division de la Prévention et des Autorisations (DPA)  
Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGRNE)  
Avenue Prince de Liège, 15, 5100 JAMBES

## **Pour l'ISSeP :**

Monsieur Michel DE WAELE, Ir Chim & Ind. Agr. (Lv.), Dr Sci. Agr. (Gx)  
Directeur Général  
Rue du Chéra 200, 4000 LIEGE

Monsieur Willy PIRARD, Ingénieur Civil Electronicien  
Chef de la Section Electronique Appliquée  
Rue du Chéra, 200, 4000 LIEGE

## **2. Experts extérieurs :**

Le Comité d'Accompagnement était assisté de quatre experts extérieurs comprenant :

- Le Professeur André GERIN des Facultés Polytechniques de Mons, Service d'Electromagnétisme et de Télécommunications
- Le Professeur André VANDER VORST

### **Responsable du Laboratoire d'Hyperfréquences**

Université Catholique de Louvain

Le Professeur Vander Vorst est co-Président du Comité Technique n° 10 de la Société Microwave Theory and Techniques de l'IEEE, traitant des “ Biological Effects and Medical Applications ”. Le Professeur Vander Vorst est également expert belge au Groupe Santé du Conseil de l'Europe en vue d'établir des normes européennes de protection de la population à l'égard des champs électromagnétiques

- Le Docteur Luc VERSCHAEVE  
Chef de Projet au VITO (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek), Centre d'Expertise en Toxicologie. Le Docteur Verschaeve est représentant belge à l'OMS et à l'action COST 244bis, membre du Comité 2 de l'ICNIRP
- Le Docteur Benoît STOCKBROECKX  
Assistant au Laboratoire d'Hyperfréquences de l'Université Catholique de Louvain

## **Personnel de l'ISSeP :**

Les travaux ont été réalisés, à l'ISSeP, sous la responsabilité de Monsieur Willy PIRARD, avec la collaboration de Messieurs Raphaël DE KEYSER, Ingénieur Industriel Electronicien, Henri HELLIN, Ingénieur Industriel Electronicien, Alféo GIUST, Ingénieur Industriel Electronicien, Arthur JORDENS, Technicien en Electronique et Pierre BERTRAND, Technicien.

# CHAPITRE 1

## SYNTHESE DES NORMES ET RECOMMANDATIONS

Dans les bandes de fréquences utilisées en téléphonie mobile, la plupart des normes et recommandations qui ont été établies par des organismes nationaux ou internationaux se fondent sur l'effet thermique.

L'effet thermique produit une augmentation de la température des tissus et résulte de la forte teneur en eau du corps humain. La molécule d'eau, ainsi que celles constituant certains tissus, étant de type polaire, leur orientation est influencée par un champ électrique. Dans le cas où la direction du champ électrique varie au cours du temps, l'orientation des molécules tend à suivre celle du champ, ce qui produit des frottements intermoléculaires, d'où une élévation de température. C'est ce principe qui est utilisé dans le four à micro-ondes, mais à des niveaux de puissance nettement plus élevés que ceux émis par un portable GSM.

Une seconde catégorie de recommandations concerne les effets dits "athermiques"; selon certains scientifiques, ces effets résulteraient d'une interaction directe avec les tissus et auraient, notamment, une influence sur le système nerveux. Sont souvent cités des symptômes subjectifs, tels que : problèmes de concentration, irritabilité, troubles du sommeil, fatigue, etc...

Certaines études font également état d'effets sur l'œil (dégénérescence tissulaire de la rétine, de la cornée et de l'iris), d'effets sur les systèmes de reproduction, cardio-vasculaire immunitaire, hormonal, ainsi que sur le matériel génétique (ADN). Selon ces mêmes études, de tels effets apparaîtraient pour des niveaux d'exposition nettement plus faibles que ceux produisant un échauffement significatif. Il faut toutefois ajouter que les recherches relatives aux effets athermiques conduisent souvent à des conclusions divergentes, ou non significatives. D'autre part, ces études se basent généralement sur des expérimentations réalisées sur des animaux ou sur des cultures de cellules. L'extrapolation des résultats à l'espèce humaine n'est pas toujours aisée, notamment du fait de la différence de taille et de constitution des cellules.

La plupart des recommandations nationales ou internationales, basées sur l'effet thermique, imposent, dans le cas du public soumis à une exposition totale et continue, une densité de puissance<sup>2</sup> inférieure à 4,7 W/m<sup>2</sup> pour la bande de fréquence de 900 MHz (utilisée par les opérateurs PROXIMUS et MOBISTAR). Cette limite passe à 9 W/m<sup>2</sup> à la fréquence de 1.800 MHz (opérateur KPN-ORANGE). Ces valeurs sont imposées, notamment, dans les recommandations de l'IRPA (International Radio Protection Association) et dans le projet de Directive Européenne (pr ENV 50166).

---

<sup>2</sup> Les notions de champ électrique et de densité de puissance sont définies au chapitre 2

Plusieurs pays ont adopté des normes plus sévères visant à protéger les populations et les professionnels des effets athermiques. L'Australie et la Nouvelle-Zélande ont une norme commune qui limite la densité de puissance à 2 W/m<sup>2</sup>. La norme de l'ex-U.R.S.S. impose, pour les fréquences comprises entre 300 MHz et 300 GHz, une densité de puissance inférieure à 100 mW/m<sup>2</sup>, et ce dans le cas d'une exposition continue du public. Plus récemment, se basant sur le principe de précaution, l'Italie a adopté une limite 6 V/m, ce qui correspond à une densité de puissance de 100 mW/m<sup>2</sup>. La Suisse a, quant à elle, publié une ordonnance limitant le champ à 4 V/m (soit 42 mW/m<sup>2</sup>) et 6 V/m (soit 100 mW/m<sup>2</sup>), respectivement dans les bandes de fréquences de 900 et 1.800 MHz; c'est actuellement, et à notre connaissance, la réglementation la plus restrictive en Europe.

Certains scientifiques, ou associations, ont également rédigé des recommandations. En Belgique, le Professeur VANDER VORST et le Docteur STOCKBROECKX (Université Catholique de Louvain), ainsi que le Professeur GERIN (Facultés Polytechniques de Mons), ont proposé une recommandation basée sur la compatibilité électromagnétique, et non sur des considérations de santé publique. Le principe à la base de cette recommandation repose sur la norme européenne EN 50082-1 : 1996 relative à l'immunité des appareils électroniques vis-à-vis de champs électromagnétiques extérieurs. Elle s'applique aux appareils électriques et électroniques destinés à être utilisés dans un environnement résidentiel (maisons, appartements), commercial (boutiques, supermarchés), ainsi que dans l'industrie légère (laboratoires, ateliers, centres de services), et pour lesquels aucune norme spécifique de produit ou de famille de produits sur l'immunité n'existe. L'objet de cette norme est de définir les exigences d'essais d'immunité aux perturbations continues et transitoires, conduites et rayonnées. Elle décrit les conditions de tests auxquelles les appareillages susceptibles d'être perturbés doivent être soumis. Elle prévoit notamment que tout appareil doit continuer à fonctionner comme prévu par le constructeur, lorsqu'il est soumis à une onde électromagnétique dont le champ électrique est de 3 V/m, dans la gamme de fréquences de 80 MHz à 1.000 MHz.

Un champ électrique de 3 V/m correspond à une densité de puissance maximale égale à 24 mW/m<sup>2</sup>. Du point de vue des effets éventuels sur la santé, les auteurs de cette recommandation justifient le choix des 3 V/m par le fait qu'il n'existe pas, ou peu, d'effets nocifs recensés dans la littérature pour un tel niveau d'exposition<sup>3</sup>. Notons également qu'Inter-Environnement Wallonie recommande une limite de 20 mW/m<sup>2</sup>, qui est pratiquement équivalente à 3 V/m.

La recommandation la plus restrictive est défendue par le Dr. Neil CHERRY, Directeur de l'Unité de Recherche en Climatologie de l'Université de Christchurch en Nouvelle-Zélande et par le Professeur Roger SANTINI de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Laboratoire de Biochimie-Pharmacologie; ces deux scientifiques préconisent de limiter l'exposition à 1 mW/m<sup>2</sup> en moyenne sur une année. A l'opposé, les défenseurs du projet de Directive Européenne, ou de la recommandation de l'IRPA, prétendent 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.

---

2 A titre de comparaison, un portable GSM rayonnant une puissance de 2 W produit, à une distance de 2 m, un champ de 3 V/m

**Tableau 1**  
**Densité de puissance et champ maximum dans le cas d'une exposition totale du public**  
**selon plusieurs réglementations ou recommandations**

Réglementations ou recommandations	Densité de puissance (mW/m <sup>2</sup> )	Champ électrique (V/m)
Projet de Directive Européenne pr ENV 50166	4.700 à 900 MHz 9.000 à 1.800 MHz	41,9 à 900 MHz 58,1 à 1.800 MHz
Australie et Nouvelle-Zélande (1991)	2.000	27,5
Italie, ex-URSS (1978)	100	6,1
Suisse (1999)	42 à 900 MHz 100 à 1.800 MHz	4 à 900 MHz 6 à 1.800 MHz
UCL – FPMs (Belgique, 1999)	24	3
Inter-Environnement Wallonie (1998)	20	2,75
N.CHERRY (Nouvelle-Zélande, 1996) R. SANTINI (France, 1998)	1	0,6

Le tableau 1 résume les limites d'exposition correspondant à ces diverses réglementations ou recommandations, applicables aux fréquences du GSM et du DCS 1800. La deuxième colonne reprend la densité de puissance (exprimée en mW/m<sup>2</sup>) et la dernière colonne fournit le champ électrique correspondant (exprimé en V/m). Les quatre premières lignes du tableau 1 concernent des réglementations effectivement appliquées dans certains pays, tandis que les trois dernières lignes sont relatives à des recommandations émanant de scientifiques ou d'Associations.

Le tableau 1 montre qu'en ce qui concerne les densités de puissance, il y a, entre les valeurs extrêmes, un facteur de 4.700 pour le GSM et de 9.000 pour le DCS 1800.

Il est important de préciser que l'objectif de l'étude confiée à l'ISSeP n'était nullement d'émettre un avis sur la pertinence des différentes normes ou recommandations rencontrées. En effet, une telle analyse est certainement prématurée au vu des nombreuses recherches en cours initiées par l'OMS et l'Union Européenne.

**CHAPITRE 2**  
**PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES RESEAUX**  
**GSM ET DCS 1800**

Ce chapitre présente quelques notions d'électromagnétisme et décrit brièvement le principe de fonctionnement du système GSM. Vu la complexité du sujet, nous nous sommes limités aux seuls aspects utiles à la bonne compréhension des méthodes de mesures. Le lecteur, uniquement intéressé par les résultats et conclusions, peut éventuellement passer ce chapitre.

**1. ONDES RADIO – NOTIONS DE CHAMPS LOINTAIN ET PROCHE**

Une onde radio comporte deux composantes qui sont constituées d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui varient sinusoïdalement dans l'espace et dans le temps. Lorsqu'on est suffisamment éloigné d'une antenne d'émission, le champ électrique et le champ magnétique rayonnés sont perpendiculaires entre eux, ainsi qu'à la direction de propagation, comme illustré à la figure 1. Dans ce cas, on dit que l'onde électromagnétique est plane et les deux composantes sont liées entre elles par la relation de proportionnalité suivante :

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

où :

E : champ électrique (en V/m)

H : champ magnétique (en A/m)

Z : impédance caractéristique (en Ohm) du milieu où l'onde se propage; elle vaut  $377 \Omega$  dans l'air, d'où :

$$\frac{E}{H} = 377 \Omega \quad (2)$$

La distance à partir de laquelle on peut considérer que l'onde est plane, est donnée par :

$$d_{\min} = \text{Erreur !} \quad (3)$$

où :

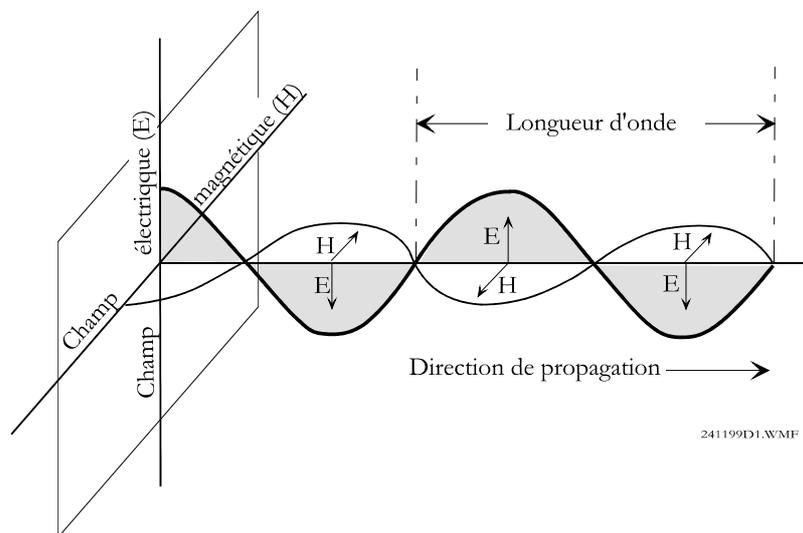
$D$  : est la plus grande dimension de l'antenne (en m)

$\lambda$  : la longueur d'onde (en m) qui est liée à la fréquence par la relation :

$$\lambda = \text{Erreur !} \quad (4)$$

où :

$f$  : est exprimée en MHz



**Figure 1 : Onde électromagnétique plane**

A une distance de l'antenne d'émission supérieure à  $d_{\min}$ , on dit que l'on se trouve en **champ lointain**. Les champs électrique et magnétique y sont inversement proportionnels à la distance. A une distance inférieure à  $d_{\min}$ , on se situe en champ proche; les champs y présentent des variations importantes et leur calcul est beaucoup plus complexe.

La plus grande dimension des antennes-relais des réseaux GSM étant généralement de l'ordre de 1 à 2 m et la longueur d'onde correspondant au GSM étant de 0,33 m,  $d_{\min}$  vaut au maximum 25 m.

Dans le cas du DCS 1800, la plus grande dimension de l'antenne est généralement de 1,3 m ; la longueur d'onde étant ici de 0,16 m,  $d_{\min}$  est de l'ordre de 20 m.

La densité de puissance  $S$  d'une onde plane (en  $W/m^2$ ) est définie comme étant la puissance qui traverse une surface de  $1 m^2$  perpendiculaire à la direction de propagation et est donnée par :

$$S = E \cdot H \quad (5)$$

Compte tenu de la relation (2), lorsque l'onde se propage dans l'air, on peut écrire que :

$$S = \frac{E^2}{377} = 377 H^2 \quad (6)$$

En principe, les relations (1), (2) et (6) ne sont valables qu'en champ lointain, c'est-à-dire à une distance de la source supérieure à  $d_{\min}$ , c'est-à-dire une vingtaine de mètres pour les antennes directives. Au-delà de cette distance, la connaissance d'une des trois grandeurs ( $E$ ,  $H$  ou  $S$ ) permet, par simple calcul, de déterminer les autres grandeurs.

## **2. BANDES DE FRÉQUENCES**

Les réseaux de mobilphonie GSM et DCS 1800 fonctionnent respectivement à des fréquences voisines de 900 et 1.800 MHz. Dans le cas du GSM, 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 l'autre sens. Dans la terminologie GSM, la transmission du portable vers l'antenne-relais est appelée "voie montante"; la transmission de l'antenne-relais vers le portable est, quant à elle, appelée "voie descendante".

Il faut signaler qu'en Belgique, les deux bandes de 10 MHz comprises entre 880 et 890 MHz, d'une part, et entre 925 et 935 MHz, d'autre part, n'ont pas encore été allouées à un opérateur. Ces deux bandes sont souvent appelées "extended bands".

De manière similaire, les voies montante et descendante du DCS 1800 utilisent les bandes comprises entre 1.710 et 1.785 MHz, d'une part, et entre 1.805 et 1.880 MHz, d'autre part. L'affectation des différentes bandes est résumée dans le tableau 1.

Les fréquences utilisables ainsi que les bandes passantes associées sont normalisées internationalement; elles sont en nombre strictement limité et elles sont allouées, en Belgique, par l'IBPT (Institut Belge des Postes et des Télécommunications).

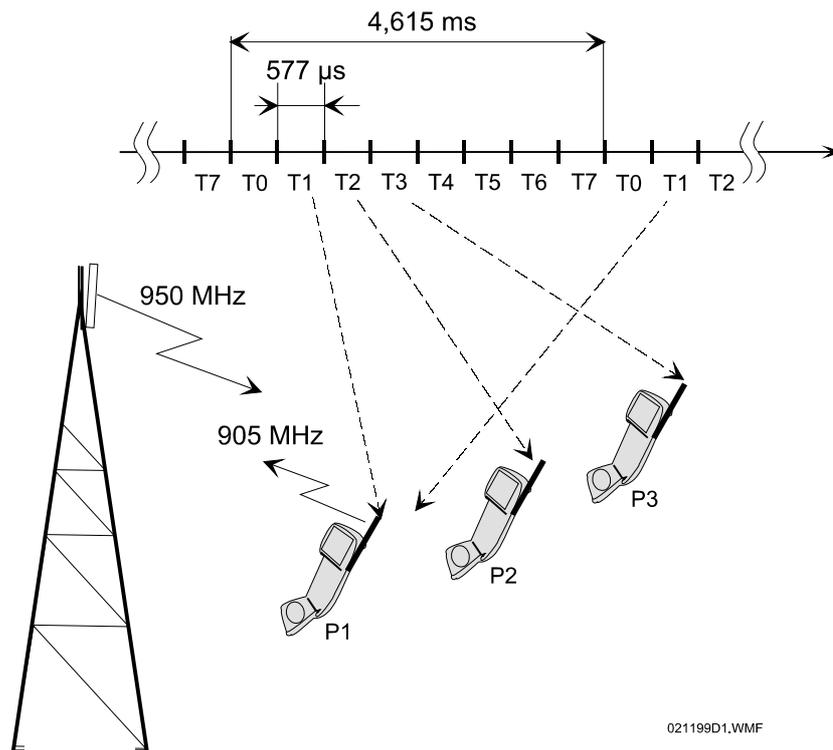
## **3. CANAUX DE TRANSMISSION**

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 varie dans une plage de 0,2 MHz de largeur et pendant un huitième du temps.

**Tableau 1**  
**Bandes de fréquences des réseaux GSM et DCS 1800**

Norme	Voie	Bande de fréquences (MHz)
GSM	Montante	890 – 915
	Descendante	935 – 960
GSM ("extended bands")	Montante	880 – 890
	Descendante	925 – 935
DCS 1800	Montante	1.710 – 1.785
	Descendante	1.805 – 1.880

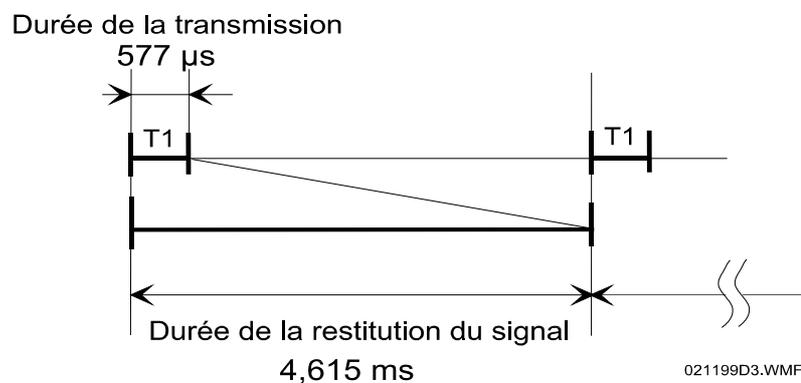
L'exemple de la figure 2 illustre le principe utilisé : une antenne-relais transmet vers 3 portables, notés P1, P2 et P3, au moyen d'une porteuse à la fréquence nominale de 950 MHz. La voix (ou éventuellement des données) module (c'est-à-dire fait varier) la fréquence instantanée de la porteuse dans une plage étroite centrée autour de la fréquence nominale<sup>4</sup>. La porteuse ainsi modulée occupe une largeur de 0,2 MHz comprise entre 949,9 et 950,1 MHz.



**Figure 2 : Canal de transmission selon les normes GSM et DCS 1800**

<sup>4</sup> Les réseaux GSM et DCS 1800 utilisent une modulation appelée GMSK pour "Gaussian Minimum Shift Keing". Il s'agit d'une forme évoluée de modulation de fréquence

Pendant un premier intervalle de temps T1, d'une durée de 577  $\mu$ s, la porteuse est utilisée pour transmettre vers le portable P1. Cet intervalle de temps est appelé "time slot" dans la terminologie GSM, ensuite, le portable P2 reçoit pendant le second "time slot" T2. De la même manière, le portable P3 recevra les informations qui lui sont destinées pendant le troisième "time slot" T3, et ainsi de suite s'il y a d'autres portables dans la cellule. Une porteuse peut ainsi être partagée par 8 portables; à la fin du "time slot" T1, le portable P1 devra attendre pendant 7 "time slots" avant de recevoir à nouveau. La transmission d'un canal (c'est-à-dire une conversation) se fait donc de manière discontinue. Il est à noter que ce phénomène n'est pas perceptible pour l'utilisateur, car la transmission pendant un "time slot" s'effectue à un débit 8 fois supérieur à celui correspondant à la restitution du signal. Autrement dit, la transmission vers le portable P1 s'effectue pendant le "time slot" T1 et la restitution du signal vocal occupe 8 "time slots" (c'est-à-dire 4,615 ms). La figure 3 illustre ce processus.



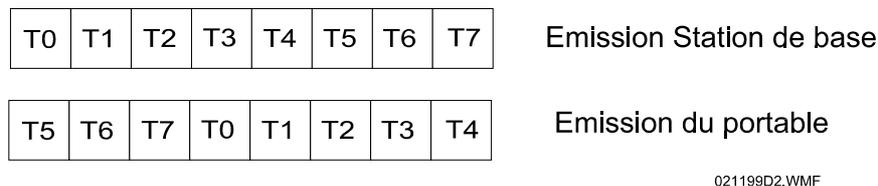
**Figure 3 : Durées de transmission et de restitution**

Pour fonctionner, un réseau GSM (ou DCS 1800) requiert un canal de contrôle par cellule, appelé BCCH ("Broadcast Control Channel"); il s'agit d'un "time slot" d'une porteuse qui diffuse en permanence diverses informations. Celles-ci comprennent, notamment, un 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 en train d'appeler. Lorsqu'il est en veille (c'est-à-dire sous tension, et non en communication), un portable est en permanence à l'écoute du BCCH de la cellule. Même en l'absence de toute communication dans la cellule, le BCCH est émis en permanence; en principe, c'est le "time slot" T0 d'une des porteuses qui lui est alloué.

Une antenne-relais émet, en général, un nombre de porteuses par cellule compris entre 2 et 6. En principe, il est possible de monter à 8 porteuses, mais cela peut poser certains problèmes de planification de réseau. Une porteuse ayant une capacité de 8 canaux et 1 canal étant réservé pour le BCCH, 1 cellule à 2 porteuses aura donc une capacité maximale de 15 conversations simultanées ( $2 \times 8 - 1$ ). De même, une cellule à 4 porteuses a une capacité de 31 conversations simultanées ( $4 \times 8 - 1$ ). Dans la terminologie GSM, un canal alloué à la transmission de la voix, ou de données, est appelé canal de trafic.

Le nombre de canaux actifs dans une cellule, à un moment donné, est égal au nombre de communications en cours plus un. Lorsqu'il n'y a aucune communication en cours, seul le BCCH sera émis, c'est-à-dire 1/8 de porteuse. S'il y a 4 conversations en cours, 5 canaux (1 BCCH et 4 canaux de trafic) seront émis, soit 5/8 de porteuse. Comme nous le verrons dans les chapitres traitant des résultats des mesures, cette caractéristique doit être prise en compte dans le calcul de l'exposition au rayonnement produit par les antennes-relais, ainsi qu'en ce qui concerne la méthode de mesure.

La transmission du portable vers l'antenne-relais fonctionne selon un principe similaire, mais l'émission se fait sur une fréquence inférieure de 45 MHz à celle utilisée par la voie descendante (c'est-à-dire à 905 MHz dans notre exemple de la figure 2). Afin que le portable ne doive pas recevoir et émettre simultanément, il y a un décalage de 3 "time slots" entre le début de la réception et le début de l'émission (figure 4).



**Figure 4 : Décalage entre émission par la station de base et émission par le portable**

La figure 5 présente la structure d'un "time slot". Il comprend un train de 148 bits d'une durée de 3,7  $\mu$ s, ce qui correspond à 547,6  $\mu$ s. Ces 148 bits représentent la voix numérisée, ainsi que des bits de synchronisation. La durée d'un "time slot" étant de 577  $\mu$ s, le train de 148 bits est en fait suivi d'une interruption de la transmission (appelée "guard period"), d'une durée de 29,4  $\mu$ s, et dont le but est de séparer le contenu de 2 "time slots" successifs.



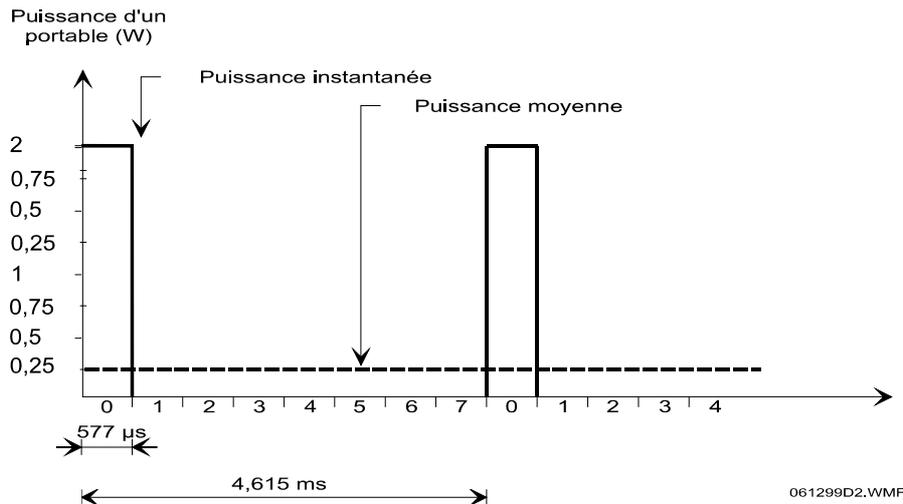
**Figure 5 : Structure d'un "time slot"**

#### **4. PUISSANCES INSTANTANÉE ET MOYENNE**

Les normes GSM et DCS 1800 fixent les puissances de sorties des portables et des stations de base. Il existe toutefois plusieurs classes de portables et de stations de base; à chaque classe correspond une puissance nominale.

Dans le cas des portables GSM, la classe 4 est la plus courante; sa puissance instantanée maximale est de 2 W pendant la durée d'un "time slot". Comme le portable n'émet que

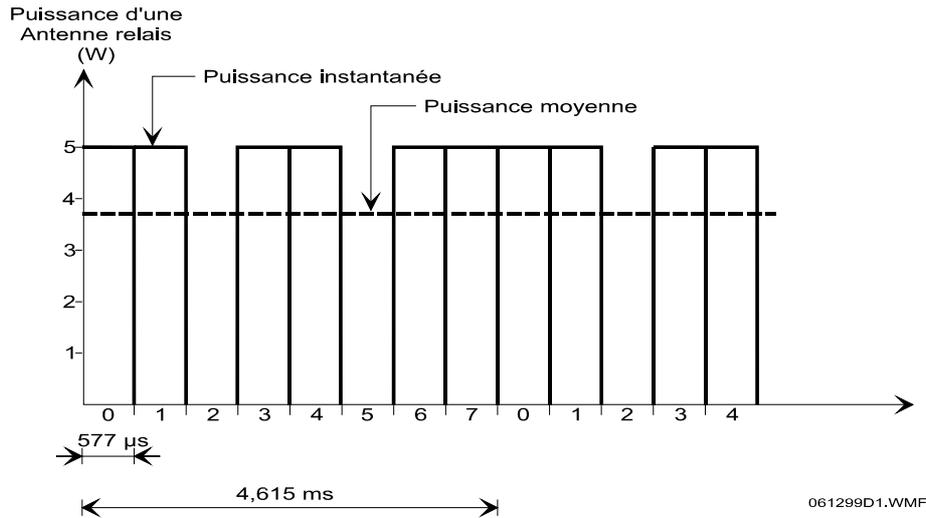
pendant 1 "time slot" sur 8 (figure 6), la puissance moyenne maximale est donc de 0,25 W (2 W divisés par 8). Il faut également préciser qu'il s'agit de valeurs maximales (pour la classe 4), car le portable règle automatiquement sa puissance en fonction de la qualité de la liaison avec la station de base. Par exemple, si le portable est proche, une puissance nettement moindre que 2 W sera suffisante pour assurer une transmission de qualité; inversement, s'il est très éloigné, ou s'il se trouve dans un milieu clos (dans un bâtiment, en sous-sol,...), le portable augmentera progressivement sa puissance pour atteindre, si nécessaire, la valeur instantanée de 2 W. La plage de variation de la puissance instantanée d'un mobile de classe 4 va de 20 mW à 2 W.



**Figure 6 : Puissances instantanée et moyenne d'un portable**

D'autre part, l'arrêt de la transmission pendant les périodes de silence contribue également à réduire la puissance moyenne émise par un portable, toutefois cette fonction n'est pas utilisée par tous les opérateurs. Les portables DCS 1800 fonctionnent de manière semblable, mais les puissances sont inférieures. Pour les portables de classe 1, qui sont les plus répandus, la puissance instantanée maximale est de 1 W.

La puissance instantanée maximale des stations de base GSM et DCS 1800 est généralement de 8 W par porteuse, mais à cause des pertes dans les coupleurs et les câbles de liaison, il ne reste, à l'entrée de l'antenne, que 4 ou 5 W par porteuse. On trouve aussi des stations de base qui délivrent une puissance de 20 W par porteuse. Compte tenu des pertes dans les câbles et les coupleurs, la puissance à l'entrée de l'antenne n'est plus que d'une dizaine de W. Comme dans le cas des portables, les puissances données ci-dessus sont des valeurs instantanées pendant la durée de 1 "time slot". Pour déterminer la puissance moyenne, il faut tenir compte du nombre de "time slots" occupés. Par exemple, dans le cas où la puissance instantanée à l'entrée de l'antenne est de 5 W, un "time slot" correspondra en fait à une puissance moyenne de 0,625 W (c'est-à-dire 5 W divisé par 8). La puissance moyenne n'atteindra 5 W que lorsque les 8 "time slots" seront utilisés. La figure 7 illustre le cas où 6 "time slots" sont occupés. Dans ce cas, la puissance moyenne est de 3,75 W.



**Figure 7 : Puissances instantanée et moyenne d'une station de base (exemple)**

Un contrôle automatique de la puissance de la station de base, semblable à celui réalisé par les portables, est également prévu dans la norme GSM; ce contrôle agit au niveau de chaque "time slot". Toutefois, il ne s'agit que d'une option qui n'est guère utilisée actuellement; sa mise en service permettra de réduire le champ au voisinage des antennes.

**Il est à noter que, dans le cas de micro-cellules (quelques centaines de mètres de rayon), la puissance injectée à l'antenne est généralement de 1 ou 2 W.**

## 5. ANTENNES

Le gain d'une antenne est toujours exprimé par rapport au rayonnement d'une antenne isotrope; une telle antenne a comme particularité de rayonner uniformément dans toutes les directions; l'exemple de la figure 8 permet de clarifier cette notion. La puissance P injectée à l'antenne est rayonnée de manière uniforme dans toutes les directions. La densité de puissance S à une distance d de l'antenne est définie comme étant la puissance qui traverse une surface de 1 m<sup>2</sup> perpendiculaire à la direction de propagation; elle s'exprime en W/m<sup>2</sup> (voir § 1 de ce chapitre). Cette densité de puissance s'obtient en exprimant le principe de la conservation de l'énergie dans une sphère de rayon d dont la surface est donnée par :

$$s = 4 \pi d^2 \quad (7)$$

avec :

d : distance par rapport à l'antenne (en m)

La densité de puissance s'obtient en divisant la puissance injectée à l'antenne par la surface de la sphère; elle vaut donc :

$$S = \text{Erreur !} \quad (8)$$

avec :

P : puissance émise (en W)

Les antennes utilisées en mobilophonie sont conçues pour concentrer leur rayonnement dans la direction horizontale; en effet, étant donné que les portables avec lesquels l'antenne communique se trouvent dans un plan horizontal autour de celle-ci, il est inutile de rayonner vers le haut ou vers le bas. D'autre part, afin de pouvoir couvrir plusieurs cellules (généralement 2 ou 3) à partir d'un même site, des antennes directives permettent de concentrer leur rayonnement dans une partie du plan horizontal (généralement un angle compris entre 60 et 120°). Cette "concentration" du rayonnement dans une certaine direction multiplie la densité de puissance par un certain facteur appelé gain (G). Le gain dépend de la direction considérée et est représenté graphiquement par un diagramme de rayonnement. La figure 9 représente, à titre d'exemple, le diagramme de rayonnement dans le plan vertical d'une antenne isotrope (courbe 1) et d'une antenne dipôle demi-onde (courbe 2) qui rayonne préférentiellement dans la direction horizontale où le gain maximum est de 1,64, ce qui signifie que la densité de puissance, dans cette direction, sera 1,64 fois supérieure à celle qui serait produite par une antenne isotrope alimentée avec la même puissance. La figure 9 montre également que la densité de puissance produite par l'antenne dipôle est nulle dans la direction verticale.

Les antennes utilisées pour la couverture de cellules ordinaires ont un gain qui peut atteindre 70. Les antennes utilisées pour la couverture des micro-cellules, ou celles qui sont montées sur les portables, ont un gain généralement compris entre 1 et 2.

Le gain G est un nombre sans dimension (voir ci-dessous); il peut aussi être exprimé en décibels, ou plus exactement en dB<sub>i</sub> (la lettre i indique que le gain se réfère à une antenne isotrope). Ces deux manières d'exprimer le gain sont liées entre elles par la relation (9)<sup>5</sup>:

$$g = 10 \log G \quad (9)$$

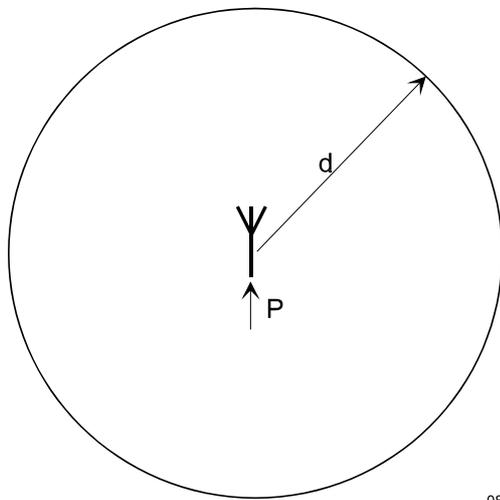
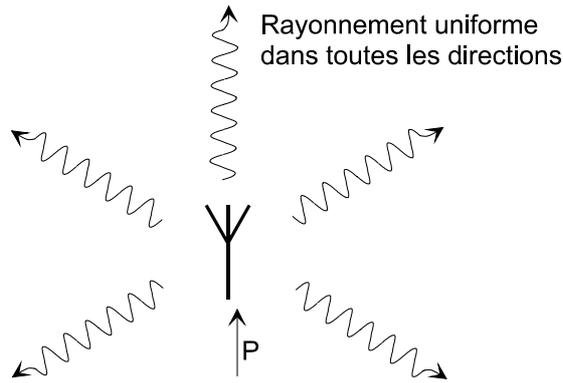
avec :

G : gain de l'antenne dans la direction considérée (nombre sans dimension)

g : gain de l'antenne dans la direction considérée exprimé en dB<sub>i</sub>

---

<sup>5</sup> et réciproquement  $G = 10^{0,1g}$



081299D1.WMF

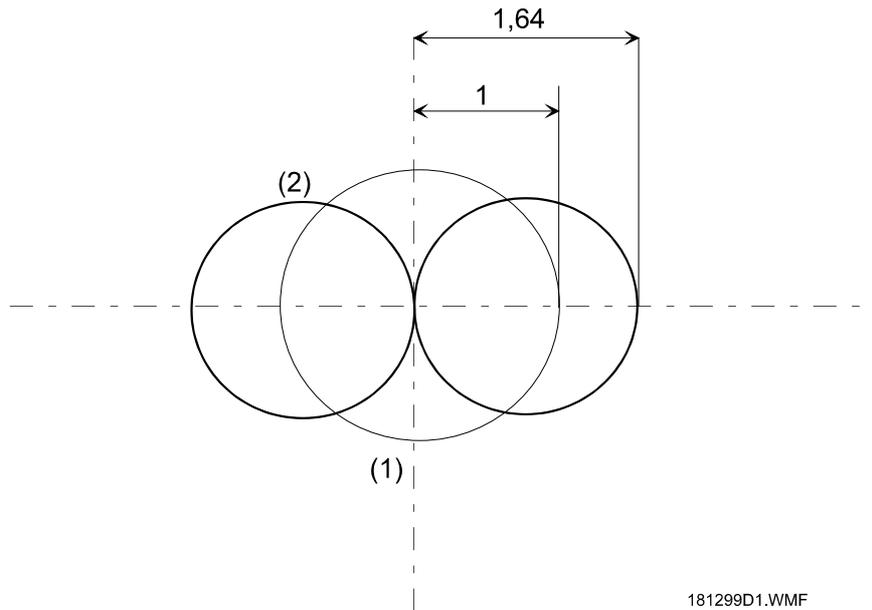
**Figure 8 : Rayonnement d'une antenne isotrope**

Compte tenu du gain de l'antenne, la densité de puissance dans la direction où le gain d'antenne est maximum est donné par l'expression (8) dans laquelle P a été remplacée par P.G :

$$S = \frac{P \cdot G}{4 \pi d^2} \quad (10)$$

avec :

d : distance par rapport à l'antenne (en m)



**Figure 9 : Diagramme de rayonnement d'une antenne isotrope (courbe 1) et d'une antenne dipôle demi-onde (courbe 2)**

D'autre part, dans le cas d'une onde plane (c'est-à-dire en champ lointain), les champs électrique, magnétique et la densité de puissance sont liés entre eux par la relation (6) :

$$S = E H = \text{Erreur !} = 377 H^2 \quad (6)$$

de laquelle on déduit que :

$$E = \sqrt{377 S} \quad (11)$$

En combinant les relations (10) et (11), on obtient l'expression suivante donnant le champ électrique en fonction de la puissance émise, du gain de l'antenne et de la distance.

$$E = \frac{1}{d} \sqrt{30 P \cdot G} \quad (12)$$

Il y a également lieu de tenir compte qu'une antenne-relais rayonne, en général, plusieurs porteuses. Par conséquent les expressions (11) et (12) deviennent :

$$S = \text{Erreur !} \quad (13)$$

$$E = \frac{1}{d} \sqrt{30 P \cdot N_{\text{porteuse}} \cdot G} \quad (14)$$

avec :

$Nb_{\text{porteuse}}$  : nombre de porteuses rayonnées par l'antenne

Les expressions (13) et (14) fournissent, respectivement, la densité de puissance et le champ électrique lorsque les 8 "time slots" de toutes les porteuses sont utilisés.

## **6. DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT DES ANTENNES**

Selon le type de cellule, les opérateurs utilisent des antennes qui sont, soit omnidirectionnelles, soit directives.

### **a. Antennes omnidirectionnelles**

Ces antennes émettent la même énergie dans toutes les directions du plan horizontal ; elles sont constituées d'un réseau de dipôles et ont l'aspect d'un barreau vertical.

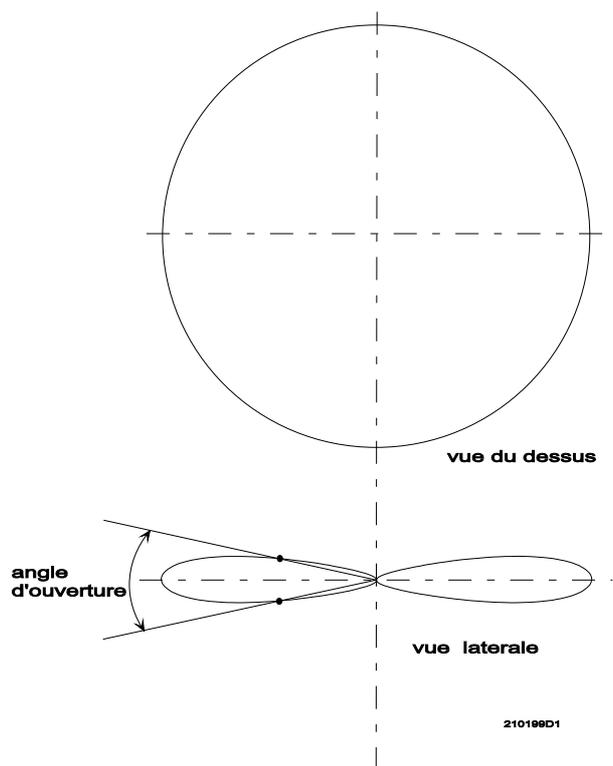
### **b. Antennes directives**

Ces antennes concentrent l'énergie dans une partie du plan horizontal. Dans ce cas, plusieurs antennes (généralement 2 ou 3) sont installées sur un même site (pylône ou bâtiment), de manière à couvrir les différentes directions. Ces antennes sont constituées de panneaux rectangulaires.

Les antennes sont caractérisées par leurs diagrammes de rayonnement, qui représentent leur gain dans les différentes directions de l'espace.

A titre d'exemple, la figure 10 représente les diagrammes de rayonnement dans les plans horizontal (en haut) et vertical (en bas) d'une antenne omnidirectionnelle utilisée couramment en mobilophonie. Ce diagramme montre que le rayonnement est "concentré" autour de la direction horizontale.

On définit l'angle d'ouverture de l'antenne comme étant l'angle dans lequel le gain est supérieur à la moitié du gain maximal. En téléphonie mobile, on cherche à obtenir un angle d'ouverture, dans le plan vertical, qui soit le plus faible possible, de manière à concentrer la puissance dans la direction horizontale. On peut considérer que les antennes omnidirectionnelles utilisées en mobilophonie ont un angle d'ouverture compris entre 7 et 15° et un gain maximum qui ne dépasse pas 10 ou 12 (10 à 11 dBi).



**Figure 10 : Diagrammes de rayonnement d'une antenne omnidirectionnelle dans les plans horizontal (en haut) et vertical (en bas)**

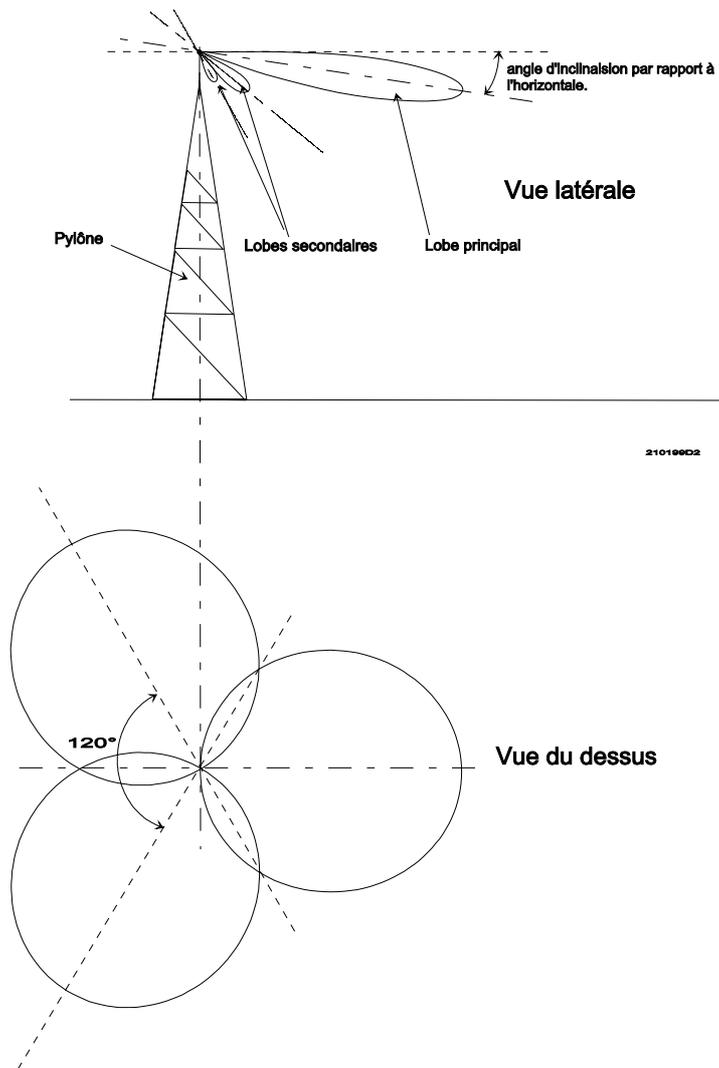
La figure 11 illustre le cas d'un pylône équipé de 3 antennes directives orientées à  $120^\circ$  l'une par rapport à l'autre. L'angle d'ouverture dans le plan horizontal est de plusieurs dizaines de degrés, de manière à couvrir un secteur suffisamment large. Dans le plan vertical, l'angle d'ouverture est généralement compris entre  $6$  et  $10^\circ$ , selon le modèle d'antenne.

Le gain maximum d'une antenne directive peut atteindre  $70$  ( $18,5$  dBi). Le gain est nettement plus faible en dehors de l'angle d'ouverture et est inférieur à l'unité derrière l'antenne.

De manière à optimiser la couverture radio, le lobe principal d'une antenne directionnelle peut être légèrement incliné vers le bas (comme le montre la figure 11). Cet angle d'inclinaison est appelé "angle de tilt", et est obtenu en inclinant le panneau par rapport à la direction verticale ("tilt mécanique") ou résulte du principe de construction de l'antenne ("tilt électrique").

Il faut aussi mentionner l'existence de lobes secondaires (voir également figure 11), qui produisent une augmentation locale de champ dans des directions non souhaitées. Toutefois, le gain maximum correspondant à ces lobes secondaires est au moins  $10$  ou  $20$  fois inférieur au gain du lobe principal.

La forme du diagramme de rayonnement, le gain maximum et l'angle de tilt, influencent fortement le champ électromagnétique et sa répartition autour de l'antenne.



**Figure 11 : Diagrammes de rayonnement d'une antenne directionnelle dans les plans vertical (en haut) et horizontal (en bas)**

Il est important de préciser que les diagrammes de rayonnement fournis par le constructeur d'antennes ne sont, en principe, valables qu'au-delà d'une certaine distance de l'antenne donnée par la relation :

$$d_L = \text{Erreur !} \quad (15)$$

avec :

$d_L$  : distance limite (en m)

$D$  : plus grande dimension de l'antenne (en m)

$\lambda$  : longueur d'onde de la porteuse (en m)

En dessous de cette distance limite, le champ subit de fortes variations d'un point à un autre, selon que les contributions des différents éléments de l'antenne s'additionnent ou s'annulent mutuellement. On notera, par ailleurs, que la relation (15) est identique à la relation (3) qui donne la distance à partir de laquelle on peut considérer que l'onde est plane et qui est d'une

vingtaine de mètres pour les antennes directives courantes. A des distances inférieures à 20 m, les formules (13) et (14) ne fournissent que des valeurs moyennes (c'est-à-dire où les variations sont "lissées"). L'expérience montre qu'au-delà d'une quinzaine de mètres dans le faisceau (c'est-à-dire face à l'antenne), les variations de champs deviennent moins importantes et les relations (13) et (14) fournissent une valeur qui est assez proche de la valeur réelle.

## **7. DIVERSITÉ D'ANTENNES ET DIVERSITÉ DE POLARISATIONS**

Pour améliorer la réception au niveau de la station de base, une technique couramment utilisée consiste à capter les émissions des portables au moyen de deux antennes par cellule, au lieu d'une seule. La station de base sélectionne le signal qui présente la meilleure qualité. Pour être efficace, il faut que la distance entre les deux antennes soit au moins de quelques longueurs d'onde. Cette technique porte le nom de "diversité d'antennes". Dans le cas d'un site couvrant trois secteurs, tel que celui de la figure 11, le nombre d'antennes passe de 3 à 6, toutefois, la diversité d'antennes agit uniquement en réception et n'augmente pas le champ émis.

Une autre technique, appelée "diversité de polarisations", consiste à utiliser une antenne de réception qui est sensible à deux directions de polarisation orthogonales entre elles. Une telle antenne est constituée de 2 réseaux de dipôles : le premier réseau capte la composante du champ électrique orientée à  $-45^\circ$  par rapport à la verticale et le second capte la composante à  $+45^\circ$ . La diversité de polarisation n'augmente pas non plus le champ émis par l'antenne. Diversité d'antennes et diversité de polarisations peuvent également être combinées pour améliorer la qualité de la réception.

## CHAPITRE 3

### METHODE DE TRAVAIL

Les mesures avaient pour but de connaître les niveaux de champ à proximité des antennes-relais afin de les comparer avec les normes ou recommandations internationales et d'identifier les éventuelles "zones à risques". La comparaison entre les champs émis par des antennes-relais de mobilophonie et ceux produits par les émetteurs de radiodiffusion présente également un intérêt évident; c'est dans ce but que des mesures près d'un tel émetteur ont été réalisées. Les implantations d'antennes à proximité desquelles des mesures ont été réalisées ont été choisies en fonction des critères suivants :

**a. Représentativité**

Les sites choisis sont représentatifs des implantations les plus courantes, c'est-à-dire :

- sur un pylône spécifique
- sur un château d'eau
- sur le toit ou la façade d'un bâtiment

Bien qu'actuellement les opérateurs utilisent presque exclusivement des antennes directionnelles, un site équipé d'une antenne omnidirectionnelle a également fait l'objet de mesures.

**b. Bandes de fréquences**

Les sites ont été choisis de manière à inclure les deux bandes de fréquences utilisées, c'est-à-dire 900 MHz (GSM) pour les opérateurs PROXIMUS et MOBISTAR, d'une part, et 1.800 MHz (DCS 1800) pour l'opérateur KPN-ORANGE, d'autre part.

**c. Accessibilité**

Les mesures requièrent des équipements lourds et encombrants. Par conséquent, les sites ont également été choisis en fonction des conditions d'accès.

D'autre part, de manière à effectuer certaines mesures difficilement réalisables sur des sites réels, 3 antennes (2 modèles directionnels pour les fréquences de 900 et 1.800 MHz et 1 modèle pour micro-cellule) ont été installées, par nos soins, sur le terrain de l'ISSeP.

Des mesures ont été réalisées autour de 7 sites (dont 2 accueillent 2 opérateurs), auxquels il faut ajouter celles réalisées avec 3 autres antennes installées à l'ISSeP. Les résultats présentés dans cette étude concernent un total de 23 antennes réparties sur les différents sites.

De manière à garantir l'objectivité des résultats, les sites ont été choisis par l'ISSeP en concertation avec la D.G.R.N.E. Les opérateurs n'ont été informés de ces choix qu'après que les mesures aient été réalisées.

Il est important de préciser que le nombre de fréquences (et donc la puissance) qu'une antenne peut émettre est déterminé pour faire face aux pointes de trafic (qui, sur une journée, ne se produisent que pendant des périodes relativement courtes). La méthode de mesures, que nous avons mise au point, permet de déterminer le champ électromagnétique correspondant à la puissance maximale que peut émettre l'antenne. Le champ ainsi mesuré est largement supérieur à la valeur moyenne calculée sur une durée de 24 h. En effet, le trafic est relativement faible pendant les heures creuses et quasiment nul pendant la nuit. L'approche que nous avons retenue conduit donc à des valeurs maximales qui ne seront que très rarement atteintes.

Les principaux résultats et conclusions sont présentés, sous une forme résumée, dans les chapitres 4 à 9. Le lecteur intéressé trouvera les résultats complets, ainsi que la méthode utilisée, dans les annexes de ce rapport. On notera que les annexes 2-1, 2-5 et 2-6 concernent 3 sites où les mesures confirment les résultats présentés dans les chapitres 4 à 9. Nous présenterons tout d'abord les résultats relatifs à 2 implantations sur château d'eau (chapitres 4 et 5). Ensuite, nous présenterons les résultats qui concernent les antennes installées sur des bâtiments (chapitres 6 et 7) avec, notamment, des valeurs de champ mesurées à l'intérieur. Nous terminerons par une présentation des résultats des mesures complémentaires effectuées autour des antennes installées à l'ISSeP (chapitres 8 et 9). Les résultats des mesures de champs réalisées à proximité de l'émetteur de radio et de télévision de la RTBF du Bol d'Air sont présentés au chapitre 10.

Le tableau 1, ci-joint, donne le numéro du chapitre et de l'annexe où les sites sont traités.

**Tableau 1**  
*Liste des chapitre et annexe correspondant à chaque site traité*

Type d'implantation	Opérateur	Type d'antennes	Chapitre	Annexe
Pylône - Ougrée	MOBISTAR	3 directives	-	2-1
Château d'eau -Méan	PROXIMUS MOBISTAR	3 directives 2 directives	4	2-2
Château d'eau – Soheit-Tinlot	PROXIMUS KPN-ORANGE	3 directives 3 directives	5	2-3 2-4
Toit bâtiment - Seraing	PROXIMUS	6 directives	6	2-7
Façades bâtiment - Liège	PROXIMUS	6 directives	7	2-8
Antenne 900 MHz - ISSeP	-	directive	8	-
Antenne 1.800 MHz -ISSeP	-	directive	9	-
Antenne 900 MHz - ISSeP	-	microcell	10	2-9
Pylône - Horion-Hozémont	KPN-ORANGE	2 directives	-	2-5
Toit bâtiment - Ocquier	PROXIMUS	omnidirectionnelle	-	2-6
Radio-TV - Ougrée	RTBF	directives et omnidirectionnelles	11	-

## CHAPITRE 4

### ANTENNES PROXIMUS ET MOBISTAR IMPLANTÉES SUR LE CHÂTEAU D'EAU DE MEAN

Des mesures de champs ont été réalisées à proximité du château d'eau de Méan, sur lequel sont installées 3 antennes de l'opérateur PROXIMUS et de 2 antennes de l'opérateur MOBISTAR (figure 1). Toutes ces antennes sont du type directionnel. Les 2 antennes MOBISTAR sont fixées aux parois extérieures, dans des positions diamétralement opposées. Les 3 antennes PROXIMUS se trouvent sur un mât implanté sur le toit du château et sont orientées suivant 3 directions à 120°. Une des antennes PROXIMUS est orientée dans la même direction qu'une des antennes MOBISTAR (c'est-à-dire suivant l'axe ABC de la figure 2), par conséquent, c'est dans cette direction que le champ devrait être le plus élevé.

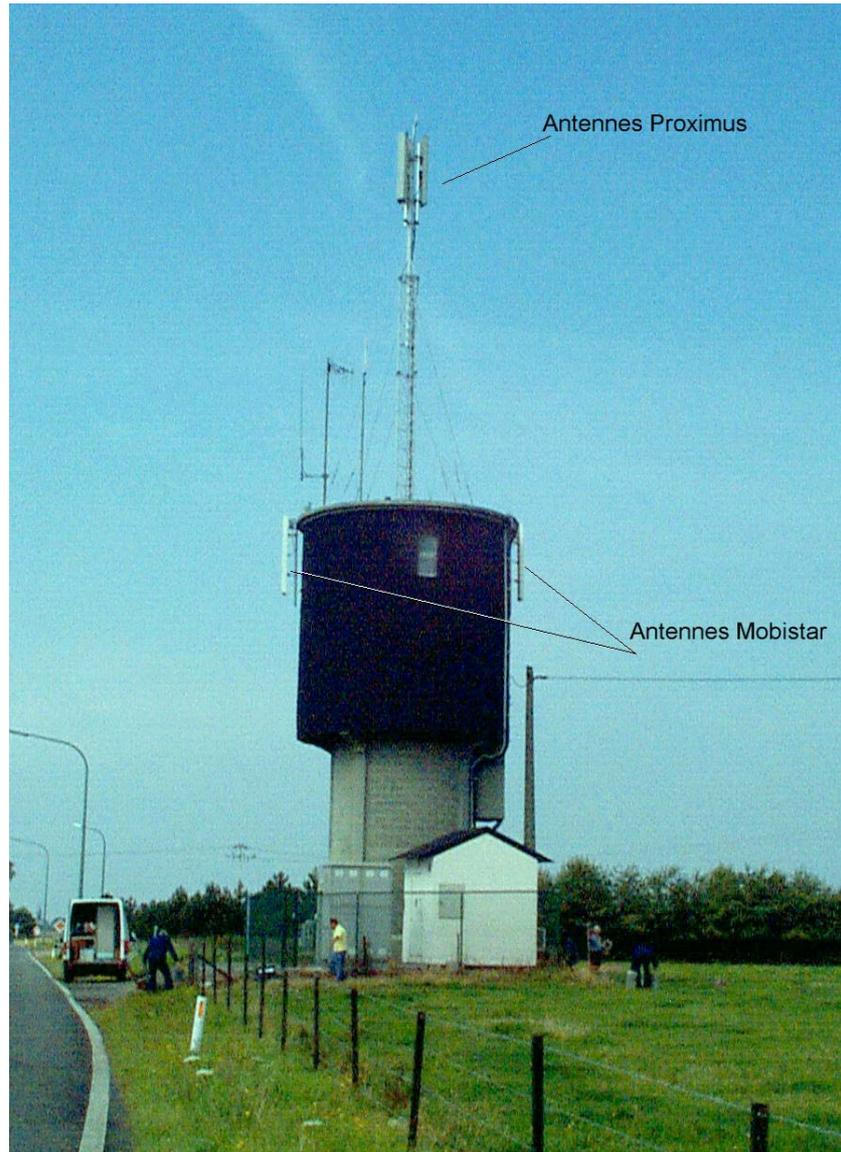
Les caractéristiques des antennes, communiquées par les deux opérateurs, sont les suivantes :

#### a. PROXIMUS

- antenne directionnelles RACAL de type RA1697
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan horizontal : 60°
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan vertical : 9°
- gain maximum : 50 (17 dBi)
- polarisation croisée (- 45° et + 45°)
- angle de tilt mécanique : 0°
- angle de tilt électrique : - 4°
- puissance par porteuse à l'entrée de l'antenne : 4 W (36 dBm)
- hauteur du milieu de l'antenne par rapport au sol : 21 m
- nombre de porteuses : 2 par antenne

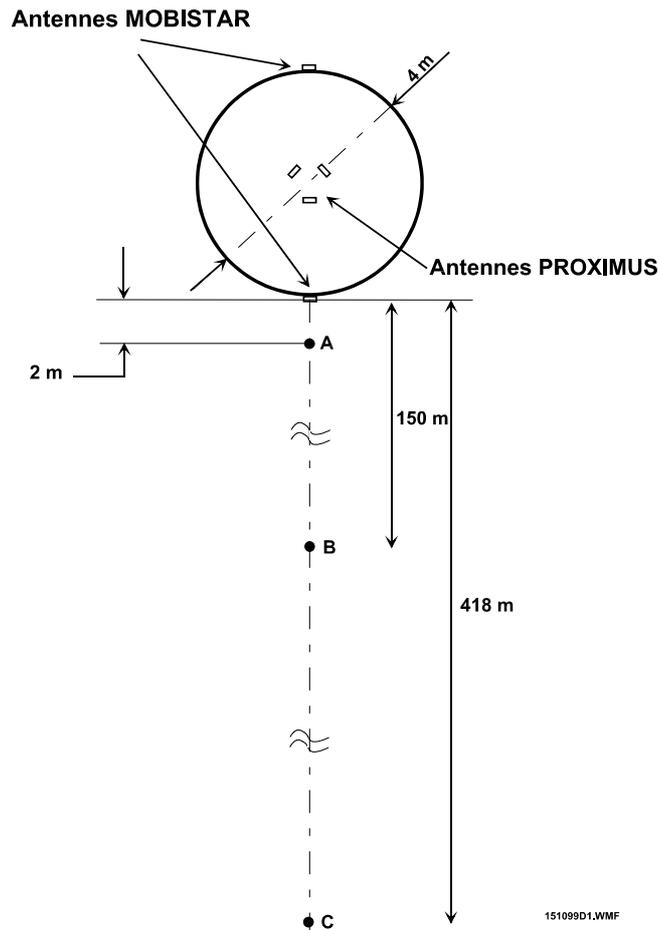
#### b. MOBISTAR

- antenne directionnelles DAPA de type 3950-010
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan horizontal : 65°
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan vertical : 8,5°
- gain maximum : 56 (17,5 dBi)
- polarisation verticale
- angle de tilt mécanique : 0°
- puissance par porteuse à l'entrée de l'antenne : 5 W (37 dBm)
- hauteur du milieu de l'antenne par rapport au sol : 13,5 m
- nombre de porteuses : 2 par antenne



*Figure 1 : Vue du site*

Des mesures de champs en fonction de la distance ont été réalisées à 2 fréquences, l'une émise par PROXIMUS à 951,6 MHz et l'autre par MOBISTAR à 943,2 MHz, le long du parcours ABC de 418 m de longueur (figure 2) qui se trouve dans la direction du champ maximum. Le point A était situé à 2 m du pied du château. L'antenne de mesure se trouvait à 2,5 m du sol et le signal reçu était mesuré tous les 2 cm.

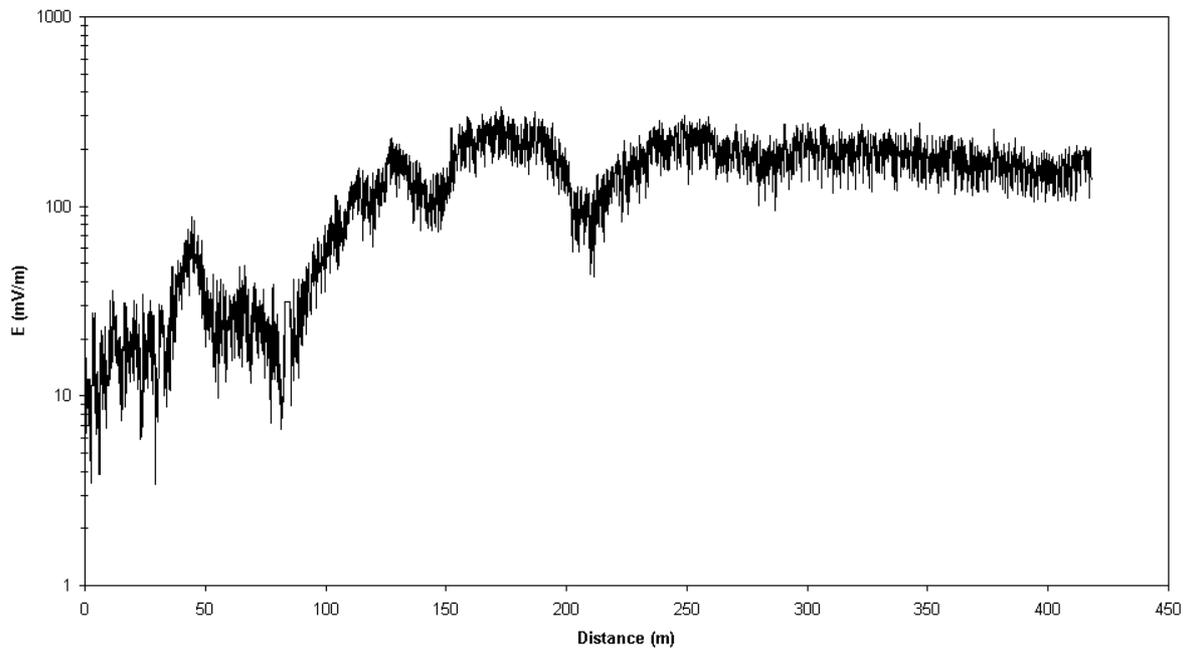


**Figure 2 : Trajet de mesure**

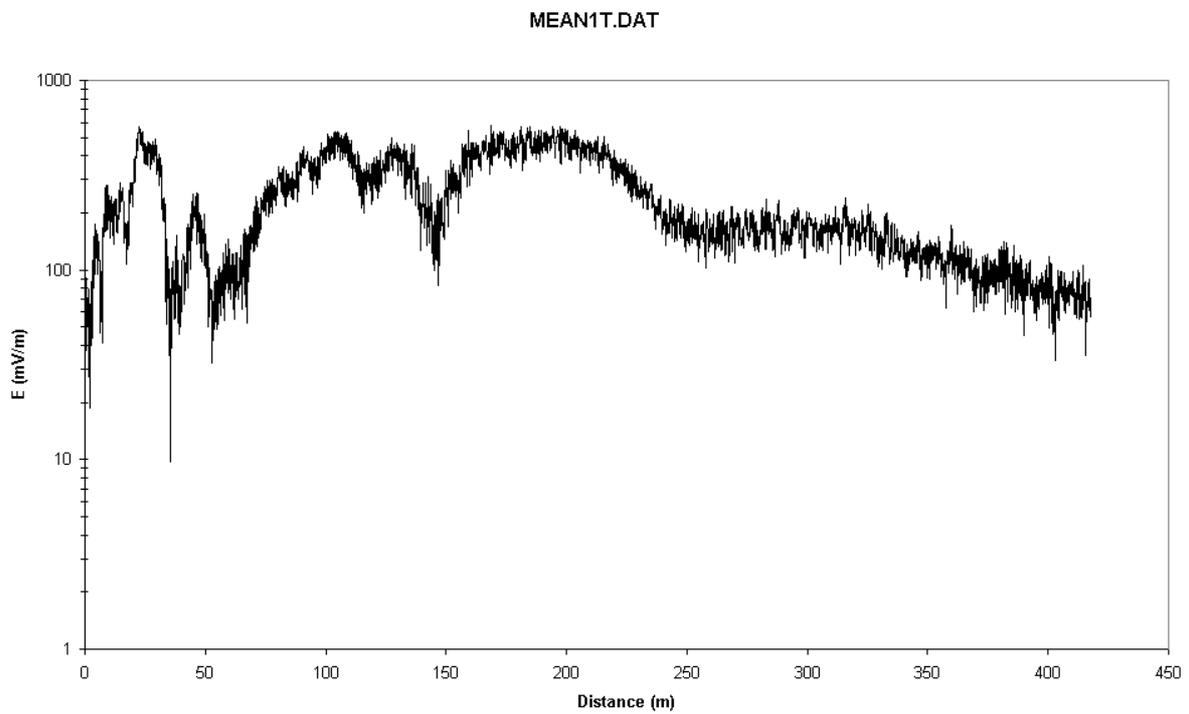
Les figures 3 et 4 représentent la variation du champ électrique, exprimé en mV/m, respectivement aux fréquences de 951,6 MHz (PROXIMUS) et 943,2 MHz (MOBISTAR) sur la distance 418 m (parcours AC).

L'examen de la figure 3 (PROXIMUS) montre que le champ augmente entre 0 et 40 m, décroît entre 40 et 90 m, et puis remonte pour atteindre un maximum à environ 175 m, ensuite, on assiste à une lente décroissance. Le signal maximum est de 0,31 V/m à 175 m du point de départ.

La figure 4 (MOBISTAR) montre une variation du signal assez semblable. En effet, un premier maximum est atteint après 25 m, et puis le signal décroît rapidement et ensuite remonte pour atteindre un second maximum à une centaine de mètres du point de départ. Ces deux maxima sont de l'ordre de 0,56 V/m. Le fait que les antennes ne soient pas à la même hauteur explique en partie cette différence de profil du champ. Le tableau 1 donne les résultats des calculs pour chaque opérateur. Les deuxième et quatrième colonnes donnent respectivement les valeurs du champ (en V/m) et de la densité de puissance (en mW/m<sup>2</sup>) pour 1 porteuse. Les troisième et cinquième colonnes fournissent ces mêmes grandeurs pour 2 porteuses (le champ électrique est multiplié par  $\sqrt{2}$  et la densité de puissance est doublée). La dernière colonne indique la distance à laquelle ce maximum a été obtenu.



*Figure 3 : Champ à la fréquence de 951,6 MHz (PROXIMUS) entre A et C*



*Figure 4 : Champ à la fréquence de 943,2 MHz (MOBISTAR) entre A et C*

**Tableau 1**  
**Champ électrique et densité de puissance maximum entre 0 et 420 m**  
**dans la direction du champ maximum et en polarisation verticale**

Opérateur	$E_{\max}$ (V/m)		$S_{\max}$ (mW/m <sup>2</sup> )		Distance champ max. (m)
	1 porteuse	2 porteuses	1 porteuse	2 porteuses	
PROXIMUS	0,31	0,44	0,25	0,50	175
MOBISTAR	0,56	0,79	0,83	1,66	25 et 100

Il faut préciser que les valeurs du tableau 1, constituent des maxima qui ne seront que très rarement atteints pour plusieurs raisons :

- les maxima ont été obtenus à des distances de 25, 100 et 175 m. Les champs sont inférieurs sur le reste du trajet de 418 m
- les valeurs de densité de puissance pour deux porteuses ne sont atteintes que lorsque l'antenne est utilisée à sa pleine capacité, c'est-à-dire 15 communications simultanées, dans ce cas particulier

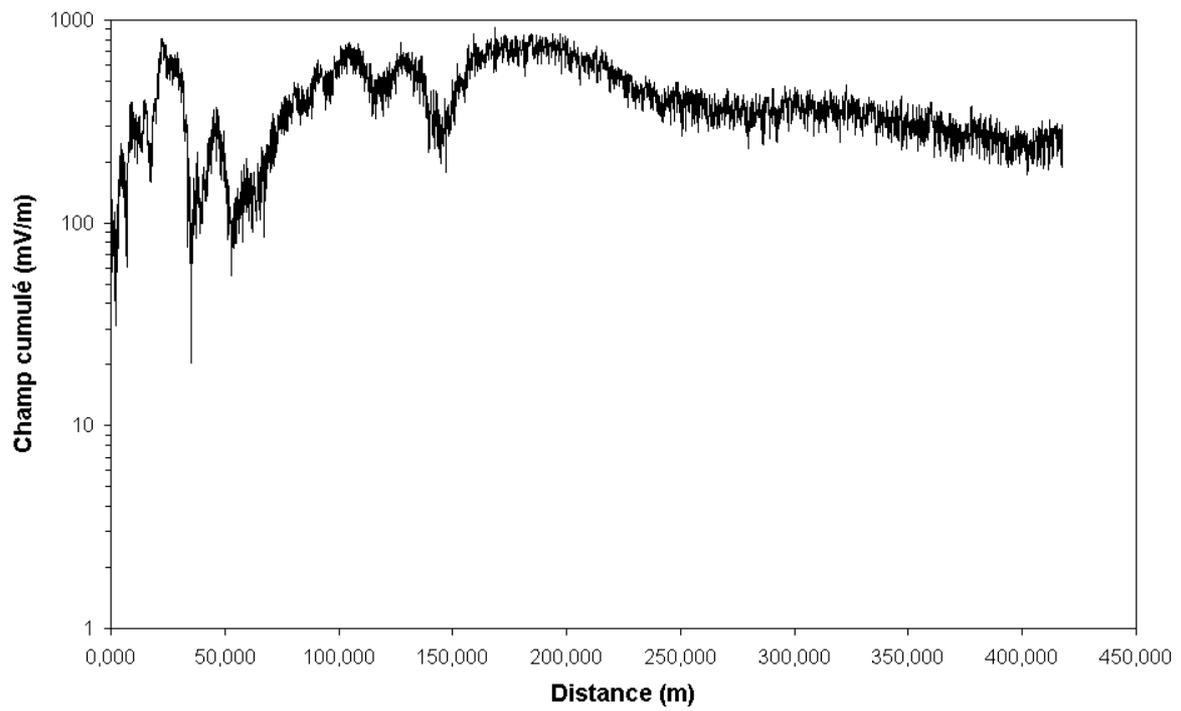
Deux opérateurs occupant le même site, il y a lieu de cumuler les champs produits par l'antenne PROXIMUS et l'antenne MOBISTAR. Ce cumul est présenté à la figure 5; il est obtenu en calculant la racine carrée de la somme des carrés des champs aux deux fréquences; la somme est multiplié par  $\sqrt{2}$  pour tenir compte que chaque antenne a une capacité de deux porteuses.

La figure 5 montre que le champ maximum cumulé, lorsque les 4 porteuses sont présentes (2 pour chaque opérateur), atteint 0,85 V/m à 25 m, à 100 m et entre 150 et 200 m.

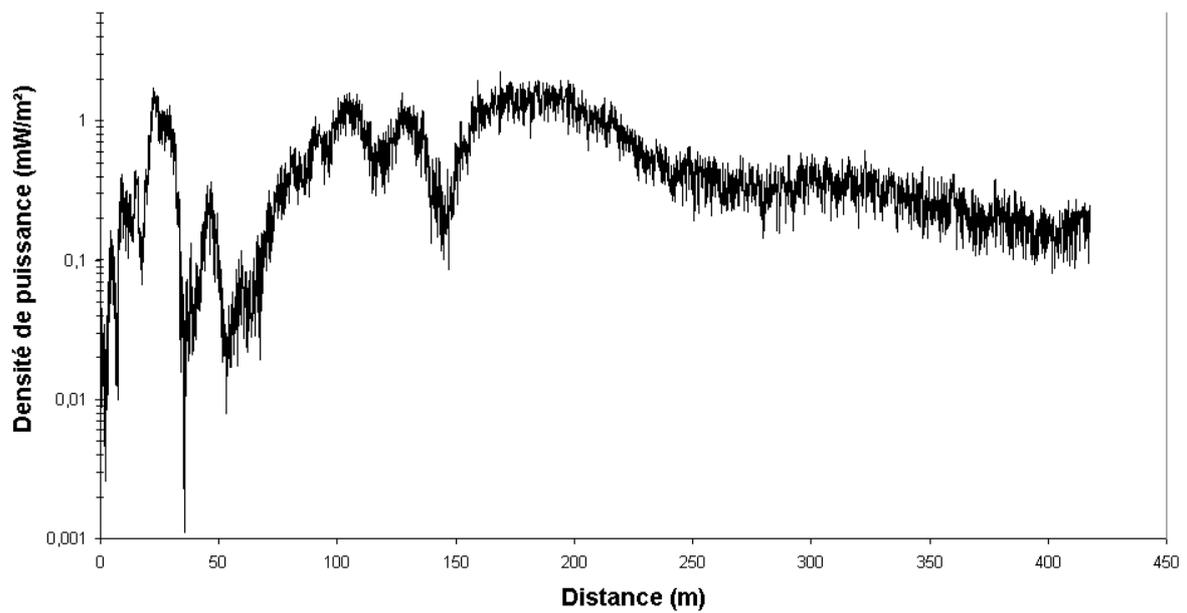
La figure 6 représente la densité de puissance cumulée également lorsque les 4 porteuses sont présentes; on note qu'elle est toujours inférieure à 2 mW/m<sup>2</sup>.

Compte tenu de la variation du trafic au cours d'une journée, la densité moyenne sur une période de 24 h ne dépasse pas 1 mW/m<sup>2</sup>, même aux endroits où le champ est maximum.

Il est intéressant de comparer cette valeur de 2 mW/m<sup>2</sup> avec les densités de puissance maximales selon plusieurs recommandations reprises dans le tableau 1 du chapitre 1. Cette comparaison montre que la densité de puissance maximale est 12 fois inférieure à la Recommandation UCL-FPMs; elle est le double de la Recommandation CHERRY – SANTINI (1 mW/m<sup>2</sup>).



*Figure 5 : Champ cumulé (correspondant à 2 porteuses par opérateur), à 2 m du sol*



*Figure 6 : Densité de puissance cumulée (correspondant à 2 porteuses par opérateur), à 2 m du sol*

Les valeurs maximales du champ électrique et de la densité de puissance présente autour de ce site et à 2,5 m du sol sont donc très faibles, car on se trouve en dehors du faisceau de l'antenne (ceci est dû au fait que les antennes ont, dans le plan vertical, un angle d'ouverture très étroit).

Lorsqu'on s'éloigne de l'antenne, l'augmentation de la distance n'implique pas immédiatement une diminution du champ, car on "rentre" dans le faisceau. Une diminution n'est observée qu'au-delà de 200 m.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité de prendre en compte la hauteur de l'antenne par rapport aux terrains aux alentours et par rapport aux sommets des immeubles voisins.

Les mesures ont également montré que les champs produits par les antennes dirigées dans les autres secteurs étaient tout à fait négligeables dans la direction ABC indiquée à la figure 2.

Des mesures similaires ont été réalisées à proximité du château d'eau de de Soheit-Tinlot; elles sont présentées au chapitre 5.

## CHAPITRE 5

### ANTENNES PROXIMUS ET KPN-ORANGE IMPLANTÉES SUR LE CHÂTEAU D'EAU DE SOHEIT-TINLOT

Des mesures de champ électromagnétique ont été réalisées à proximité du château d'eau de Soheit-Tinlot sur lequel sont installées 6 antennes (figure 1) ; 3 appartiennent à l'opérateur PROXIMUS et 3 à l'opérateur KPN-ORANGE; toutes ces antennes sont du type directionnel. Les antennes PROXIMUS sont maintenues par de petits mâts au bord du toit, tandis que celles de KPN-ORANGE sont installées sur une tourelle centrale; ces antennes (numérotées de 1 à 3) sont orientées suivant les 3 directions indiquées à la figure 2.

Les caractéristiques des antennes, communiquées par les deux opérateurs, sont les suivantes :

#### a. PROXIMUS

- antennes directionnelles KATHREIN de type 739655
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan horizontal : 90°
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan vertical : 9°
- gain maximum : 35,5 (15,5 dBi)
- polarisation croisée
- angle de tilt mécanique : - 4° pour l'antenne n° 1 et - 3° pour les antennes n° 2 et n° 3
- angle de tilt électrique : 0°
- puissance à l'entrée de l'antenne : 4 W (36 dBm)
- hauteur du milieu de l'antenne par rapport au sol : 24 m
- nombre de porteuses : 2 par antenne

#### b. KPN-ORANGE

- antennes directionnelles KATHREIN de type 739494
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan horizontal : 65°
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan vertical : 6,5°
- gain maximum : 63 (18 dBi)
- polarisation croisée
- angle de tilt mécanique : 0°
- angle de tilt électrique : 0°
- puissance à l'entrée de l'antenne : 6,3 W
- hauteur du milieu de l'antenne par rapport au sol : 27 m
- nombre de porteuses : 1 par antenne



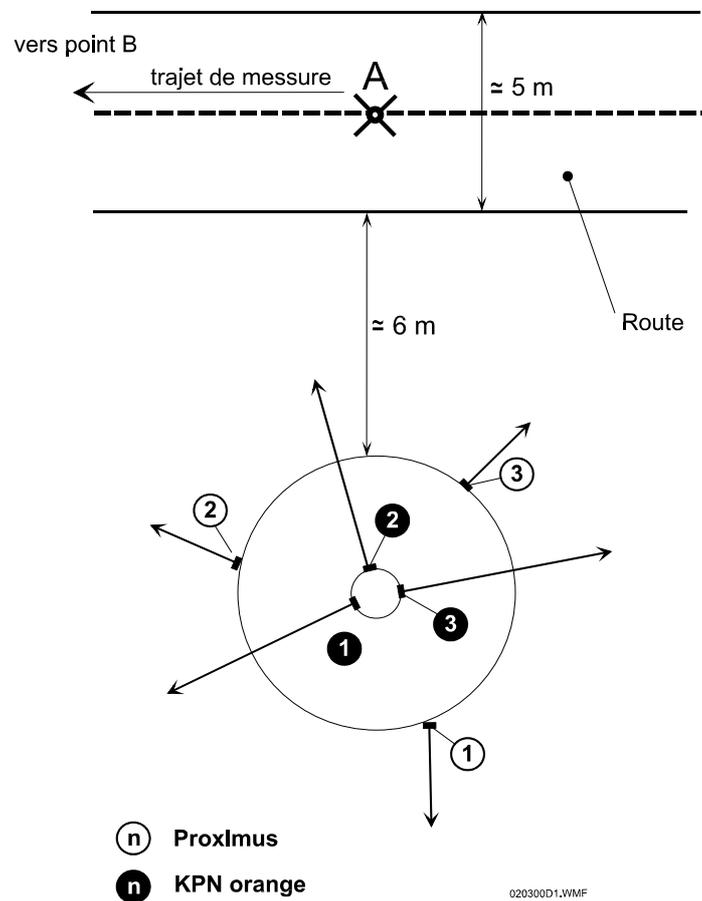
*Figure 1 : Vue du site*

Le champ rayonné par les antennes des 2 opérateurs a été mesuré le long de la route menant au château; ce trajet de mesure est à peu près rectiligne et est représenté sur le plan de la figure 3; il démarre juste en face du château (point A) et se termine en face de l'église (point B). Ce trajet est en vue directe des 6 antennes et se trouve :

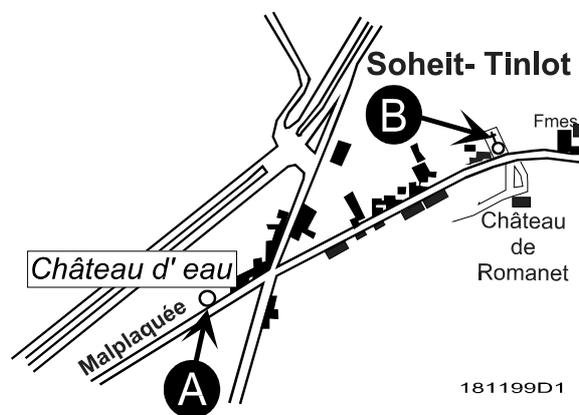
- dans le faisceau de l'antenne PROXIMUS n° 2
- dans le faisceau de l'antenne KPN-ORANGE n° 2 sur une vingtaine de mètres
- dans le faisceau de l'antenne KPN-ORANGE n° 1 au-delà d'une vingtaine de mètres

Des mesures du champ rayonné par les antennes PROXIMUS ont également été effectuées sur le toit du château, à proximité des antennes. Ces résultats sont présentés dans l'annexe 2-3.

Le champ a été mesuré tous les 14 cm à une hauteur de 3 m du sol (antenne de réception placée sur le toit du véhicule de mesure).



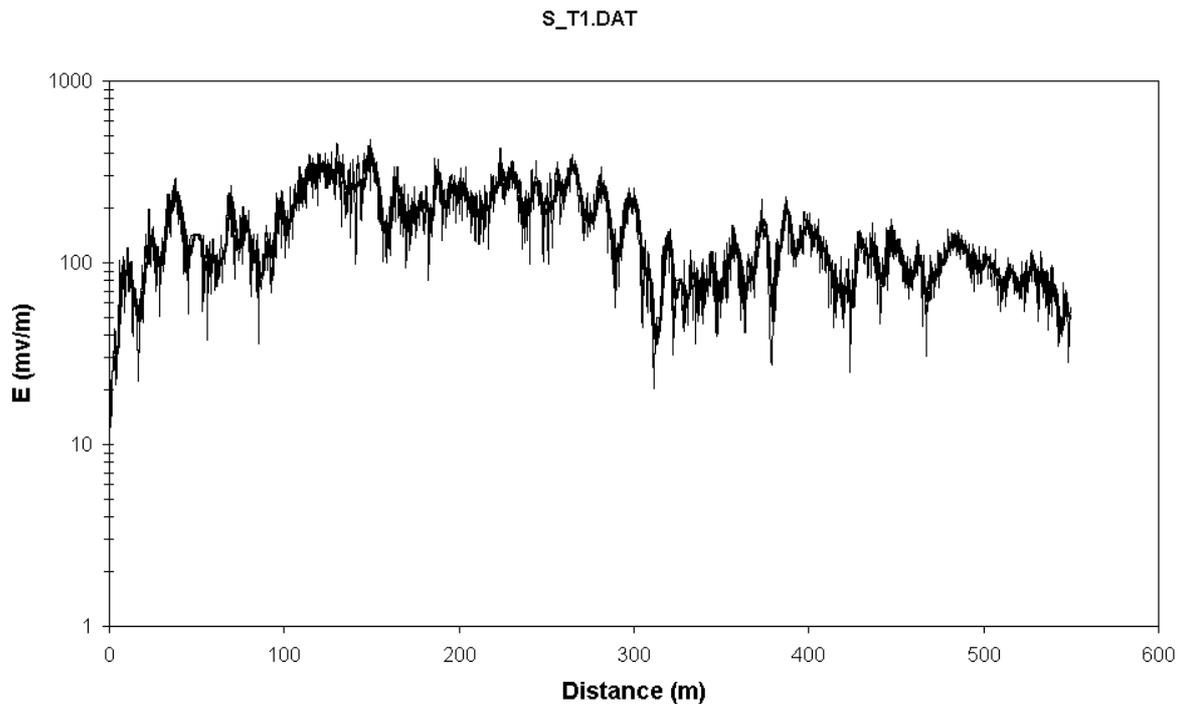
*Figure 2 : Orientation des antennes par rapport à la route*



*Figure 3 : Plan de Soheit-Tinlot*

La figure 2 indique que l'antenne PROXIMUS n° 1 rayonne dans une direction perpendiculaire à l'axe de la route; le champ produit par cette antenne atteint un maximum de 0,08 V/m à 200 m du château et diminue au-delà de 300 m.

Le faisceau de l'antenne PROXIMUS n° 2 englobe l'axe de la route. La figure 4 représente l'évolution du champ en mV/m, le long du trajet de mesure, à la fréquence de 952,6 MHz rayonnée par cette antenne. On constate que le champ est maximum à des distances comprises entre 100 et 300 m; la valeur maximale à cette fréquence est de 0,45 V/m.



**Figure 4 : Champ à la fréquence de à 952,6 MHz (antenne PROXIMUS n° 2), à 3 m du sol**

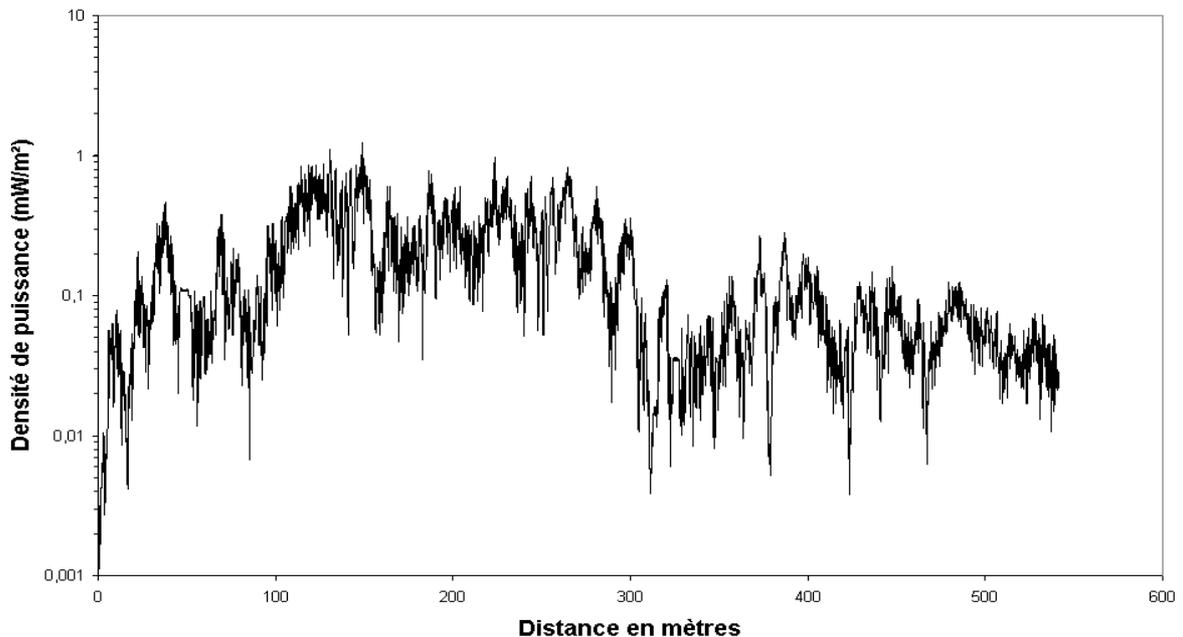
L'antenne PROXIMUS n° 3 rayonne dans la direction opposée à celle du trajet de mesure. Le champ maximum mesuré, pour cette antenne, est de 0,08 V/m et se produit au pied du château.

Les 3<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> lignes du tableau 1 résument ces résultats pour les 3 antennes PROXIMUS. Les deuxième et quatrième colonnes donnent, respectivement, les valeurs du champ (en V/m) et de la densité de puissance (en mW/m<sup>2</sup>) pour 1 porteuse. Les troisième et cinquième colonnes fournissent ces mêmes grandeurs pour 2 porteuses (le champ électrique est multiplié par  $\sqrt{2}$  et la densité de puissance est doublée). La dernière colonne indique la distance à laquelle le champ maximum a été mesuré. On remarque que seule l'antenne n° 2, qui est orientée dans la direction du trajet de mesure (figure 2), présente une contribution significative.

**Tableau 1**  
**Champ électrique et densité de puissance maximum**

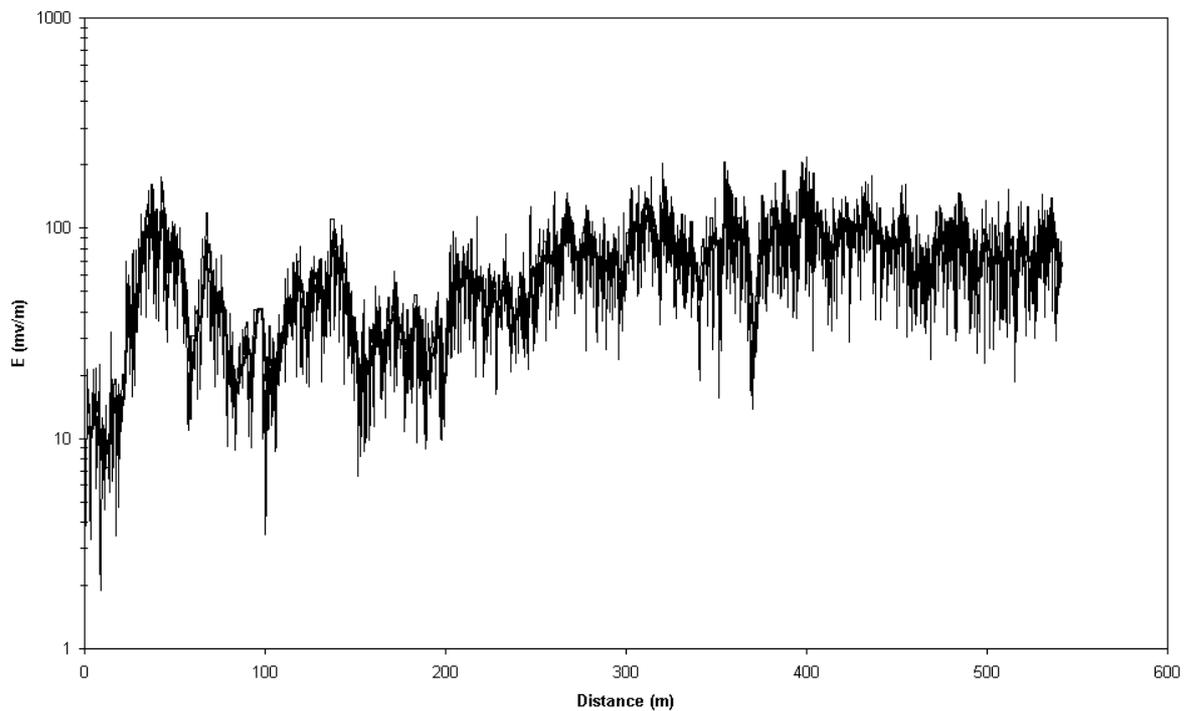
Opérateur	Antenne	$E_{max}$ (V/m)		$S_{max}$ (mW/m <sup>2</sup> )		Distance champ max. (m)
		1 porteuse	2 porteuses	1 porteuse	2 porteuses	
PROXIMUS	1	0,08	0,11	0,02	0,03	200 à 300
PROXIMUS	2	0,45	0,63	0,54	1,07	100 à 300
PROXIMUS	3	0,08	0,11	0,02	0,03	< 10 m
KPN-OR.	1	0,20	0,28	0,10	0,20	40 m et de 300 à 450
KPN-OR.	2	0,14	0,20	0,05	0,10	40
KPN-OR.	3	0,08	0,11	0,02	0,03	40

La figure 5 représente l'évolution, le long du trajet de mesure, de la densité de puissance cumulée lorsque les 3 antennes sont utilisées à leur capacité maximale, c'est-à-dire 15 conversations simultanées chacune. On constate que la densité de puissance maximale de l'ordre de 1 mW/m<sup>2</sup> aux points les plus exposés, c'est-à-dire à des distances comprises entre 100 et 300 m du point de départ. Cette valeur maximale est très faible au regard des diverses normes ou recommandations (tableau 1 du chapitre 1); elle est 24 fois inférieure à la Recommandation de 3 V/m (UCL-FPMs) et est pratiquement égale à la Recommandation CHERRY – SANTINI (1 mW/m<sup>2</sup>). On notera également que les valeurs mesurées sur ce site, et pour cet opérateur, sont du même ordre de grandeur que celle obtenue près du château d'eau de Méan.



**Figure 5 : Densité de puissance cumulée, à 3 m du sol, lorsque les 3 antennes PROXIMUS sont utilisées à leur capacité maximale (15 conversations chacune)**

La figure 6 représente, le long du trajet de mesure, l'évolution du champ en mV/m, à la fréquence de 1.868,2 MHz rayonnée par l'antenne KPN-ORANGE n°1. Un champ maximum de 0,2 V/m est atteint à 40 m du point de départ et ensuite au-delà de 300 m.



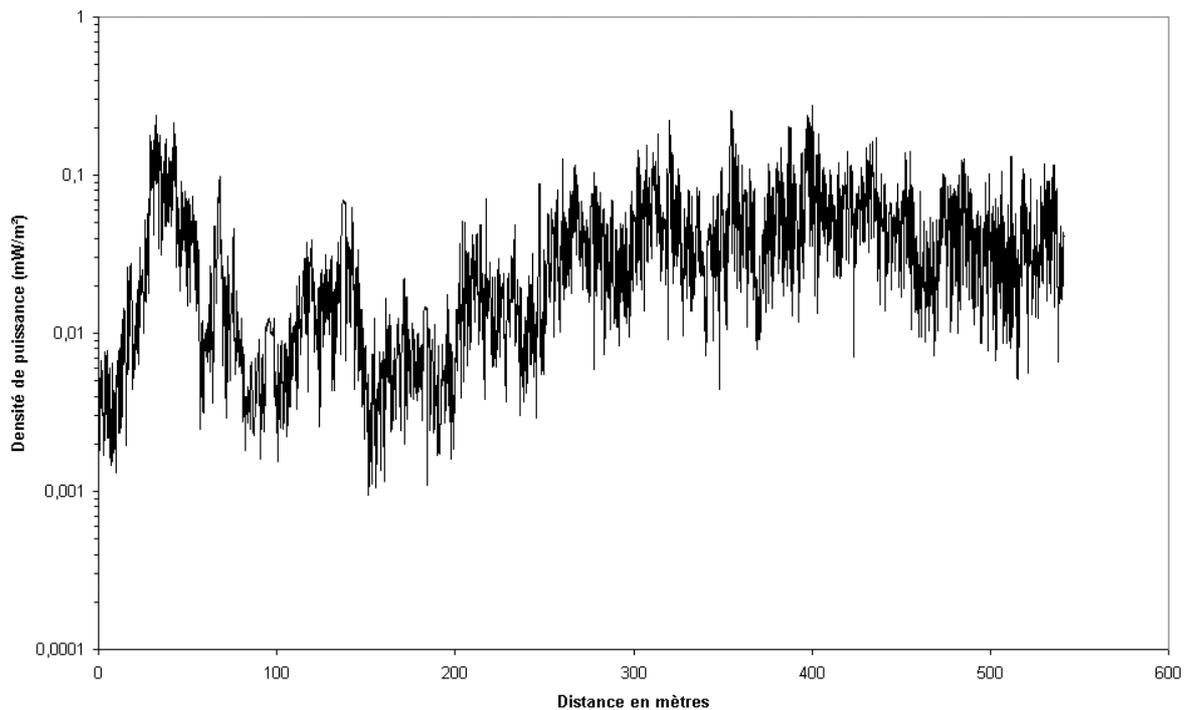
**Figure 6 : Champ à la fréquence de 1868,2 MHz (antenne KPN-ORANGE n° 1), à 3 m du sol**

Les antennes KPN-ORANGE n° 2 et 3 produisent un champ maximum de respectivement 0,14 et 0,08 V/m à 40 m du point de départ. C'est donc l'antenne n° 1 qui produit le champ le plus important, ce qui s'explique par le fait que c'est elle qui couvre le mieux le trajet de mesure.

Les résultats relatifs aux 3 antennes KPN-ORANGE sont résumés dans les 3 dernières lignes du tableau 1; bien que ces 3 antennes ne rayonnent actuellement qu'une seule porteuse chacune, les quatrième et sixième colonnes fournissent, à titre indicatif, les champs électriques et les densités de puissance qui correspondraient à 2 porteuses.

La figure 7 représente l'évolution, le long du trajet de mesure, de la densité de puissance cumulée lorsque les 3 antennes KPN-ORANGE rayonnent chacune deux porteuses permettant 15 conversations simultanées. On constate que la densité de puissance maximale, de l'ordre de 0,2 mW/m<sup>2</sup> aux points les plus exposés, c'est-à-dire à 40 m et entre 300 et 450 m du point de départ. Ce maximum est très faible au regard des diverses normes ou Recommandations (tableau 1 du chapitre 1); il est 120 fois inférieur à la Recommandation de 3 V/m (UCL-FPMs) et est 5 fois inférieur à la Recommandation CHERRY – SANTINI (1 mW/m<sup>2</sup>).

Ces faibles valeurs, tant pour les antennes PROXIMUS que pour celles de KPN-ORANGE, s'expliquent par le fait que les antennes, et par conséquent le faisceau qu'elles rayonnent, se trouvent à une hauteur nettement supérieure au niveau du sol.



**Figure 7 : Densité de puissance cumulée, à 3 m du sol, lorsque les trois antennes KPN-ORANGE sont utilisées à leur capacité maximale (15 conversations chacune)**

Il faut également préciser que les valeurs du tableau 1 ont été établies à partir des maxima mesurés le long des différents trajets. Le champ et la densité de puissance réels seront en général nettement inférieurs pour 2 raisons :

- les figures 5 et 7 montrent que sur une distance de quelques mètres la densité de puissance présente des variations importantes; celles-ci sont dues aux réflexions sur le sol et les bâtiments. Or, le tableau 1 a été établi à partir des valeurs maximales
- lors du calcul des densités de puissance correspondant à 2 porteuses, nous avons supposé que les 3 antennes étaient utilisées à leur capacité maximale (c'est-à-dire 15 conversations simultanées, dans le cas présent). Cette situation ne sera rencontrée que lorsque le trafic atteint la saturation, c'est-à-dire très rarement.

Il est également intéressant de comparer la densité de puissance produite par l'antenne KPN-ORANGE n° 1 avec celle produite par l'antenne PROXIMUS n° 2 qui couvre le trajet de mesure. Le tableau 2 résume les caractéristiques et les principaux résultats de mesures relatifs aux antennes des 2 opérateurs.

La Puissance Apparente Rayonnée (PAR)<sup>6</sup> par porteuse est de 142 W (4 W x 35,5) dans le cas de PROXIMUS et de 400 W (6,3 W x 63) dans le cas de KPN-ORANGE. Bien que la PAR de l'antenne KPN-ORANGE soit 2,8 fois plus élevée que celle de l'antenne PROXIMUS, la densité de puissance (à 3 m du sol) est 5 fois inférieure. Ce résultat, surprenant à première vue, s'explique par la largeur et l'inclinaison du faisceau de l'antenne; en effet, le faisceau de l'antenne PROXIMUS a un angle d'ouverture de 9°, contre seulement 6,5° pour KPN-ORANGE. D'autre part, le faisceau PROXIMUS est incliné de 3°, tandis que celui de l'antenne KPN-ORANGE est parfaitement horizontal. Cette explication est également confirmée par le fait que le champ maximum apparaît entre 100 et 300 m, dans le cas de PROXIMUS, et seulement au-delà de 300 m avec KPN-ORANGE (la crête à 50 m étant due à un lobe secondaire).

Notons également que le trajet de mesure coïncide pratiquement avec la direction du maximum de rayonnement de l'antenne PROXIMUS n° 2; la figure 2 montre que ce n'est pas le cas pour les antennes KPN-ORANGE.

**Tableau 2**

***Comparaison des caractéristiques et des résultats de mesures relatifs aux antennes des deux opérateurs***

<b>Opérateur</b>	<b>N° antenne</b>	<b>Puissance par porteuse (W)</b>	<b>Gain</b>	<b>Angle d'ouverture vertical</b>	<b>Angle de tilt</b>	<b>S<sub>max</sub> pour 2 porteuses (mW/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Distance champ max. (m)</b>
PROXIMUS	2	4	35,5	9°	3°	1,07	100 à 300
KPN-ORANGE	1	6,3	63	6,5°	0°	0,20	50 et de 300 à 450 m

Des mesures de champs ont également été réalisées sur la plate-forme du château d'eau à proximité des antennes PROXIMUS. Les résultats sont présentés dans l'annexe 2-3.

<sup>6</sup> La puissance apparente rayonnée est égale au produit de la puissance injectée et du gain de l'antenne

## CHAPITRE 6

### ANTENNES PROXIMUS IMPLANTEES SUR LE TOIT

#### DE LA RÉSIDENCE MARCHANDISE À SERAING

Des mesures de champs ont été réalisées sur le toit et dans un appartement de la Résidence Marchandise, située rue du Pairay à Seraing et sur laquelle 6 antennes directionnelles de l'opérateur PROXIMUS sont installées. La figure 1 montre les 2 antennes orientées dans la direction Est. Les 6 antennes couvrent 3 secteurs de 120°. Contrairement aux cellules classiques qui ne requièrent qu'une antenne, l'opérateur utilise ici la technique de diversité (décrite au chapitre 2 §7) qui nécessite 2 antennes par cellule. La figure 2 représente une vue en perspective de l'aile Nord du bâtiment. Les antennes n° 1 et n° 4 couvrent une première cellule et les antennes n° 2 et n° 3 couvrent une deuxième. Deux antennes supplémentaires, non représentées sur la figure 2, sont également installées sur l'aile Sud du bâtiment. N'étant pas accessibles, ces deux antennes n'ont pas fait l'objet de mesures.

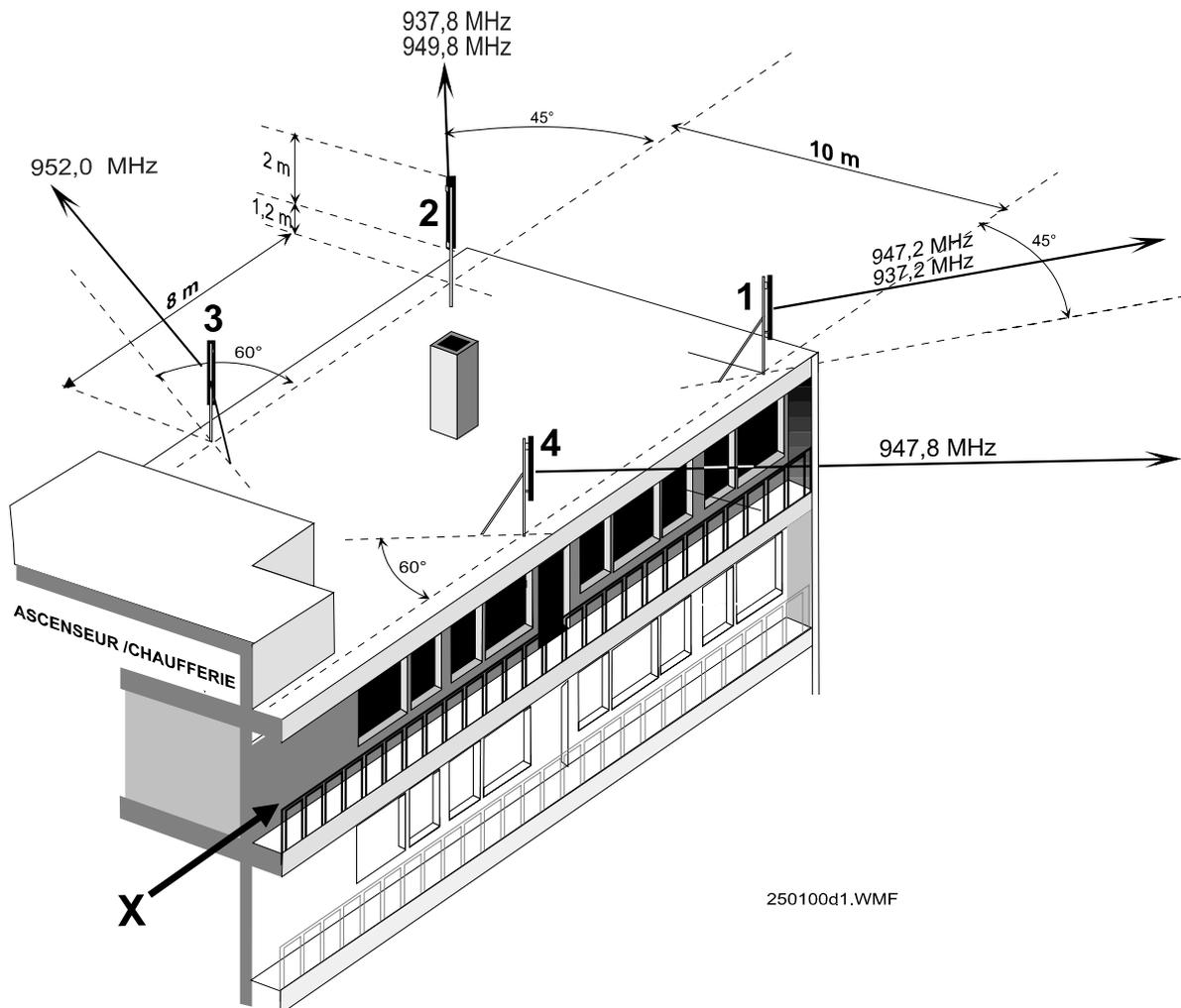


*Figure 1 : Vue du site*

La figure 2 représente également le balcon de l'appartement du dernier étage situé juste sous les antennes n° 1 et n° 4; il est à noter que les dimensions et les angles renseignés sur cette figure ne sont donnés qu'à titre indicatif.

Les caractéristiques des antennes, communiquées par PROXIMUS, sont les suivantes :

- antennes directionnelles KATHREIN de type 730376
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan horizontal :  $65^\circ$
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan vertical :  $6,5^\circ$
- gain maximum : 70 (18,5 dBi)
- polarisation verticale
- angle de tilt mécanique :  $-3^\circ$
- angle de tilt électrique :  $0^\circ$
- puissance par porteuse à l'entrée de l'antenne : 4 W (36 dBm)
- hauteur du milieu de l'antenne par rapport au sol : 34 m
- 2 porteuses sur les antennes n° 1 et n° 2
- 1 porteuse sur les antennes n° 3 et n° 4



**Figure 2 : Position des antennes**

Des mesures de champ ont été réalisées en plusieurs points du toit et dans un appartement du dernier étage situé en dessous des antennes n° 1 et n° 4.

## Mesures sur le toit

Le champ produit par les différentes antennes a été mesuré en plusieurs points du toit de l'immeuble; ces points sont représentés à la figure 3 et sont notés A1, A2, A3, B3, C3, A4, B4, C4 et D4. Tous ces points se trouvent à 2 m de l'antenne la plus proche, sauf le point D4 qui se trouve à 1 m devant l'antenne n° 4; ils sont situés dans le même plan horizontal que le milieu des antennes. Comme expliqué au chapitre 2 § 1, la relation liant la densité de puissance au champ électrique n'est plus applicable à très courte distance de l'antenne; c'est pour cette raison que les résultats relatifs à ce site sont exprimés en champ électrique (V/m).

Les résultats sont repris dans le tableau 1 où  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  et  $E_4$  désignent le champ électrique produit respectivement par les antennes n° 1, 2, 3 et 4. Dans ce tableau, les résultats en caractères gras indiquent les contributions dominantes.

L'analyse du tableau montre que les champs les plus élevés sont obtenus lorsqu'on se trouve dans le faisceau d'une antenne ou à proximité de celui-ci. Par exemple, au point A2, la contribution dominante provient de l'antenne n° 3. On note aussi que le champ est assez faible au points A3, B3, A4 et B4, car ces points ne se situent dans le faisceau d'aucune antenne. Par contre, bien que C3 soit en dehors du faisceau de l'antenne 3 (angle d'ouverture de  $65^\circ$  comme indiqué précédemment), il en est proche et on constate une forte augmentation du champ. Il en est de même au point C4 qui est proche du faisceau de l'antenne n° 4. La valeur maximale est obtenue au point D4 qui se trouve dans le faisceau de l'antenne n° 4 à seulement 1 m de celle-ci. On notera que le champ en D4 est relativement faible au regard de ce que fournissent les formules théoriques; cet aspect a fait l'objet de mesures complémentaires décrites au chapitre 8.

La dernière colonne du tableau donne, pour chaque point, la valeur du champ total correspondant au cumul des contributions des 4 antennes (la méthode de calcul est donnée dans l'annexe 2-7) Pour ce calcul, il a été tenu compte que les antennes n° 1 et n° 2 rayonnent 2 porteuses; ces valeurs sont également reprises à la figure 3.

**Tableau 1**  
**Champs produits par chacune des antennes**

Point	$E_1$ (V/m)	$E_2$ (V/m)	$E_3$ (V/m)	$E_4$ (V/m)	$E_{total}$ (V/m)
A1	<b>0,73</b>	0,09	0,22	<b>1</b>	1,45
A2	0,18	0,25	<b>1,5</b>	0,11	1,54
A3	< 0,1	< 0,1	<b>0,5</b>	< 0,1	0,5
B3	< 0,1	0,18	<b>0,5</b>	< 0,1	0,56
C3	< 0,1	0,4	<b>5,6</b>	< 0,1	5,6
A4	< 0,1	< 0,1	< 0,1	<b>0,5</b>	0,5
B4	< 0,1	< 0,1	< 0,1	<b>0,63</b>	0,63
C4	<b>0,5</b>	< 0,1	< 0,1	<b>4,8</b>	4,8
D4	<b>0,5</b>	< 0,1	< 0,1	<b>14,5</b>	14,5

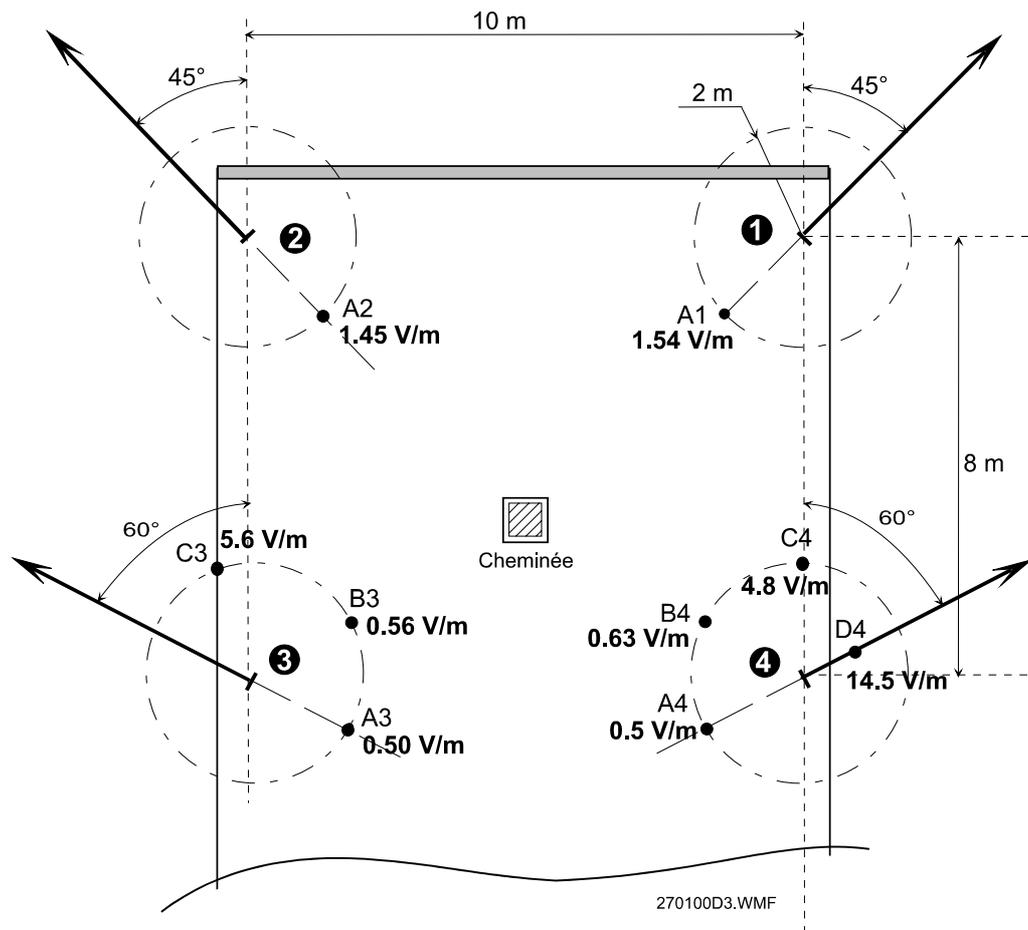


Figure 3 : Champ total maximum en différents points

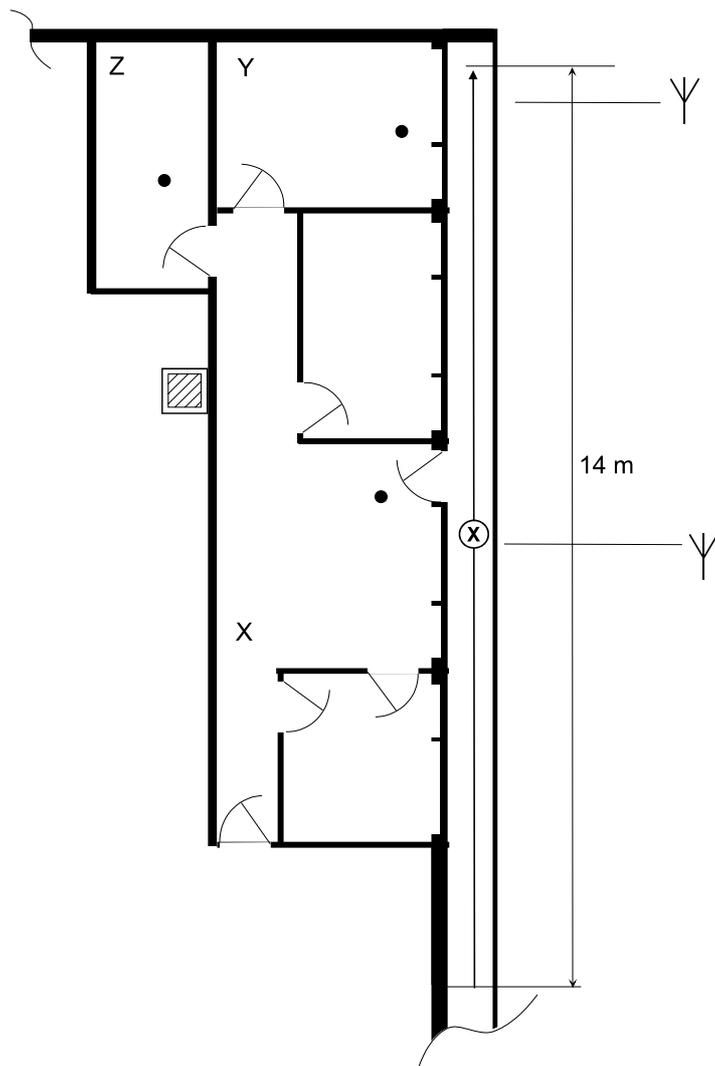
Il convient d'insister sur le fait que les valeurs de champ total, indiquées dans le tableau 1 et à la figure 3, constituent des maxima qui ne devraient être que très rarement atteints. En effet, les calculs sont basés sur l'hypothèse que chaque porteuse transmettait 8 communications simultanées, or ce ne sera le cas que lorsque le trafic atteint la saturation.

On constate que les champs mesurés sur le toit sont très faibles tant que l'on ne se trouve pas dans le faisceau d'une antenne (points A3, B3, A4 et B4 de la figure 3); à 2 m de celle-ci, les valeurs maximales mesurées y sont du même ordre (0,6 V/m) que la Recommandation de CHERRY – SANTINI (1 mW/m<sup>2</sup>).

Le champ augmente de manière significative lorsqu'on se rapproche du faisceau de l'antenne; aux points C3 et C4, le champ dépasse la Recommandation UCL-FPMs; mais est légèrement inférieur à la réglementation italienne.

Le résultat de la mesure au point D4 semble indiquer que les niveaux prescrits dans le projet de Directive Européenne ne sont pas atteints à 1 m devant l'antenne. Comme nous le verrons au chapitre 8, le champ présente de fortes variations lorsqu'on s'éloigne de l'antenne et la valeur qui y a été mesurée à cet endroit est peu significative.

Des mesures de champs ont également été réalisées sur le balcon et dans 3 pièces de l'appartement dont le plan est représenté à la figure 4.



230699D2WWMF

**Figure 4 : Plan de l'appartement**

Les mesures sur le balcon ont été réalisées le long du trajet linéaire d'une longueur de 14 m symbolisé par la flèche X sur les figures 2 et 4; ce trajet passe sous les antennes n° 1 et n° 4, à 1,60 m de hauteur, c'est-à-dire environ 2 m sous l'extrémité inférieure de l'antenne. Les composantes  $E_x$ ,  $E_y$  et  $E_z$  du champ ont été mesurées ( $E_x$  désigne la composante horizontale parallèle au sens de déplacement,  $E_y$  désigne la composante horizontale perpendiculaire au sens de déplacement et  $E_z$  est la composante verticale). Le tableau 3 résume les résultats; l'avant-dernière colonne fournit le champ résultant obtenu en calculant la racine carrée de la somme des carrés des 3 composantes. La dernière colonne du tableau indique l'endroit où le champ maximum se produit.

Il y a lieu de tenir compte que l'antenne n° 1 a une capacité de 2 porteuses; par conséquent, les champs de la dernière ligne du tableau 4 doivent être multipliés par  $\sqrt{2}$ . Le champ sous l'antenne n° 1 peut donc atteindre 0,85 V/m lorsque les 2 porteuses sont rayonnées.

**Tableau 3**  
**Champ et densité de puissance maximum au balcon situé sous les antennes n° 1 et 4**

<b>Fréquence (MHz)</b>	<b>E<sub>x</sub> (V/m)</b>	<b>E<sub>y</sub> (V/m)</b>	<b>E<sub>z</sub> (V/m)</b>	<b>E<sub>rss</sub> (V/m)</b>	<b>Localisation</b>
947,8	0,11	0,10	0,02	0,15	sous antenne n° 4
947,2	0,42	0,40	0,14	0,60	sous antenne n° 1

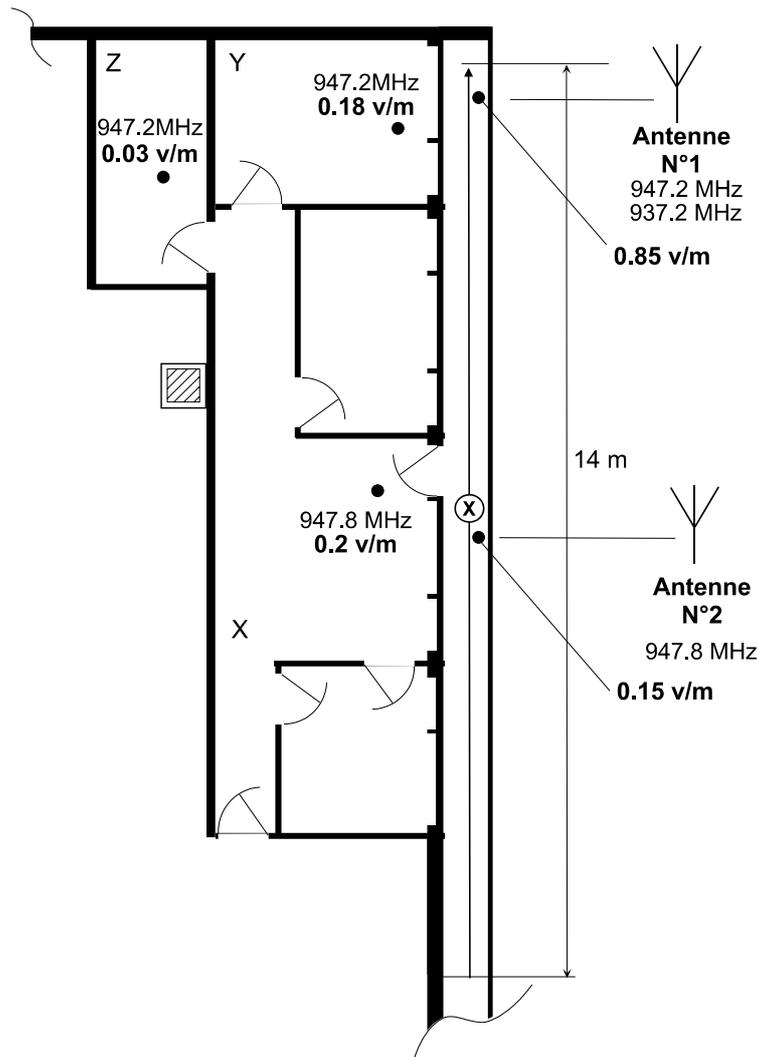
Etant donné la décroissance rapide du champ avec la distance, le champ produit par l'antenne n° 1 est négligeable sous l'antenne n° 4 par rapport à celui produit par cette dernière. Il en va de même pour le champ produit par l'antenne n° 4 sous l'antenne n° 1.

Des mesures ont également été réalisées dans 3 pièces situées sous les antennes n° 1 et n° 4; ces 3 pièces sont repérées, à la figure 4, par les lettres X, Y et Z. On assiste, dans ce cas, à de fortes variations lorsqu'on déplace ou lorsqu'on tourne l'antenne de mesure. Ces variations sont dues aux réflexions sur les murs, les planchers, les plafonds ou sur tout objet proche; le rapport entre valeur maximale et valeur minimale du champ est de l'ordre de 10. La densité de puissance, quant à elle, présente des variations dans un rapport de l'ordre de 100 (carré du champ). De telles variations peuvent être rencontrées sur des distances de quelques centimètres. Ce phénomène, connu sous le nom de "fading" est décrit dans l'annexe 1 § 2.2. Il y a donc lieu de déplacer l'antenne de mesure et de la faire tourner afin de déterminer l'endroit où le champ est maximum. En procédant de cette manière, une valeur maximale de 0,13 V/m a été mesurée dans la pièce à la fréquence de 947,2 MHz (repérée par la lettre Y sur la figure 4) située sous l'antenne n° 1. Cette valeur doit être multipliée par  $\sqrt{2}$  pour tenir compte que l'antenne n° 1 peut rayonner 2 porteuses, soit un champ de 0,18 V/m.

Dans la pièce adjacente (repérée par la lettre Z), le champ maximum à la fréquence de 947,2 MHz tombe à 0,02 V/m, soit 0,03 V/m lorsque l'antenne n° 1 émet 2 porteuses. Cette diminution importante s'explique par l'atténuation produite par les murs.

Dans la pièce située sous l'antenne n° 4 (repérée par la lettre X), on trouve une valeur maximale de 0,2 V/m à la fréquence de 947,8 MHz rayonnée par cette antenne. On remarque que cette valeur de 0,2 V/m est assez élevée par rapport à celle mesurée au balcon; ce qui peut s'expliquer par le fait qu'il ne s'agit que d'une valeur ponctuelle qui est nettement plus élevée que le champ moyen dans la pièce.

La figure 5 reprend ces différents résultats, éventuellement multiplié par  $\sqrt{2}$  lorsque 2 porteuses sont rayonnées.



310100D1.WMF

**Figure 5 : Champs maxima dans l'appartement et au balcon**

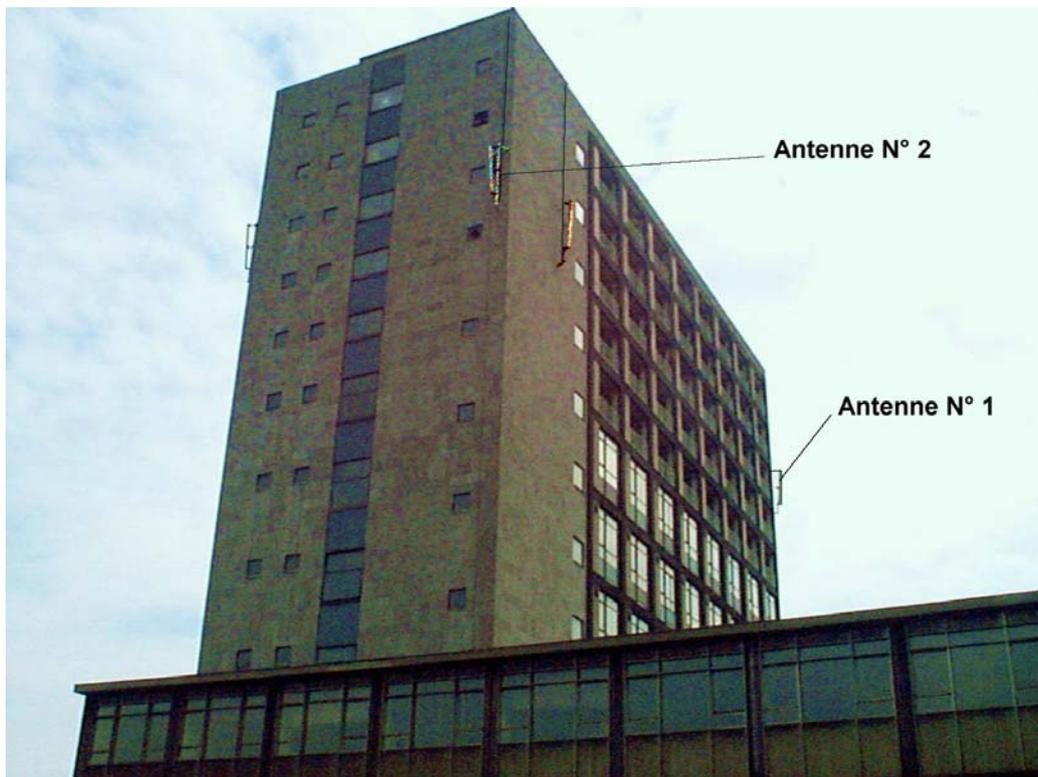
Comme pour les mesures effectuées sur le toit, les valeurs de champ total, indiquées à la figure 5, constituent des maxima qui ne devraient être que très rarement atteints, car les calculs sont basés sur l'hypothèse que chaque porteuse transmettait 8 communications simultanées, or ce ne sera le cas que lorsque le trafic atteint la saturation.

On constate que le champ mesuré dans l'appartement est partout inférieur à la Recommandation de CHERRY - SANTINI (0,6 V/m); cette limite est légèrement dépassée à l'extrémité du balcon se trouvant sous l'antenne n° 1 lorsque cette antenne est utilisée à sa pleine capacité. Ces valeurs très faibles s'expliquent par la forte directivité des antennes et par la protection que procure le toit en béton.

## CHAPITRE 7

### ANTENNES PROXIMUS IMPLANTEES LE LONG DES FACADES DE L'INSTITUT DE MATHEMATIQUES DE L'UNIVERSITE DE LIEGE

Six antennes directionnelles de l'opérateur PROXIMUS sont installées le long des façades de l'Institut de Mathématiques<sup>7</sup> de l'Université de Liège, situé Avenue des Tilleuls; ces 6 antennes couvrent 3 secteurs de 120°. Contrairement aux cellules classiques, qui ne requièrent qu'une antenne, l'opérateur utilise ici la technique de diversité (décrite au chapitre 2 § 7) qui nécessite 2 antennes par cellule. Des mesures de champs ont été réalisées dans les locaux les plus proches des 2 antennes (n° 1 et 2) de la figure 1.



*Figure 1 : Vue du site*

---

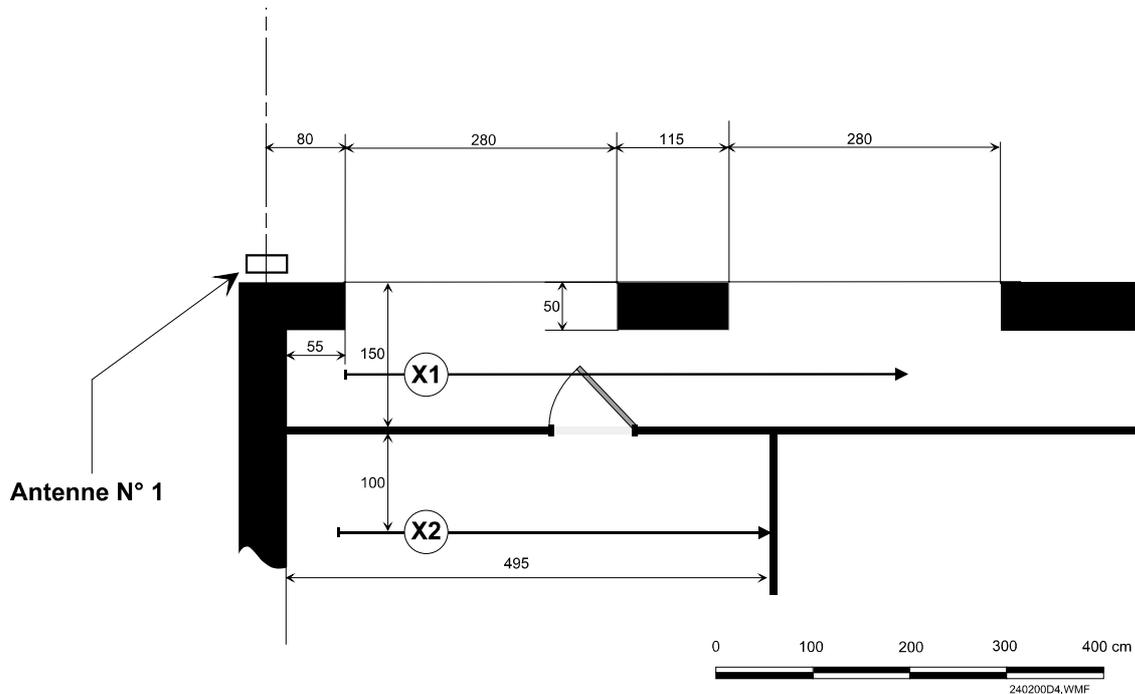
<sup>7</sup> Ce bâtiment est maintenant occupé par le FOREM

Les caractéristiques des antennes, communiquées par PROXIMUS, sont les suivantes :

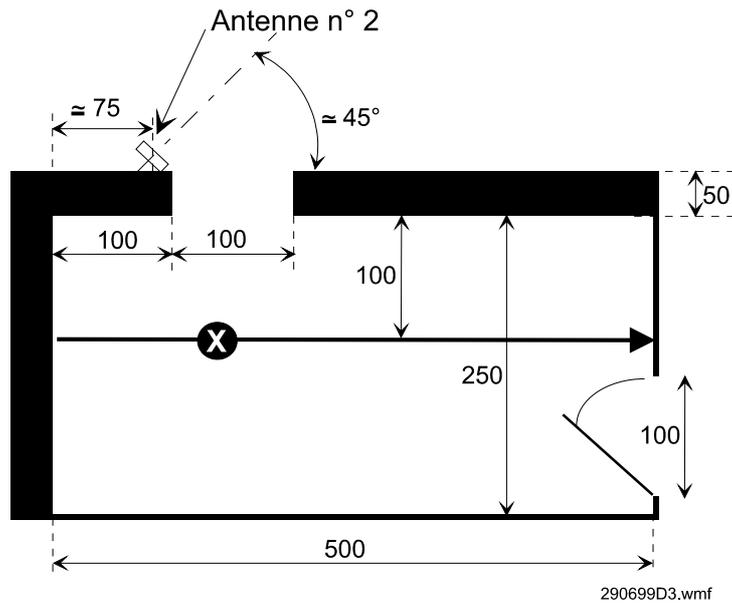
- antennes directionnelles KATHREIN de type 730376
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan horizontal :  $65^\circ$
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan vertical :  $6,5^\circ$
- gain maximum : 70 (18,5 dBi)
- polarisation verticale
- angle de tilt mécanique :  $-5^\circ$
- angle de tilt électrique :  $0^\circ$
- puissance par porteuse à l'entrée de l'antenne : 4 W (36 dBm)
- hauteur du milieu de l'antenne par rapport au sol : 31 m
- nombre de porteuses : 2 par antenne

La figure 2 représente la position de l'antenne n° 1 par rapport au balcon et au local le plus proche. Des mesures de champ ont été réalisées :

- sur le balcon près de l'antenne n° 1 (trajet de mesure X1)
- dans le local le plus proche (trajet de mesure X2)



**Figure 2 : Position de l'antenne n° 1 par rapport au balcon et au local le plus proche**



**Figure 3 : Position de l'antenne n° 2 par rapport au local le plus proche**

La figure 3 représente la position de l'antenne n° 2 par rapport au local le plus proche. Le champ  $y$  a été mesuré suivant le trajet X, ainsi que dans l'encadrement de la fenêtre.

Les mesures sur le balcon ont été réalisées le long du trajet linéaire d'une longueur d'environ 6 m, à la même hauteur que le milieu de l'antenne; ce trajet est symbolisé par la flèche X1 sur la figure 2. Les composantes  $E_x$ ,  $E_y$  et  $E_z$  du champ ont été mesurées le long de ce trajet ( $E_x$  désigne la composante horizontale parallèle au sens de déplacement,  $E_y$  est la composante horizontale perpendiculaire au sens de déplacement et  $E_z$  est la composante verticale). Les résultats des mesures sont repris à la 2<sup>ème</sup> ligne du tableau 1. Comme expliqué au chapitre 2 § 1, la relation liant la densité de puissance au champ électrique n'est plus applicable à très courte distance de l'antenne, c'est pour cette raison que tous les résultats relatifs à ce site sont uniquement exprimés en champ électrique (en V/m).

**Tableau 1**  
**Champ maximum sur le balcon et dans le local situés près de l'antennes n° 1**

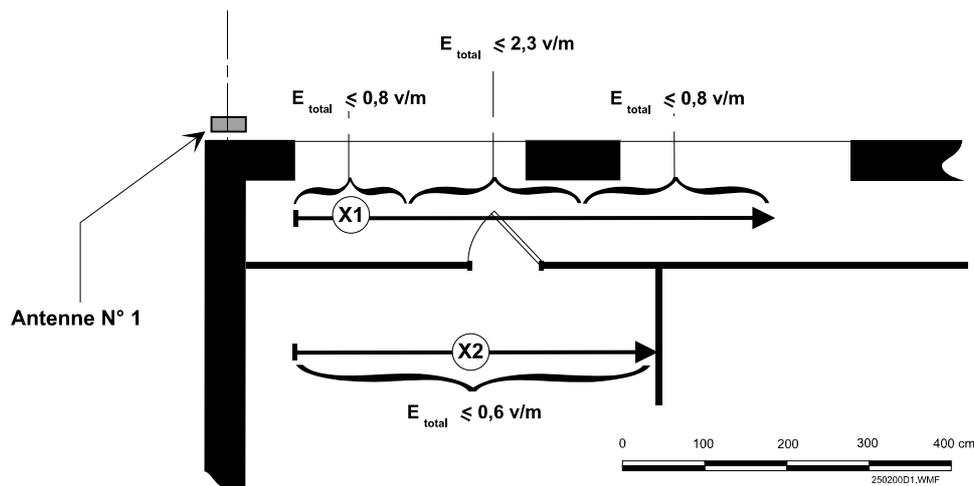
Trajet	$E_x$ (V/m)	$E_y$ (V/m)	$E_z$ (V/m)	$E_{total}$ 1 porteuse (V/m)	$E_{total}$ 2 porteuses (V/m)
X1 (balcon)	0,45	0,63	1,35	1,56	2,32
X2 (local)	0,19	0,19	0,34	0,44	0,62

Le champ résultant est obtenu en calculant la racine carrée de la somme des carrés des 3 composantes ("root sum square") et est donné par :

$$E_{\text{total}} = (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2)^{1/2} \quad (1)$$

Il faut mentionner que le champ résultant selon la relation (1) conduit souvent à une surestimation, car les 3 composantes ne sont généralement pas maximales au même endroit.

Il y a lieu de tenir compte que l'antenne n° 1 a une capacité de deux porteuses. Pour obtenir le champ correspondant, il faut multiplier par  $\sqrt{2}$  la valeur mesurée à la fréquence de 950,6 MHz. Le champ près de l'antenne n° 1 peut donc atteindre 2,3 V/m lorsque les 2 porteuses sont rayonnées et sur une distance d'environ 1 m de part et d'autre du maximum. Au-delà de cette distance, les mesures montrent que le champ a chuté d'un facteur 3 (soit environ 0,8 V/m). Ces résultats sont également résumés à la figure 4. Le champ maximum mesuré (2,3 V/m) est donc inférieur à la Recommandation UCL-FPMs (3 V/m). Sur le reste du balcon, le champ est inférieur à 0,8 V/m, soit à peine plus que la Recommandation de CHERRY - SANTINI. Ces faibles valeurs s'expliquent par la forte directivité de l'antenne.



**Figure 4 : Résultats des mesures sur le balcon et dans le local proche de l'antenne n° 1**

Les mesures dans le local contigu au balcon ont été réalisées le long du trajet linéaire d'une longueur de près de 5 m, à la même hauteur que le milieu de l'antenne; ce trajet est symbolisé par la flèche X2 à la figure 2. La procédure utilisée est la même que pour les mesures sur le balcon.

On trouve les valeurs des 3 composantes du champ électrique, en V/m, en procédant comme précédemment. Les résultats sont résumés à la dernière ligne du tableau 1. Le champ total dans le local atteint 0,62 V/m lorsque les 2 porteuses sont rayonnées. Ce résultat est également indiqué à la figure 4.

Comme pour les mesures sur le balcon, rappelons que le champ du champ résultant calculé selon la relation (1) est généralement surestimé.

Des mesures de champs ont été réalisées dans un local dont une fenêtre (1 m de hauteur et de largeur) se trouve tout près de l'antenne n° 2. Etant donné le mauvais état du châssis, les mesures n'ont pu être réalisées qu'avec la fenêtre fermée. La figure 3 indique que la direction du faisceau de l'antenne forme un angle de 45° avec le plan de la fenêtre. Les mesures dans ce local ont été réalisées le long du trajet linéaire d'une longueur de près de 5 m, à une hauteur de 1,6 m; ce trajet est symbolisé par la flèche X sur la figure 3.

On trouve les valeurs des 3 composantes du champ électrique en V/m et de la densité de puissance en procédant comme précédemment. Les résultats sont résumés à la dernière ligne du tableau 2. Le champ dans le local atteint 2 V/m lorsque les deux porteuses sont rayonnées.

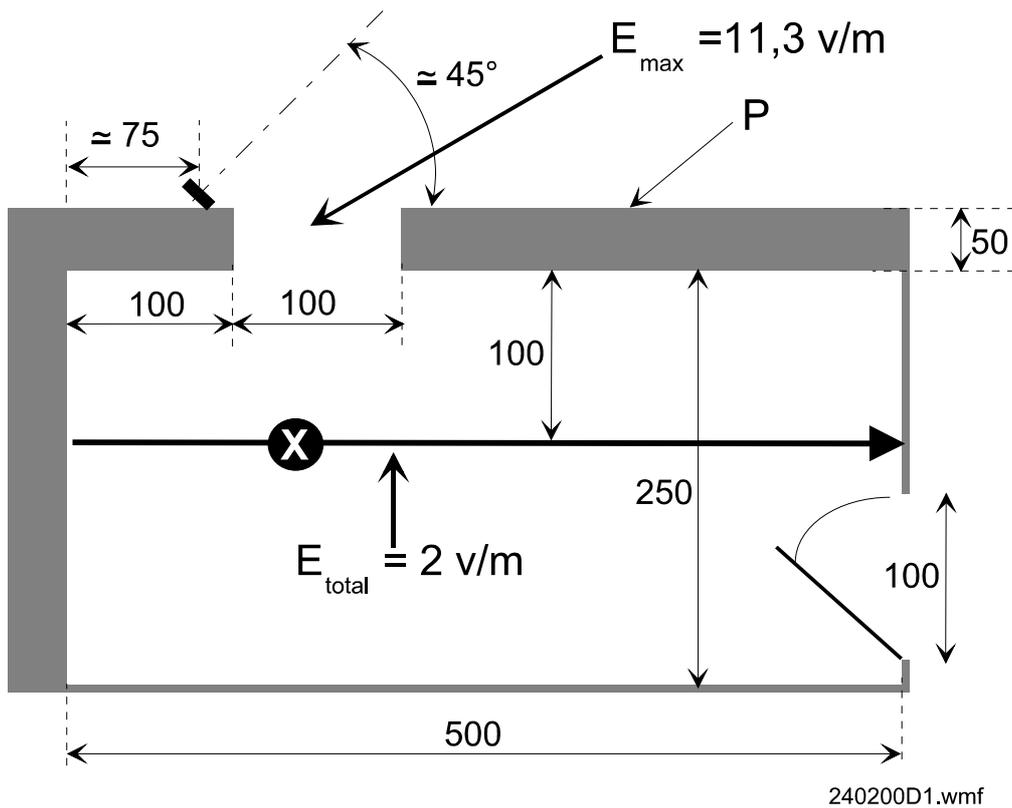
**Tableau 2**  
**Champ et densité de puissance maximum dans le local situé près de l'antennes n° 2**

Trajet	$E_x$ (V/m)	$E_y$ (V/m)	$E_z$ (V/m)	$E_{total}$ 1 porteuse (V/m)	$E_{total}$ 2 porteuses (V/m)
X	0,34	0,34	1,35	1,43	2,02

Une mesure a également été réalisée dans l'encadrement de la fenêtre en déplaçant et en tournant l'antenne de mesure afin de déterminer la valeur maximale du champ électrique; la valeur maximale mesurée à la fréquence de 948,6 MHz était de 8 V/m. Compte tenu que cette antenne émet 2 porteuses, le champ correspondant est de 11,3 V/m. Ce résultat, ainsi que ceux du tableau 2, sont repris à la figure 5.

Le champ maximum, dans le local situé près de l'antenne n° 2, est de 2 V/m et atteint 11,3 V/m dans l'encadrement de la fenêtre. Cette dernière valeur, relativement élevée, s'explique par la proximité et l'orientation de l'antenne. Il est évident qu'il eut été plus judicieux de placer cette antenne de l'autre côté de la fenêtre (par exemple au point P de la figure 5). Cet exemple montre que le respect de règles simples permettrait de réduire considérablement le champ auquel serait exposé les occupants de ce local.

Notons toutefois que les valeurs de champ total, indiquées dans les tableaux 1 et 2 ainsi qu'aux figures 4 et 5, constituent des maxima qui ne devraient être que très rarement atteints, car les calculs sont basés sur l'hypothèse que chaque antenne transmettait 15 communications simultanées, or ce ne sera le cas que lorsque le trafic atteindra la saturation. D'autre part, et comme mentionné précédemment, le calcul du champ résultant selon la relation (1) conduit systématiquement à une surestimation, car les 3 composantes ne sont généralement pas maximales au même endroit.



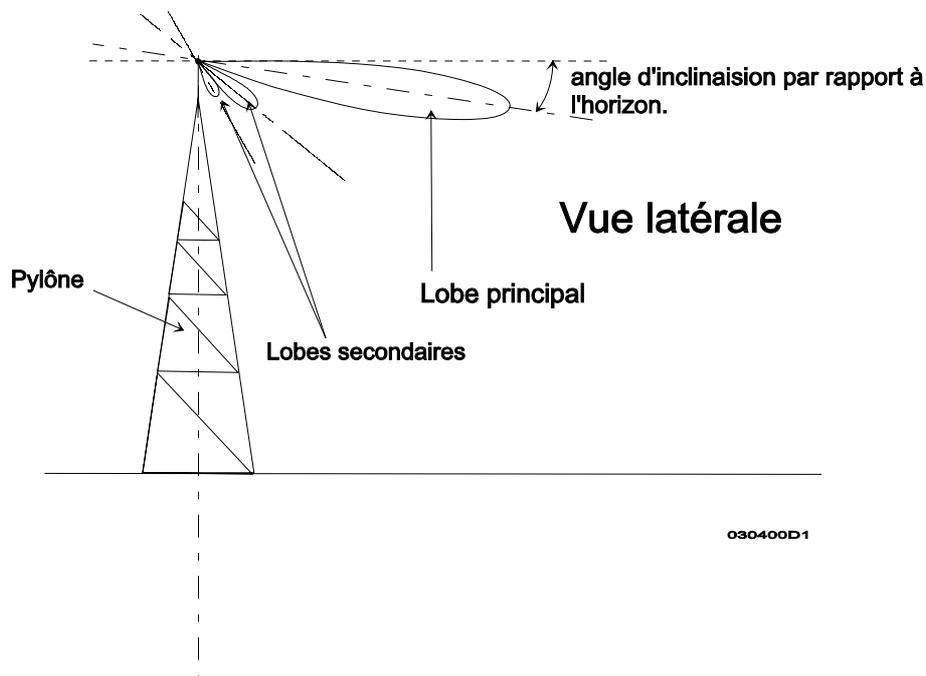
*Figure 5 : Résultats des mesures dans le local proche de l'antenne n° 2*

## CHAPITRE 8

### MESURES DES CHAMPS ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES

#### A PROXIMITE D'ANTENNES DIRECTIVES

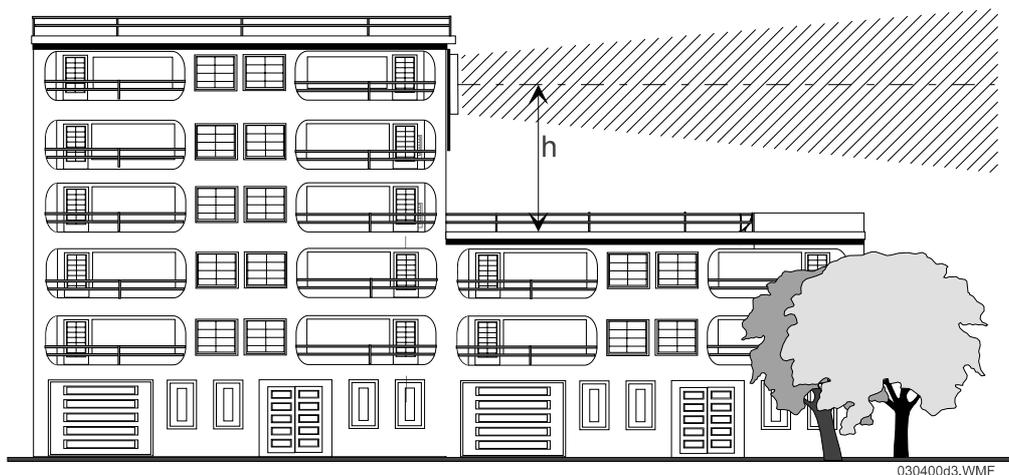
Le diagramme de rayonnement d'une antenne présente, dans le plan vertical, un certain nombre de lobes secondaires, comme illustré à la figure 1; ces lobes secondaires sont, en général, au moins 10 ou 20 fois plus faibles que le lobe principal. Néanmoins, certains de ces lobes pourraient être dirigés vers des zones proches de l'antenne où pourraient se trouver des personnes; un tel cas est illustré à la figure 2, où une antenne est placée au-dessus d'une terrasse. Il était intéressant de connaître le champ à différents niveaux sous le faisceau afin de pouvoir garantir que les limites d'exposition soient respectées.



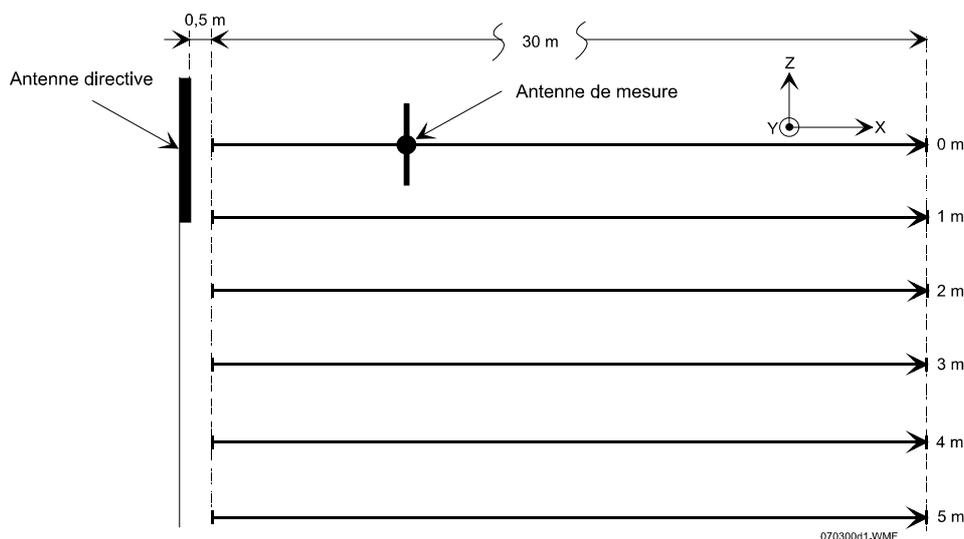
*Figure 1 : Diagramme de rayonnement dans le plan vertical*

Les mesures réalisées à proximité de sites réels avaient bien mis en évidence la présence d'un lobe secondaire (chapitre 4, figure 4), mais le champ correspondant, mesuré à 11 m sous le plan médian<sup>8</sup> de l'antenne, était faible (0,6 V/m pour 1 porteuse). Il était donc intéressant d'approfondir cet aspect afin de disposer de données concernant les implantations semblables à celles de la figure 2.

Dans le cas des sites réels (c'est-à-dire ceux utilisés par les opérateurs), la zone située à courte distance devant et en dessous de l'antenne n'est, en général, pas facilement accessible. Afin de mesurer les champs dans cette zone, l'ISSEP a installé 2 antennes directives sur un mât télescopique. L'objectif était ici, en particulier, de mesurer l'évolution du champ électromagnétique en fonction de la distance et à différentes hauteurs par rapport au milieu de l'antenne, comme le montre la figure 3.



**Figure 2 : Antenne installée au-dessus d'une terrasse**



**Figure 3 : Trajets de mesure**

<sup>8</sup> Le plan médian désigne le plan passant par le milieu de l'antenne

Le champ électrique et le champ magnétique ont été mesurés le long de trajets rectilignes de 30 m de longueur, démarrant à 50 cm de l'antenne; ces trajets sont situés à différentes hauteurs. Le premier trajet coïncide avec le plan médian de l'antenne; le deuxième trajet est parallèle au premier et est situé à 1 m en dessous du plan médian; de même, le troisième trajet se trouve à 2 m sous le plan médian, et ainsi de suite jusqu'à un niveau de 5 m sous le plan médian. Les 3 composantes orthogonales des champs électrique et magnétique ont été mesurées le long de chaque trajet.

Les mesures décrites ci-dessus ont été réalisées pour deux antennes, l'une fonctionnant dans la bande de fréquences des 900 MHz et la seconde dans la bande de 1.800 MHz; les résultats sont présentés séparément.

**a. Antenne directive 900 MHz**

Les caractéristiques de l'antenne à proximité de laquelle les mesures ont été réalisées, sont les suivantes :

- antenne directionnelle KATHREIN de type 736 863
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan horizontal :  $90^\circ$
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan vertical :  $8,5^\circ$
- gain maximum : 35,5 (15,5 dBi)
- polarisation verticale
- angle de tilt électrique :  $0^\circ$

Le lobe secondaire le plus important est incliné de  $14^\circ$  par rapport à la direction horizontale; il est 14 fois plus faible (11,5 dB) que le lobe principal. Tous les autres lobes secondaires sont au moins 100 fois plus faibles (20 dB) que le lobe principal.

L'antenne a été installée avec un angle de tilt mécanique de  $0^\circ$ .

Les mesures ont été réalisées à la fréquence de 925 MHz, avec une puissance à l'entrée de l'antenne égale à 1 W. En pratique, de telles antennes sont utilisées à une puissance supérieure. Si P désigne la puissance injectée à l'antenne, les valeurs de champs mesurées pour une puissance de 1 W doivent être multipliées par un facteur  $\sqrt{P}$ . Par exemple, si la puissance injectée est de 10 W (correspondant au cas assez fréquent où 2 porteuses de 5 W sont rayonnées), les champs électrique et magnétique doivent être multipliés par 3,16. Si l'antenne rayonnait 20 W (c'est-à-dire 4 porteuses de 5 W), le champ devrait être multiplié par 4,5.

En ce qui concerne le champ électrique, les mesures ont montré que les composantes horizontales parallèles aux axes X et Y (figure 3) étaient négligeables par rapport à la composante verticale (qui est la seule qui soit rayonnée par l'antenne); par conséquent, seuls les résultats relatifs à cette composante sont présentés ici.

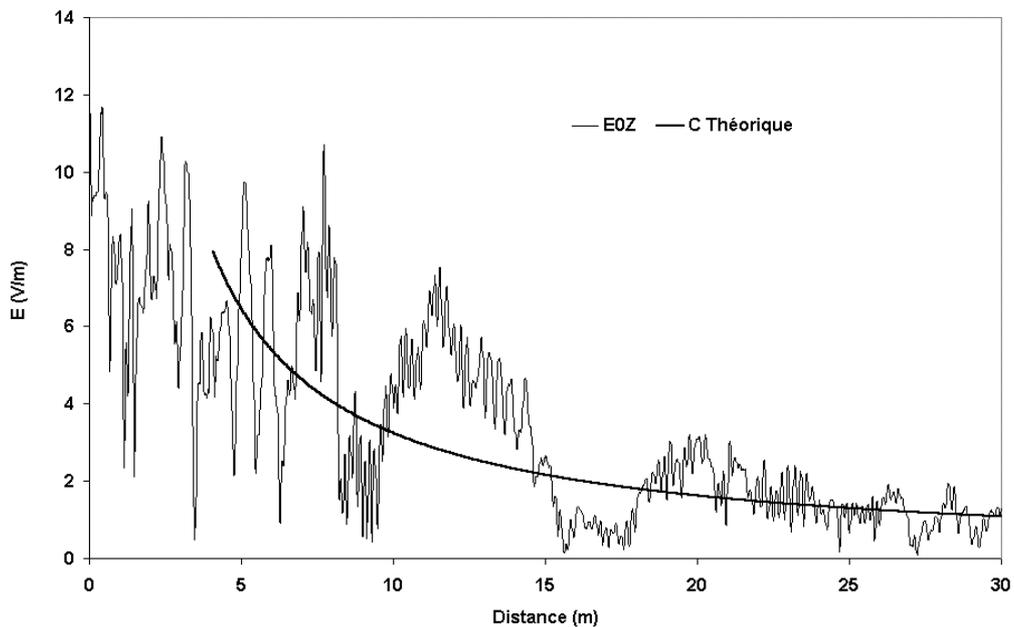
La composante verticale du champ électrique dans l'axe du faisceau a été comparée à la valeur théorique calculée au moyen de la relation (1) donnant le champ en espace libre :

$$E = \frac{(30 P \cdot G)^{1/2}}{d} \quad (1)$$

qui devient, compte tenu du gain de 35,5 et de la puissance injectée de 1 W :

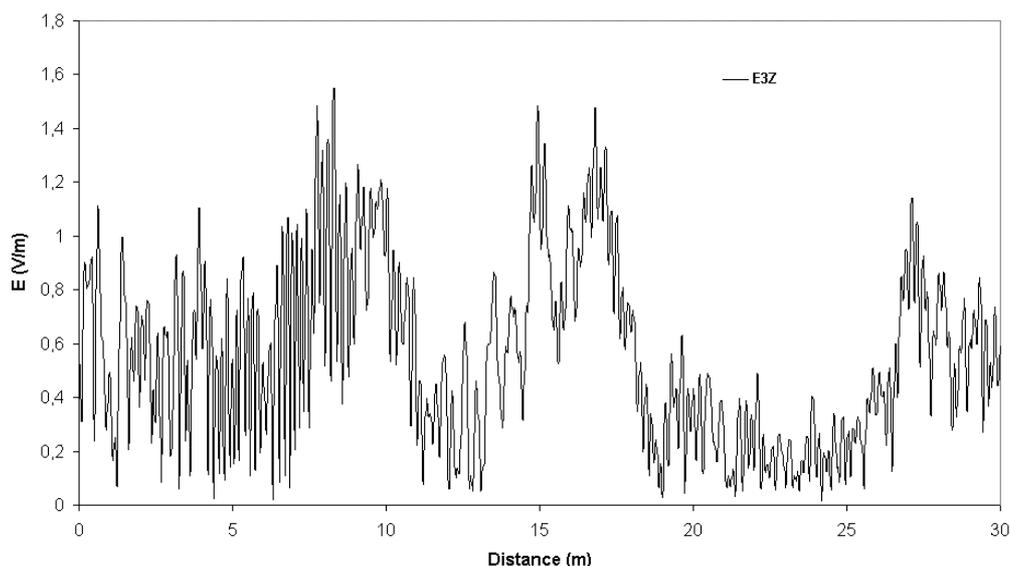
$$E = \frac{30,2}{d} \quad (2)$$

La figure 4 représente l'évolution de la composante verticale du champ électrique dans l'axe du faisceau (courbe E0Z) ainsi que la valeur théorique calculée au moyen de la relation (2) donnant le champ en espace libre.



**Figure 4 - Composante verticale du champ électrique et valeur théorique (puissance injectée = 1 W)**

On constate que le champ présente de fortes variations, jusqu'à une quinzaine de mètres de l'antenne. Les champs électriques effectivement mesurés varient entre pratiquement 0 V/m et le double de la valeur théorique calculée à cet endroit. De telles variations sont dues au fait que les contributions des différents éléments de l'antenne s'additionnent, ou s'annulent, mutuellement selon le point où l'on se trouve. Néanmoins, la valeur moyenne (lissée sur 2 ou 3 m) suit assez bien la valeur théorique. Au-delà d'une quinzaine de mètres, la valeur mesurée est proche de la valeur théorique.



**Figure 5 : Composante verticale du champ électrique à 3 m sous l'axe du faisceau (puissance injectée = 1 W)**

La figure 5 montre l'évolution de la composante verticale du champ électrique mesurée suivant le trajet situé 3 m sous l'axe du faisceau (courbe E3Z); cette courbe indique que le champ reste toujours inférieur à 1,5 V/m; on notera que cette valeur n'est rencontrée qu'en un très petit nombre de points. Les deux pics présents entre 15 et 17 m sont dus au lobe secondaire incliné de  $14^\circ$ . Le champ moyen, sur les vingt premiers mètres, est de l'ordre de 0,5 V/m. La 5<sup>ème</sup> ligne du tableau 1 résume ces résultats. La 1<sup>ère</sup> colonne spécifie la hauteur sous le plan médian. La 2<sup>ème</sup> colonne indique le champ *maximum* mesuré, sur une distance de 20 m et lorsque l'antenne est alimentée par une puissance de 1 W. Les 3 autres colonnes correspondent au champ maximum qui serait mesuré si la puissance était de 10, 20 ou 30 W. Pour une puissance de 10 W (correspondant, par exemple, à 2 porteuses de 5 W), le résultat de la 2<sup>ème</sup> colonne doit être multiplié par 3,16; pour 20 W, la 2<sup>ème</sup> colonne doit être multipliée par 4,5; pour 30 W, elle doit être multipliée par 5,5.

A 3 m sous le plan médian, le tableau 1 (5<sup>ème</sup> ligne) indique que le champ maximum serait de 4,7 V/m, 6,7 V/m et 8,2 V/m si la puissance injectée était, respectivement, de 10, 20 ou 30 W.

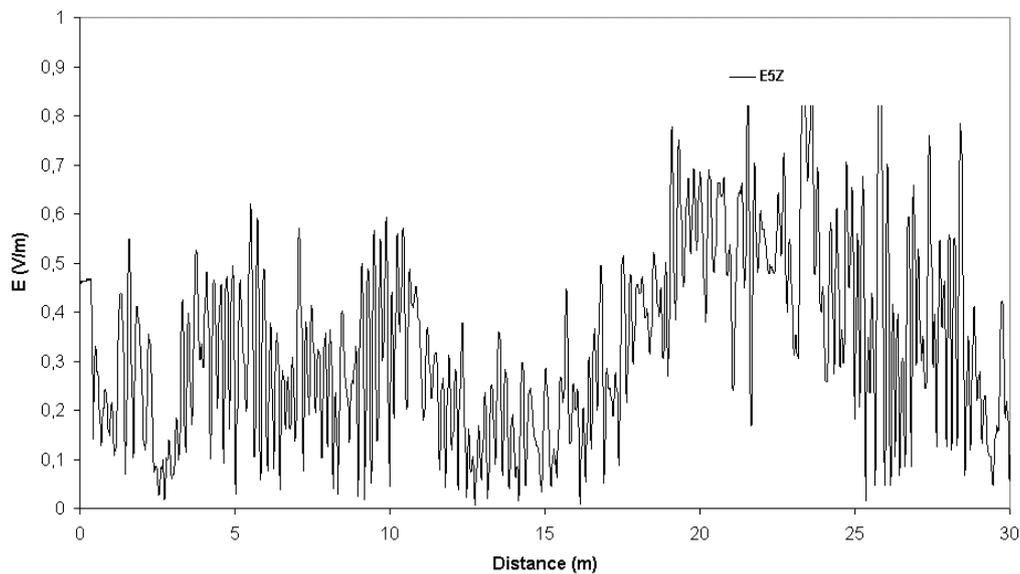
**Tableau 1**  
**Champ maximum (V/m) à différentes hauteurs sous le plan médian de l'antenne (entre 0 et 20 m)**

Hauteur (m)	Puissance totale			
	1 (W)	10 (W)	20 (W)	30 (W)
2	2,2	7,0	9,8	12,0
3	1,5	4,7	6,7	8,2
4	1	3,2	4,5	5,5
5	0,6	1,9	2,7	3,3

La figure 6 donne l'évolution de la composante verticale du champ électrique mesurée suivant le trajet situé 5 m sous l'axe du faisceau (courbe E5Z); Le champ y est inférieur à 0,6 V/m (sauf en quelques points) jusqu'à 20 m de l'antenne, ce qui donnerait 1,9 V/m si la puissance injectée était de 10 W. Le tableau 1 indique que le niveau de 3 V/m n'est légèrement dépassé que pour une puissance de 30 W, ce qui correspondrait, par exemple, à 6 porteuses ayant une puissance de 5 W chacune. Au-delà d'une distance de 20 m, l'augmentation du champ est due au lobe secondaire incliné de 14° par rapport à la direction horizontale<sup>9</sup>.

En conclusion, et pour une antenne de ce type alimentée par une puissance inférieure ou égale à 30 W et *installée avec un angle de tilt nul*, le champ devrait toujours être inférieur, ou égal, à 3,3 V/m, à un niveau de 5 m en dessous de l'axe du faisceau et jusqu'à 20 m de l'antenne.

Entre 20 et 30 m, et pour une puissance de 1 W, le champ atteint 0,8V/m en un très petit nombre de points; ce qui correspondrait à 4,4 V/m pour une puissance de 30 W.



**Figure 6 : Composante verticale du champ électrique à 5 m sous l'axe du faisceau (puissance injectée = 1 W)**

Le champ magnétique a également été mesuré à proximité de cette antenne. Il a été constaté que les composantes parallèles aux axes X et Z étaient nettement inférieures à la composante parallèle à l'axe Y. La figure 7 représente l'évolution de cette composante dans l'axe du faisceau (courbe H0Y) ainsi que la valeur théorique calculée au moyen de la relations (3) :

$$H \text{ (A/m)} = \frac{E}{377} \quad (3)$$

<sup>9</sup> En effet,  $\text{tg } 14^\circ = 0,25$  qui est égal au rapport 5 m / 20 m

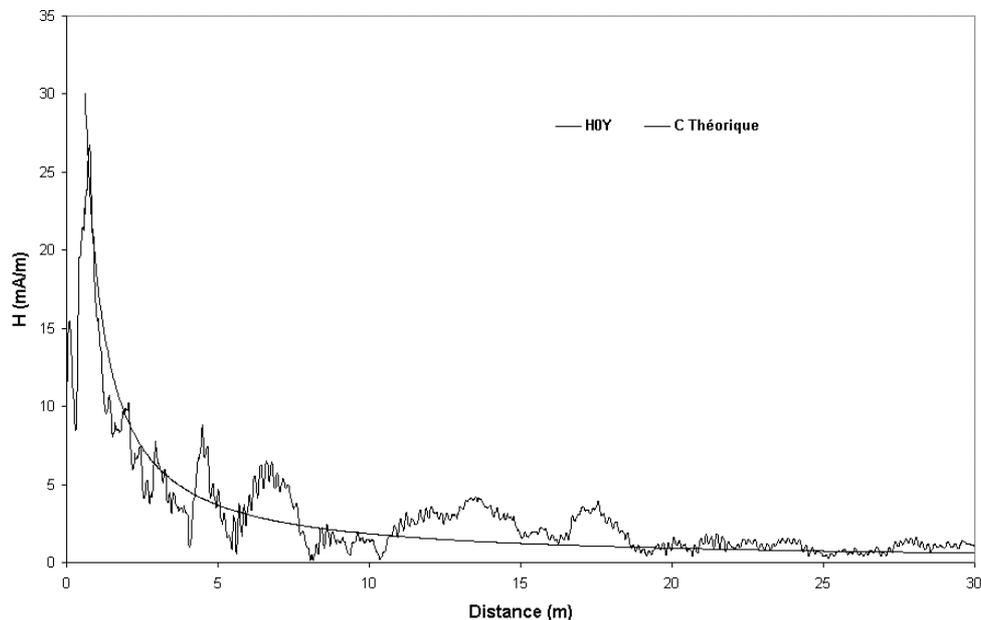
En tenant compte de la relation (2), on obtient :

$$H \text{ (mA/m)} = \frac{86}{d} \quad (4)$$

La figure 7 montre que le champ magnétique mesuré suit assez bien la valeur théorique.

### b. Antenne directive 1.800 MHz

Des mesures semblables à celles décrites au paragraphe 1 ont été réalisées avec une antenne directive conçue pour la bande de fréquence de 1.800 MHz; les caractéristiques de cette antenne sont les suivantes :



**Figure 7 : Composante suivant l'axe Y du champ magnétique et valeur théorique (puissance injectée = 1 W)**

- antenne directionnelle KATHREIN de type 739 494
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan horizontal : 65°
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan vertical : 6,5°
- gain maximum : 63 (18 dBi)
- polarisation croisée
- angle de tilt électrique : 0°

Cette antenne comporte plusieurs lobes secondaires; le premier est incliné de 11° par rapport à la direction horizontale et est 32 fois plus faible (15 dB) que le lobe principal. Le deuxième est incliné de 19° et est 29 fois plus faible (14,6 dB) que le lobe principal. Le troisième est incliné de 29° et est 42 fois plus faible que le lobe principal. Tous les autres lobes secondaires sont au moins 100 fois plus faible (20 dB) que le lobe principal.

L'antenne a été installée avec un angle de tilt mécanique de 0°.

Les mesures ont été réalisées à la fréquence de 1.850 MHz et pour une puissance à l'entrée de l'antenne égale à 1 W. Comme pour les mesures dans la bande des 900 MHz, les valeurs de champ mesurées pour une puissance de 1 W doivent être multipliées par un facteur  $\sqrt{P}$ .

En ce qui concerne le champ électrique, les mesures ont montré que les composantes parallèles aux axes Y et Z (figure 3) étaient pratiquement égales et que la composante suivant l'axe X était négligeable par rapport aux deux autres. Ce résultat s'explique pas le fait que l'antenne émet un champ électrique polarisé à 45° par rapport à la verticale. La 2<sup>ème</sup> colonne du tableau 2 donne la valeur *maximale* de la composante verticale à différentes hauteurs sous le plan médian pour une puissance égale à 1 W. Les 3 colonnes de droite fournissent le champ maximum pour des puissances de 10, 20 et 30 W.

**Tableau 2**  
**Champ maximum résultant (V/m) à différentes hauteurs sous le plan médian de l'antenne (entre 0 et 20 m)**

Hauteur (m)	Puissance totale			
	1 (W)	10 (W)	20 (W)	30 (W)
2	1,1	3,5	4,9	6,0
3	1,1	3,5	4,9	6,0
4	0,6	1,9	2,7	3,3
5	0,6	1,9	2,7	3,3
6	0,4	1,3	1,8	2,2

Le tableau 2 indique que, pour une antenne émettant une puissance de 10 W, le champ est toujours inférieur à 1,9 V/m à 4 m sous le plan médian. Si l'antenne émet une puissance de 30 W, le champ dépasse légèrement 3 V/m à 5 m sous le plan médian.

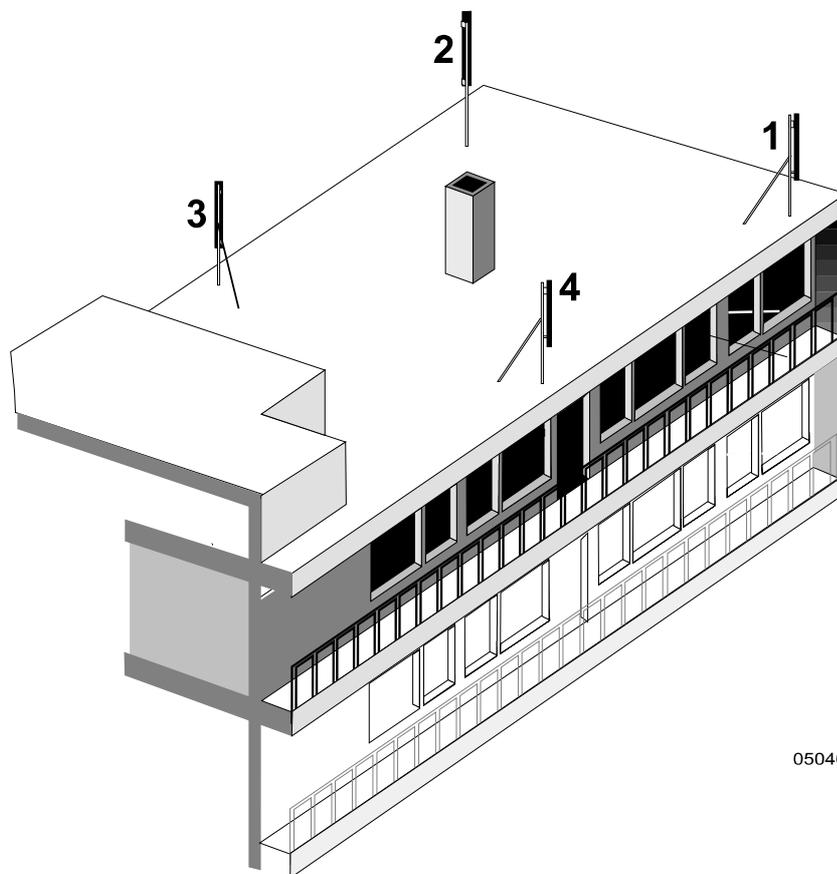
## **CONCLUSIONS**

Les tableaux 1 et 2 fournissent des résultats assez comparables; à 5 m sous le plan médian (c'est-à-dire à 4 m sous l'antenne), le champ électrique ne dépasse très légèrement 3 V/m lorsque la puissance émise est de 30 W.

Les résultats présentés ici ne sont, en principe, applicables qu'aux modèles d'antennes étudiés, qui présentent des caractéristiques courantes; des champs plus élevés pourraient évidemment être rencontrés si l'antenne présentait des lobes secondaires plus importants. Notons toutefois que les tableaux 1 et 2 ont été établis à partir des valeurs maximales mesurées, or celles-ci ne se présentent qu'en un très petit nombre de points. Comme le montrent les figures 5 et 6, les valeurs moyennes sont nettement plus faibles que les valeurs reprises dans les 2 tableaux.

Rappelons également que ces conclusions s'appliquent au cas où il n'y a aucun obstacle (ou protection) entre l'antenne et le point de mesure, c'est-à-dire aux cas semblables à l'exemple de la figure 2. Lorsqu'il s'agit d'une antenne installée au bord d'un toit en béton, tel qu'illustré à la figure 8, l'atténuation produite par celui-ci protège les occupants des étages inférieurs

(voir à ce sujet les résultats du chapitre 6) et les champs qui y sont mesurés, à distances égales, sont beaucoup plus faibles.



050400d1.WMF

***Figure 8 : Antenne installée au bord d'un toit en béton***

## CHAPITRE 9

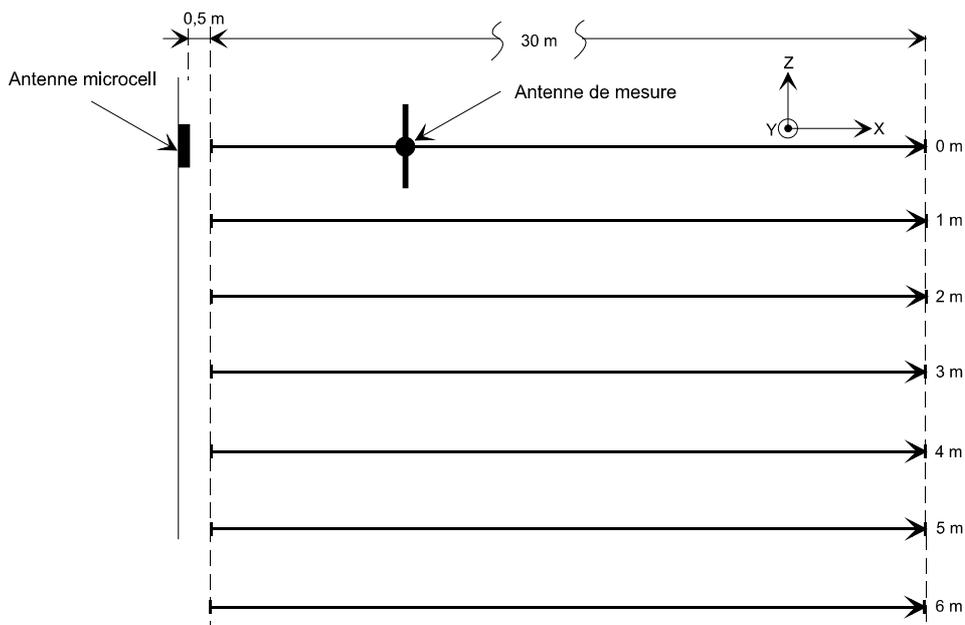
### MESURES DES CHAMPS ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES

#### A PROXIMITE D'UNE ANTENNE MICROCELL

Les opérateurs utilisent des antennes MICROCELL pour couvrir une zone de quelques centaines de mètres de rayon et dans laquelle peuvent se trouver de nombreux abonnés. Il s'agit, par exemple, de zones piétonnes, de centres commerciaux, gares, aéroports, etc, ...

Une antenne MICROCELL peut être constituée du barreau d'une vingtaine de centimètres de hauteur; elle est, en général, placée le long d'une façade de bâtiment, derrière une enseigne publicitaire, ou sur 1 poteau d'éclairage.

La puissance qui alimente les antennes MICROCELL est relativement faible (souvent 1 ou 2 portuses de 1 W). Néanmoins, ces antennes peuvent se trouver à des distances relativement proches du public. Les mesures ont été réalisées avec une antenne "Microcell" fixée sur un mât télescopique, l'objectif était ici, en particulier, de mesurer l'évolution du champ électromagnétique en fonction de la distance et à différentes hauteurs par rapport au milieu de l'antenne, comme le montre la figure 1.



080300d1.WMF

Figure 1 : Trajets de mesure

Le champ électrique et le champ magnétique ont été mesurés le long de trajets rectilignes de 30 m de longueur, démarrant à 50 cm de l'antenne; ces trajets sont situés à différentes hauteurs. Le premier trajet se trouve dans le plan horizontal (plan médian), situé à hauteur du milieu de l'antenne, le deuxième trajet est parallèle au premier et est situé à 1 m en dessous du plan médian; de même le troisième trajet se trouve à 2 m sous le plan médian, et ainsi de suite jusqu'à un niveau de 5 m.

Les trois composantes orthogonales des champs électriques et magnétiques ont été mesurées le long de chaque trajet. Nous ne présenterons ici que les résultats les plus significatifs. Un rapport plus complet est joint dans l'annexe 2-9.

**Les caractéristiques de l'antenne MICROCELL utilisée sont les suivantes :**

- antennes omnidirectionnelles KATHREIN de type 751 161
- angle d'ouverture à 3 dB dans le plan vertical : 78°
- gain maximum : 1,6 (2 dBi)
- polarisation verticale

**Les mesures ont été réalisées à la fréquence de 925 MHz, avec une puissance à l'entrée de l'antenne égale à 1 W, qui est proche de la valeur utilisée en pratique. Si elle était utilisée à une puissance P différente de 1 W, les valeurs de champ fournies ci-dessous devraient être multipliées par un facteur  $\sqrt{P}$ . Par exemple, si la puissance injectée était de 2 W, les champs électriques et magnétiques devraient être multipliés par 1,4.**

La figure 2 représente l'évolution de la composante verticale du champ électrique dans le plan médian (courbe E0Z), ainsi que la valeur théorique calculée au moyen de la relation (1) donnant le champ en espace libre :

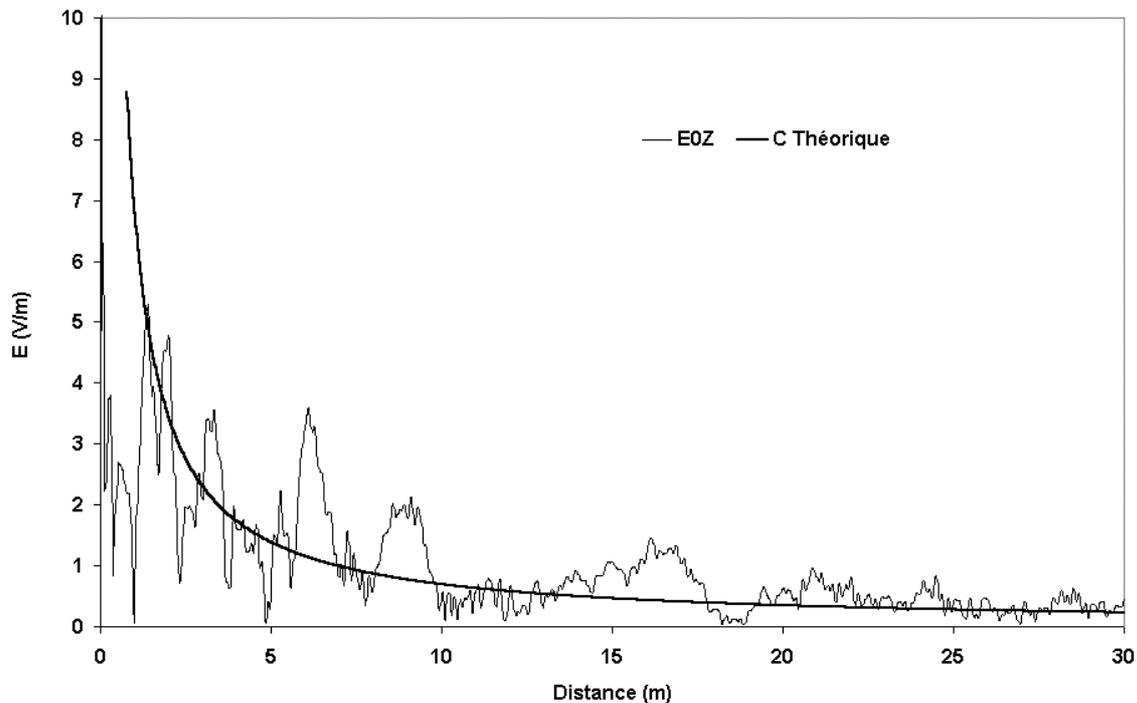
$$E = \frac{(30 P \cdot G)^{1/2}}{d} \quad (1)$$

qui devient, compte tenu du gain de 1,6 et de la puissance injectée de 1 W :

$$E = \frac{6,9}{d} \quad (2)$$

La figure 2 montre que le champ présente des variations, assez importantes, jusqu'à une dizaine de mètres de l'antenne, et que les valeurs mesurées suivent la même tendance que les valeurs théoriques. On constate également que le champ est toujours inférieur à 3 V/m à partir d'une distance de 7 m, contre une distance théorique de 2,3 m. Un tel écart s'explique par les réflexions sur le sol et les obstacles environnants.

Les mesures ont également démontré que les composantes horizontales suivant les axes X et Y (figure 1) dans le plan médian sont très inférieures, et donc négligeables, par rapport à la composante verticale mesurée au même endroit. Ceci n'a évidemment rien de surprenant puisque l'antenne émet un champ polarisé verticalement. Les mesures des composantes horizontales du champ électrique, effectuées à d'autres hauteurs, conduisent aux mêmes conclusions.



**Figure 2 : Composante verticale du champ électrique et valeur théorique (puissance injectée = 1 W)**

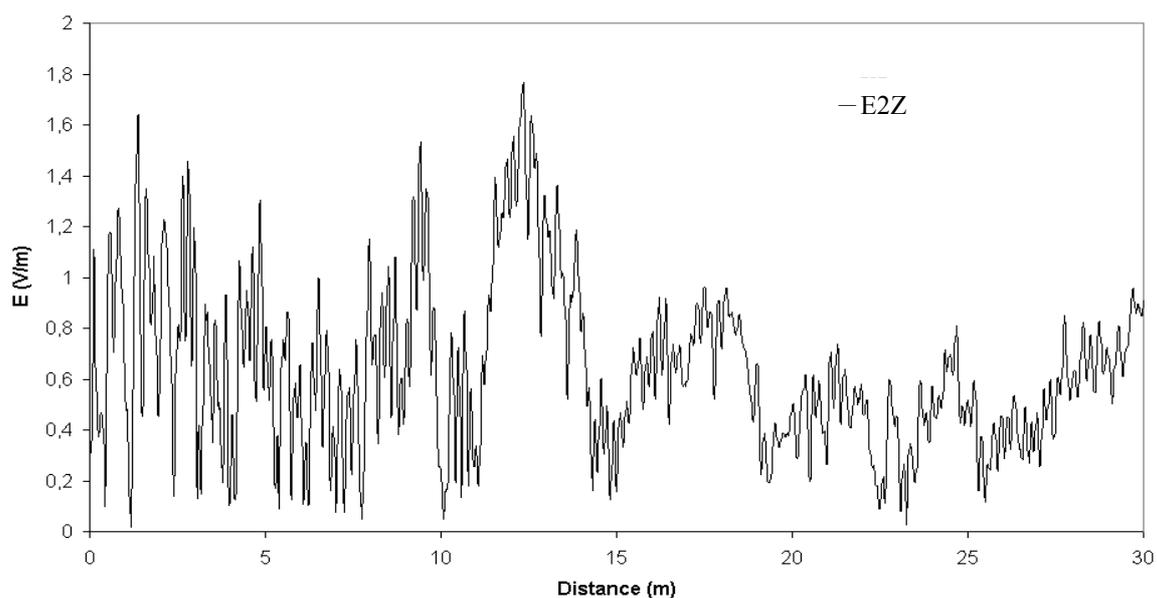
**La mesure de la composante verticale suivant le trajet situé à 1 m sous le plan médian montre que le champ est inférieur à 3 V/m au-delà d'une distance de 2,3 m.**

Les figures 3 et 4 montrent l'évolution de la composante verticale du champ électrique mesurée suivant :

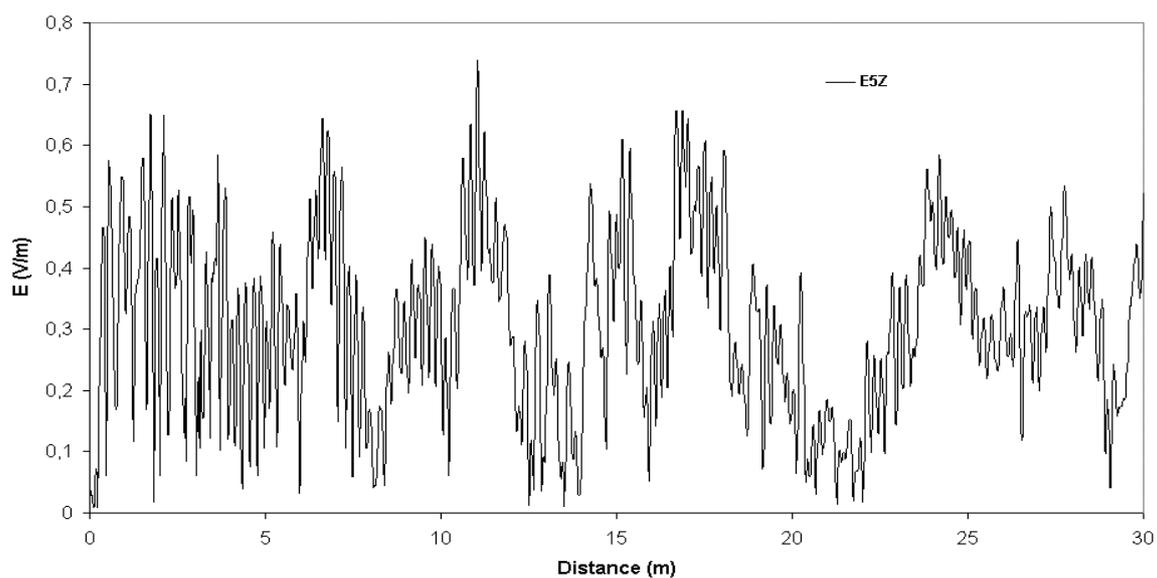
- le trajet situé 2 m sous le plan médian (courbe E2Z)
- le trajet situé 5 m sous le plan médian (courbe E5Z)

La courbe E2Z indique que le champ reste toujours inférieur à 1,5 V/m. Il faudrait donc une puissance de 4 W pour que le champ dépasse 3 V/m dans le plan situé à 2 m sous le plan médian.

Le champ à 5 m sous le plan médian est toujours inférieur à 0,7 V/m.



**Figure 3 : Composante verticale du champ électrique à 2 m sous le plan médian (puissance injectée = 1 W)**



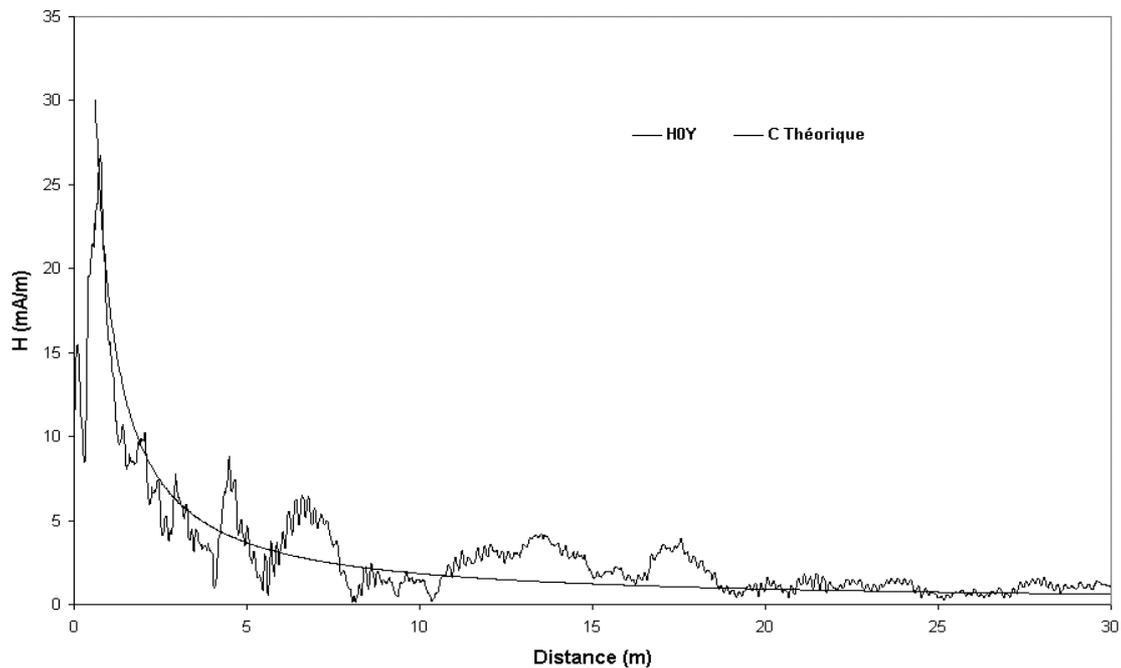
**Figure 4 : Composante verticale du champ électrique à 5 m sous le plan médian (puissance injectée = 1 W)**

La figure 5 représente l'évolution de la composante horizontale, parallèle à l'axe Y, du champ magnétique dans le plan médian (courbe  $H_{0Y}$ ), ainsi que la valeur théorique calculée au moyen de la relation (3) :

$$H \text{ (A/m)} = \frac{E}{377} \quad (3)$$

qui, en tenant compte de la relation (2), devient :

$$H \text{ (mA/m)} = \frac{18,4}{d} \quad (4)$$



**Figure 5 : Composante suivant l'axe Y du champ magnétique et valeur théorique (puissance injectée = 1 W)**

On constate que le profil de la figure 5 est similaire à celui du champ électrique mesuré suivant le même trajet (figure 2). D'autre part, la valeur mesurée suit assez bien la valeur théorique. Les écarts s'expliquent par les réflexions sur le sol et les obstacles environnants.

## CONCLUSIONS

Il a été constaté que, pour une puissance de 1 W, le champ électrique dans le plan médian était inférieur à 3 V/m à partir d'une distance de 7 m. A 2 m sous le plan médian, le champ électrique ne dépasse pas 1,5 V/m; il faudrait donc une puissance de 4 W pour qu'à cet endroit le champ atteigne la limite de 3 V/m.

Pour une puissance de 1 W, le champ à 5 m sous le plan médian est toujours inférieur à 0,7 V/m, ce qui correspond à une densité de puissance maximale égale à 1,3 mW/m<sup>2</sup> lorsque l'antenne transmet 8 communications simultanées.

## CHAPITRE 10

### MESURES DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES RAYONNES

#### PAR L'ANTENNE RTBF DU BOL D'AIR

Il était intéressant de comparer les champs électromagnétiques à proximité des antennes-relais de mobilophonie avec ceux produits par des émetteurs de radiodiffusion et de télévision dont les puissances sont bien plus élevées. C'est dans ce but que des mesures de champs ont été réalisées au voisinage de l'émetteur RTBF du Bol d'Air, situé à la périphérie de Liège. Une partie importante des signaux rayonnés par cet émetteur se situe à des fréquences qui ne sont guère éloignées des fréquences du GSM, notamment les fréquences TV à 615,25 et 639,25 MHz.

L'émetteur RTBF du Bol d'Air est implanté à Ougrée (Commune de Seraing), à proximité du domaine universitaire du Sart Tilman et du Village de Bonnelles. Il est utilisé pour la transmission de programmes radio en fréquence modulée dans la bande des 100 MHz, de 3 canaux de télévision (RTBF1 à 55,25 MHz, RTBF2 à 615,25 MHz et Canal+ à 635,25 MHz) et d'une porteuse DAB<sup>10</sup> à 225,648 MHz.

L'émetteur du Bol d'Air fonctionne, depuis près de 40 ans, dans une zone de densité de population moyenne. Les habitations les plus proches, ainsi que des locaux du CRM (Centre de Recherches Métallurgiques) et un terrain de sports se trouvent à environ 150 m du pied du pylône.

La figure 1 représente une vue du pylône, sa hauteur est de 216 m et il est équipé de plusieurs antennes placées à différents niveaux. Les caractéristiques essentielles des différentes émissions nous été communiquées par la RTBF et l'Union Européenne de Radiodiffusion; elles sont reprises dans le tableau 1 :

- 1<sup>ère</sup> ligne : fréquence de la porteuse en MHz
- 2<sup>ème</sup> ligne : nom du programme
- 3<sup>ème</sup> ligne : puissance fournie à l'antenne (en kW)
- 4<sup>ème</sup> ligne : puissance apparente rayonnée (PAR) exprimée en kW. Il s'agit du produit de la puissance fournie à l'antenne multipliée par le gain dans la direction du lobe principal (gain maximum)

---

<sup>10</sup> Digital Audio Broadcasting



*Figure 1 : Pylône du Bol d'Air*

- 5<sup>ème</sup> ligne : hauteur du milieu de l'antenne par rapport au sol
- 6<sup>ème</sup> ligne : précise s'il s'agit d'une antenne omnidirectionnelle ou directionnelle
- 7<sup>ème</sup> ligne : direction de la polarisation du champ électrique. Les lettres H et V correspondent respectivement à une polarisation horizontale et verticale. L'indication H + V signifie que les 2 polarisations sont émises. Dans ce cas particulier, et selon les données fournies par la RTBF, la composante horizontale est environ 5 fois plus puissante que la composante verticale

Des relevés de champs, aux principales fréquences émises, ont été réalisés sur un parcours de 3.700 m entre le pied du pylône et le carrefour de Plainevaux.

Tableau 1  
Caractéristiques des émissions

Fréquence (MHz)	55,25	88,5	90,5	95,6	96,4	99,5	225,65	615,25	639,25
Programme	TV RTBF1	FM BRF	FM Fréq. Wal.	FM Radio 21	FM La 1 <sup>ère</sup>	FM Musique 3	DAB	TV RTBF2	TV Canal +
Puissance (kW)	20	5	10	3	1	10	2	20	10
PAR (kW)	150	45	45	15	3	45	8	600	300
Hauteur (m)	162	186	186	186	125	186	175	207 m	207 m
Directivité	dir	dir	omni	omni	dir	omni	omni	omni	omni
Polarisation	H	H+V	H+V	H+V	V	H+V	V	H	H

La partie supérieure du pylône (où sont installées les antennes) est visible jusqu'à la lisière du Bois de Plainevaux, c'est-à-dire sur une distance d'environ 2.500 m. Au-delà, on y observe une décroissance significative du champ qui est due au fait que le trajet direct de l'onde est interrompu par les arbres.

Les mesures de la composante dominante du champ ont été réalisées pour différentes fréquences dans les conditions suivantes :

- a. Bande FM : La composante horizontale du champ électrique a été mesurée aux fréquences de 90,5 et 99,5 MHz. Ce sont ces deux fréquences qui, selon le tableau 1, ont la PAR la plus élevée.
- b. DAB : La composante verticale du champ électrique a été mesurée à la fréquence de 225,65 MHz.
- c. Emissions TV : La composante horizontale du champ électrique a été mesurée aux fréquences de 615,25 et 639,25 MHz.

En ce qui concerne la fréquence de 55,25 MHz, le champ n'a pu être mesuré le long du parcours de 3.700 m, car il n'était pas possible d'installer l'antenne de mesure (2,7 m de longueur à 55,25 MHz) en position horizontale sur un véhicule. Le relevé de champ correspondant a été remplacé par 2 mesures ponctuelles : l'une à 200 m du pied du pylône et l'autre à 1.200 m.

Afin de synthétiser ces résultats, le parcours de mesure a été décomposé en deux parties :

- la première partie concerne les distances inférieures à 750 m mesurées à partir du pied du pylône
- la deuxième partie correspond aux distances comprises entre 750 et 2.500 m, également comptées à partir du pied du pylône.

**Nous n'exploiterons pas les résultats relatifs aux derniers 1.200 m, puisqu'ils ne sont pas en vue directe des antennes.**

*Le tableau 2 fournit, pour les 2 parties du trajet de mesure, les valeurs du champ électrique exprimées en V/m pour les fréquences auxquelles des mesures ont été réalisées.*

Tableau 2  
*Champs maximum et moyen sur les 2 parties du trajet (en V/m)*

		55,25 MHz	90,5 MHz	99,5 MHz	225,65 MHz	615,25 MHz	639,25 MHz
	Polarisation	H	H	H	V	H	H
De 0 à 750 m	Champ max (v/m)		0,71	1,26	0,20	0,79	1,26
De 750 à 2500 m	Champ max (v/m)		0,35	0,63	0,20	0,45	0,56
	Champ moy (v/m)		0,16	0,28	0,08	0,22	0,18

La densité de puissance, en mW/m<sup>2</sup>, est déduite du champ électrique à partir de la relation (6) du chapitre 2.1; les résultats sont présentés dans le tableau 3. De manière à prendre en compte la fréquence de 55,25 MHz, nous avons, pour cette fréquence, repris des valeurs mesurées ponctuellement. Ces valeurs sont marquées d'un astérisque dans le tableau 3.

Tableau 3  
*Densité de puissance maximale et moyenne sur les deux parties du trajet (en mW/m<sup>2</sup>)*

		55,25 MHz	90,5 MHz	99,5 MHz	225,65 MHz	615,25 MHz	639,25 MHz
	Polarisation	H	H	H	V	H	H
De 0 à 750 m	Dens. puis. max (mW/m <sup>2</sup> )	0,58*	1,33	4,20	0,11	1,67	4,20
De 750 à 2500 m	Dens. puis. max (mW/m <sup>2</sup> )	0,73*	0,33	1,06	0,11	0,53	0,84
	Dens. puis. moy (mW/m <sup>2</sup> )	0,73*	0,07	0,21	0,02	0,13	0,08
Valeur de référence	ENV 50166	2000	2000	2000	2000	3100	3200

La dernière ligne du tableau 3 donne, pour le public, à titre de comparaison, la valeur de référence de la densité de puissance selon le projet de Directive Européenne (ENV 50166), dans le cas d'une exposition continue et pour les différentes fréquences présentes.

Le tableau 3 révèle que la densité de puissance la plus élevée concerne la fréquence de 99,5 MHz, à moins de 750 m du pied du pylône<sup>11</sup>, où la densité de puissance mesurée est de 4,2 mW/m<sup>2</sup>. Cette valeur est environ 475 fois inférieure à la limite fixée par le projet de Directive Européenne. Compte tenu du nombre de porteuses, ce sont les émetteurs de la bande FM qui constituent la plus forte contribution à la densité de puissance.

<sup>11</sup> Le maximum se produit à 400 m du pied du pylône

La densité de puissance pour la fréquence de 639,25 MHz est également de 4,2 mW/m<sup>2</sup> à moins de 750 m du pylône, mais la valeur de référence de la pré-norme européenne est plus élevée à cette fréquence.

Le cumul des densités de puissance des différentes fréquences donne une idée de l'exposition totale. En ce qui concerne la bande FM, il faut tenir compte des 3 porteuses pour lesquelles des mesures de champ n'ont pas été réalisées. Comme l'indique le tableau 1, elles ont en général des PAR inférieures et, d'autre part, des mesures de spectres qui ont également été effectuées ont montré que ces porteuses ne produisaient pas de champ supérieur à celui mesuré à 90,5 et 99,5 MHz. Par conséquent, on peut raisonnablement attribuer à ces 3 porteuses une densité moyenne calculée à partir des valeurs mesurées à 90,5 et 99,5 MHz.

Le tableau 4 fournit une estimation de la densité de puissance totale pour les différentes bandes de fréquences. Il est à noter qu'en ce qui concerne les distances comprises entre 750 et 2.500 m, il serait erroné de cumuler les densités *maximales* de puissance, car les relevés de champs montrent que les maxima ne se produisent généralement pas au même endroit; c'est pour cette raison que les valeurs moyennes ont été prises en compte, et non les maxima. Cette remarque pourrait, dans une certaine mesure, aussi s'appliquer aux distances inférieures à 750 m, car dans la bande FM le champ maximum est mesuré à moins de 400 m du pied du pylône, tandis qu'aux fréquences plus élevées le maximum a lieu à environ 500 m.

La comparaison des valeurs mesurées sur les 2 parties du parcours avec les limites reprises dans le tableau 1 du chapitre 1 montre que :

- entre 0 et 750 m, la densité maximale est du même ordre de grandeur que celles des Recommandations UCL-FPMs (24 mW/m<sup>2</sup>) et Inter-Environnement Wallonie (20 mW/m<sup>2</sup>);
- entre 750 et 2.500 m, la densité moyenne est 7 fois plus basse. Elle est 3 fois supérieure à celle de la recommandation CHERRY – SANTINI (1 mW/m<sup>2</sup>).

**Tableau 4**  
**Densité de puissance cumulée pour les différentes bandes (en mW/m<sup>2</sup>)**

		TV 55,25 MHz	FM 100 MHz	DAB 225,65 MHz	TV 600 MHz	Cumul (mW/m <sup>2</sup> )
De 0 à 750 m	Dens. puis. max (mW/m <sup>2</sup> )	0,58*	14**	0,07	5,9	≅ 21
De 750 à 2500 m	Dens. puis. moy (mW/m <sup>2</sup> )	0,73*	0,7**	0,02	1,4	≅ 3
Valeur de référence (mW/m <sup>2</sup> )	ENV 50166	2000	2000	2000	3100	

\* Les valeurs à 55,25 MHz de ce tableau sont celles obtenues lors des mesures ponctuelles

\*\* La densité de puissance pour la totalité de la bande FM a été estimée à partir des résultats à 90,5 et 99,5 MHz

## **ANALYSE ET CONCLUSIONS**

Une antenne GSM, du type directionnel, ayant un gain de 70 (18,5 dBi) et émettant 2 porteuses de 8 W a une puissance apparente rayonnée maximale de 1.120 W environ<sup>12</sup>. En ce qui concerne l'émetteur du Bol d'Air, le tableau 1 indique que la puissance apparente rayonnée totale dépasse un mégawatt, soit environ 1.000 fois la valeur d'une antenne GSM du type le plus courant.

Malgré cette puissance très élevée, le champ et la densité de puissance mesurés restent à des niveaux qui sont du même ordre de grandeur que les Recommandations UCL-FPMs (24 mW/m<sup>2</sup>) et Inter-Environnement Wallonie (20 mW/m<sup>2</sup>); ce résultat est attribuable, notamment, à la hauteur des antennes qui est supérieure à 162 m (sauf pour la fréquence de 96,4 MHz) et à leur directivité élevée qui concentre le rayonnement dans la direction horizontale. Ce résultat illustre, une fois de plus, l'importance de la hauteur de l'antenne et de la forme de son diagramme de rayonnement.

---

<sup>12</sup> PAR = 2 porteuses x 8 W/porteuse x 70 = 1.120 W dans la direction du lobe principal de l'antenne

## CHAPITRE 11

### CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce chapitre résume les principales conclusions et recommandations qui découlent des résultats de l'étude. Nous traitons d'abord le cas des antennes directives et, ensuite, celui des antennes "MICROCELL".

Dans ce chapitre, nous avons adopté, comme point de comparaison, le seuil de 3 V/m qui est assez proche de la limite adoptée en Suisse (pour 900 MHz) et qui est la plus restrictive en Europe. Il s'agit d'un choix arbitraire car, comme nous l'avons écrit précédemment, l'étude qui nous a été confiée n'avait pas pour but d'émettre un avis sur la pertinence de ces différentes normes ou recommandations.

Il est important de rappeler que la puissance rayonnée par une antenne GSM dépend du nombre de conversations en cours dans la cellule; ce nombre est relativement faible pendant les périodes creuses et est presque nul pendant la nuit. A titre d'exemple, une antenne rayonnant 2 fréquences à la puissance<sup>13</sup> de 4 W émettra une puissance pouvant varier entre 0,5 et 8 W, suivant le nombre de conversations en cours. Les différents résultats, ou conclusions, présentés ci-après se rapportent au cas où l'antenne est utilisée à sa pleine capacité. Par conséquent, l'exposition moyenne sur une durée de 24 h sera forcément inférieure. L'extrapolation des résultats à d'autres puissances peut se faire par simple calcul.

D'autre part, il faut ajouter que lorsqu'on se trouve dans un bâtiment, les murs atténuent considérablement le rayonnement (la densité de puissance est réduite d'un facteur compris entre 5 et 10, selon le type de mur).

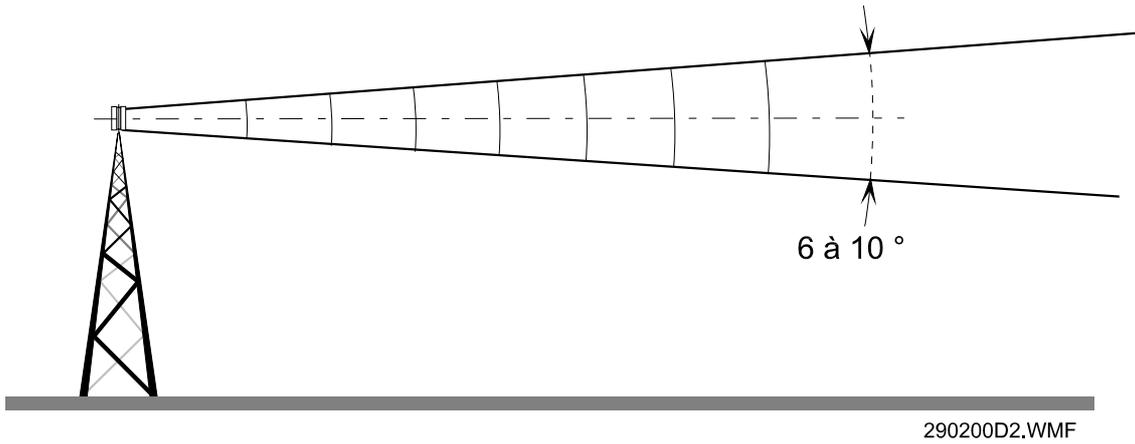
#### **1. ANTENNES DIRECTIVES**

##### **a. Champs dans le faisceau de l'antenne**

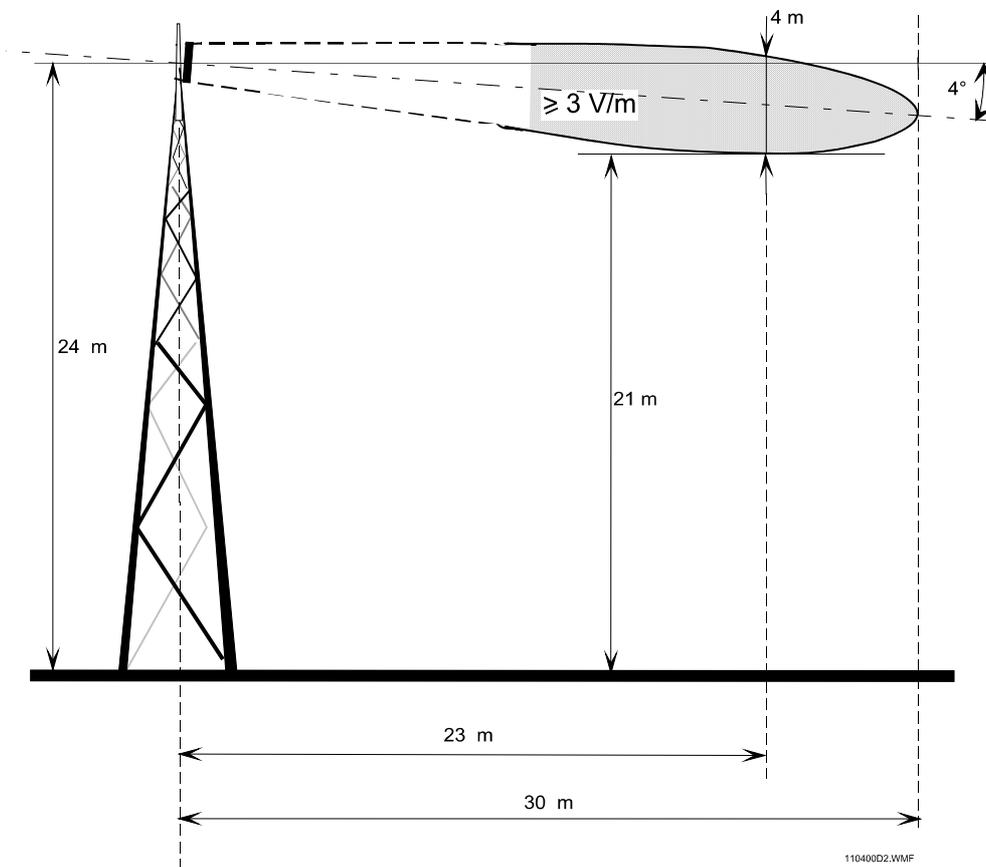
Les champs les plus élevés sont rencontrés dans le faisceau de l'antenne dont la figure 1 représente une coupe verticale. En pratique, l'essentiel du rayonnement est concentré dans un angle généralement compris entre 6 et 10°. Notons qu'il existe bien des antennes ayant un angle d'ouverture de 15°, mais il semble que celles-ci soient de moins en moins utilisées. Dans le plan horizontal, et dans le cas des antennes directives (qui sont les plus courantes), le faisceau couvre un angle de 120 à 180°, selon le type.

---

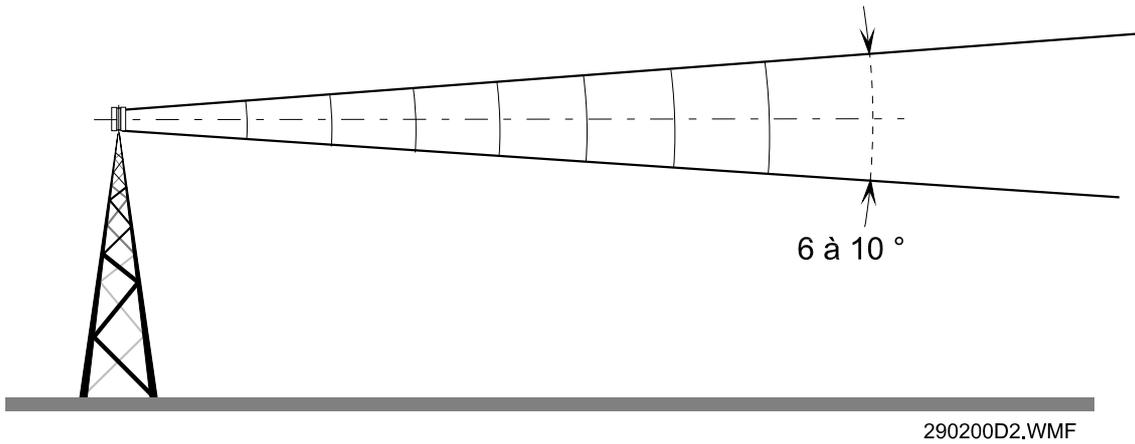
<sup>13</sup> Ce cas est relativement fréquent. On trouve néanmoins des antennes rayonnant 4 ou 6 porteuses de 4 ou 5 W chacune



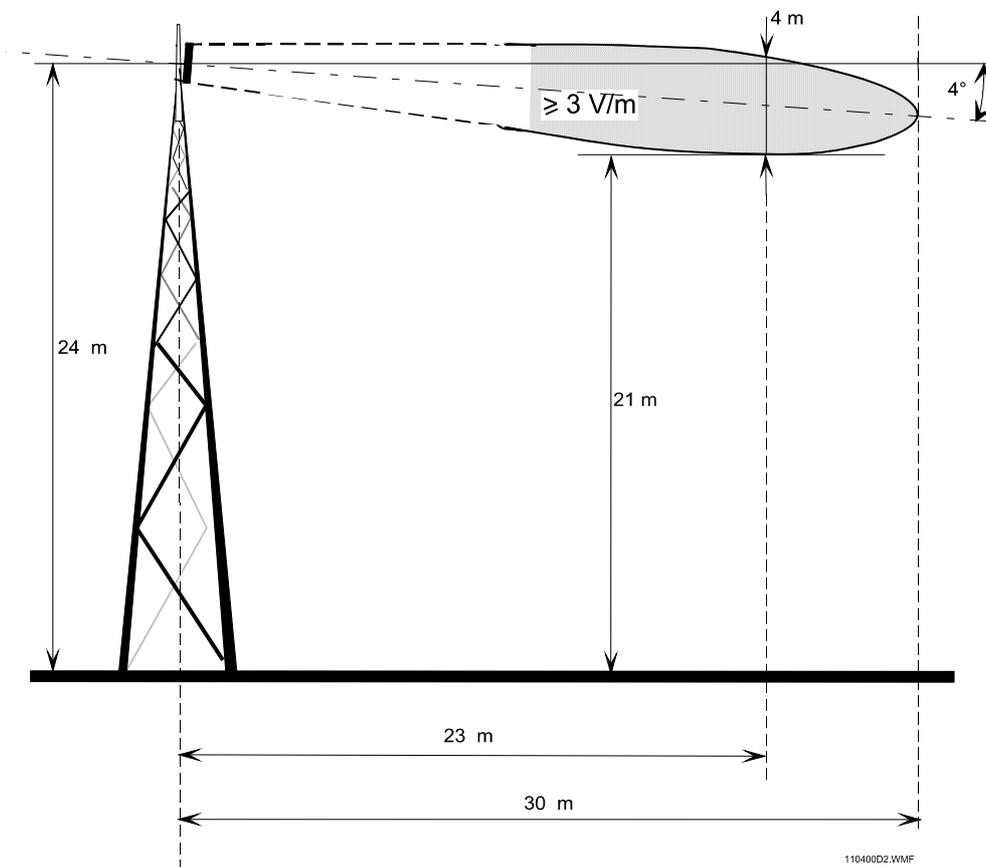
**Figure 1 : Coupe verticale du faisceau d'une antenne**



**Figure 2 : Coupe verticale de la zone où le champ est  $\geq 3$  V/m  
(puissance totale = 8 W - gain = 35 - angle d'inclinaison du faisceau =  $4^\circ$   
antenne KATHREIN de type 739 655)**



**Figure 1 : Coupe verticale du faisceau d'une antenne**



**Figure 2 : Coupe verticale de la zone où le champ est  $\geq 3$  V/m  
(puissance totale = 8 W - gain = 35 - angle d'inclinaison du faisceau = 4°  
antenne KATHREIN de type 739 655)**

Le faisceau peut être représenté de manière assez précise si on prend en compte les caractéristiques exactes de l'antenne et, plus particulièrement, son diagramme de rayonnement. A titre d'exemple, la partie hachurée de la figure 2 représente la zone devant l'antenne où le champ est supérieur à 3 V/m; cette zone a été déterminée par calcul, pour une antenne KATHREIN de type 739 655, en prenant comme hypothèse une puissance totale de 8 W, gain de 35 et un angle de tilt de 4°. La figure 3 indique 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; ce simple 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 relativement imprécis dans la zone située à quelques mètres devant l'antenne (délimitée par un pointillé à la figure 2); cette imprécision n'a toutefois guère de conséquence, puisque cette zone est normalement inoccupée. L'imprécision des calculs est plus problématique en ce qui concerne la zone située à proximité de l'antenne sous le faisceau. Des mesures spécifiques ont été effectuées à cet endroit et les résultats sont présentés au point c ci-dessous.

#### **b. Champs derrière une antenne**

Les champs mesurés à une distance de 2 m derrière une antenne émettant une puissance de 8 W sont toujours inférieurs, voire très inférieurs, à 3 V/m.

#### **c. Champs en dessous d'une antenne**

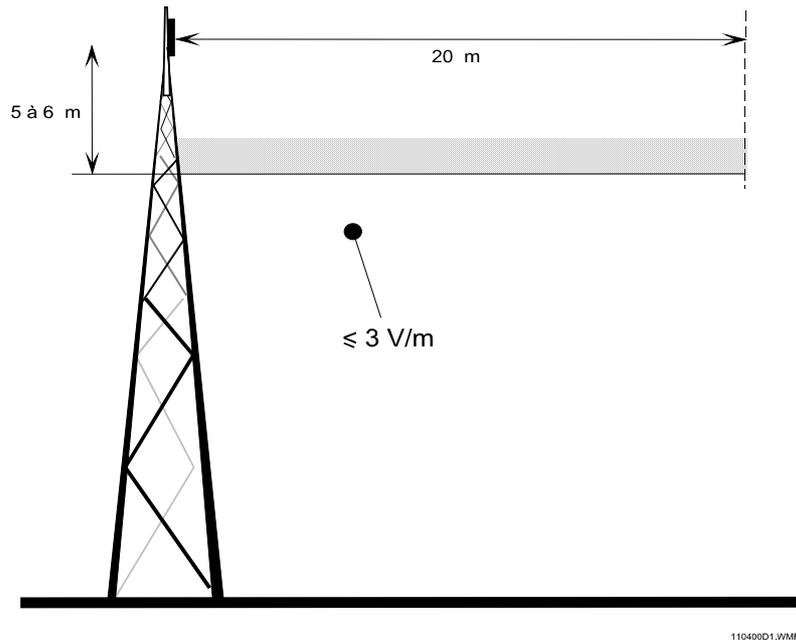
En dessous d'une antenne rayonnant une puissance inférieure ou égale à 30 W (ce qui correspondrait, par exemple, à 6 porteuses de 5 W ou 3 porteuses de 10 W) installée avec un angle de tilt nul, les champs sont presque toujours inférieurs à 3 V/m à un niveau de 5 ou 6 m sous le plan médian de l'antenne<sup>14</sup>, et jusqu'à une distance de 20 m (figure 3), 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 malgré la présence de lobes secondaires.

La zone située au-dessus de l'antenne présente peu d'intérêt, en pratique, puisqu'il est peu probable que des personnes puissent s'y trouver pendant de longues périodes; cette zone n'a fait l'objet d'aucune mesure. Notons que le diagramme de rayonnement n'est pas nécessairement symétrique par rapport à l'horizontale (cas où il y a un tilt électrique) et que l'on ne peut pas extrapoler le résultat de la figure 3 à la zone située au-dessus de l'antenne.

Lorsque qu'une antenne est installée sur le toit d'un bâtiment, comme illustré à la figure 4, les champs mesurés à l'étage inférieur sont très faibles. A titre d'exemple, des mesures réalisées au balcon d'un appartement du dernier étage d'un immeuble, au-dessus duquel des antennes étaient installées, ont montré que le champ maximum était de l'ordre de 0,85 V/m pour une puissance d'émission de 8 W; ce maximum n'était rencontré qu'en quelques points situés juste sous l'antenne. Dans l'appartement du dernier étage, le champ était toujours inférieur à 0,2 V/m; ceci est une conséquence de la directivité des antennes et de l'absorption du rayonnement par le toit.

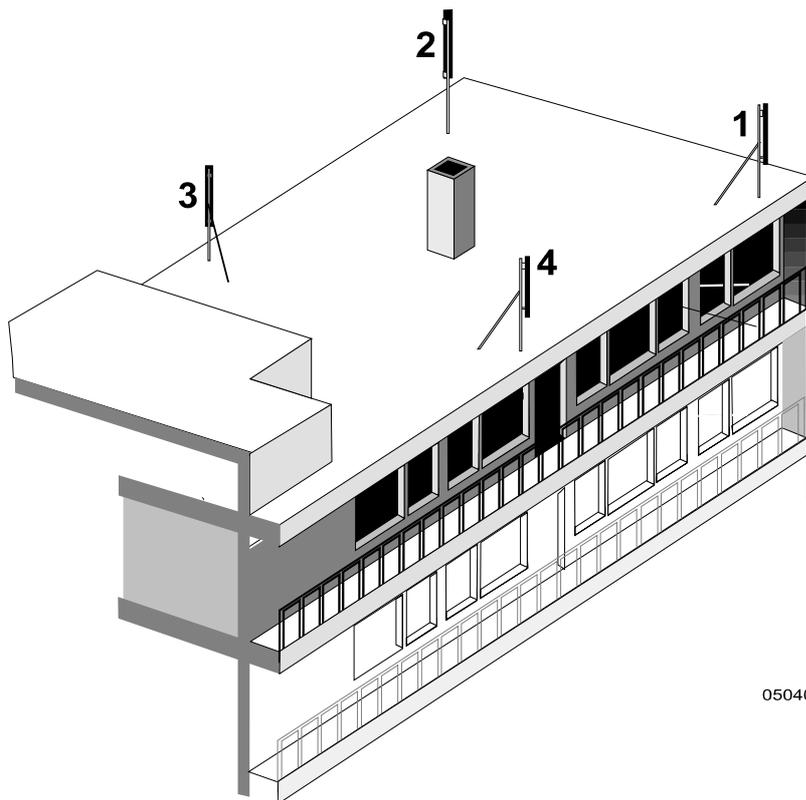
---

<sup>14</sup> C'est-à-dire à 4 ou 5 m sous l'antenne si celle-ci a une hauteur de 2 m



110400D1.WMF

**Figure 3 : Seuil de 3 V/m sous une antenne directive (pour une puissance de 30 W et angle de tilt de 0°)**



050400d1.WMF

**Figure 4 : Antenne installée au bord d'un toit en béton**

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 toutefois veiller à ce que le faisceau ne soit pas dirigé vers des fenêtres ou des terrasses trop proches des antennes.

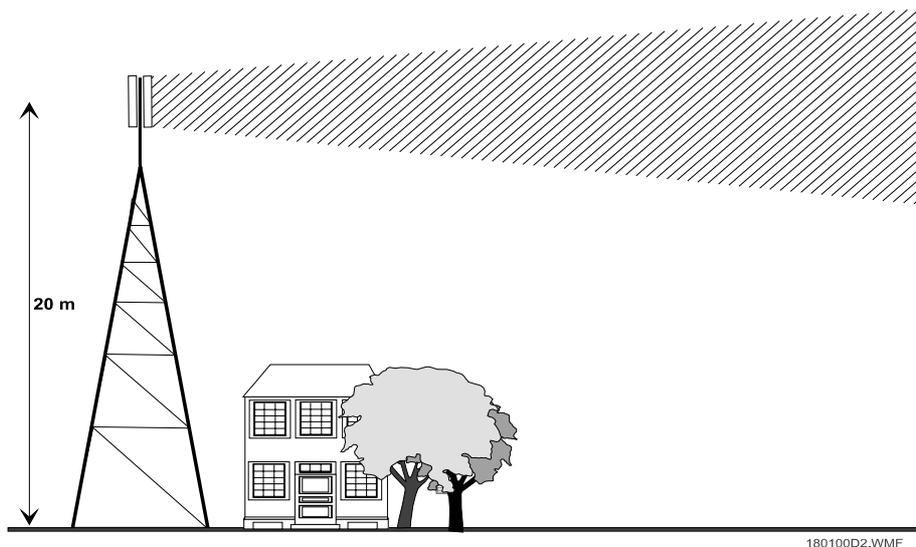
## 2. ANTENNES MICROCELL

Les mesures réalisées à proximité d'une antenne MICROCELL omnidirectionnelle on montré que, pour une puissance de 1 W, le champ électrique dans le plan médian était inférieur à 3 V/m à partir d'une distance de 7 m. A 2 m sous le plan médian, le champ électrique ne dépasse pas 1,6 V/m; il faudrait donc une puissance de 4 W pour que le champ dépasse 3 V/m à cet endroit.

Pour une puissance de 1 W, le champ à 5 m sous le plan médian est toujours inférieur à 0,7 V/m, ce qui correspond à une densité de puissance maximale égale à 1,3 mW/m<sup>2</sup> lorsque l'antenne transmet 8 communications simultanées.

## 3. RECOMMANDATIONS

Les mesures réalisées à proximité d'implantations de différents types ont montré que, pour les antennes directives, des champs dépassant 3 V/m n'existent que dans le faisceau de l'antenne, ou en dessous de celui-ci (à cause des lobes secondaires), à moins de 5 ou 6 m sous le plan médian (c'est-à-dire 4 ou 5 m sous l'antenne) s'il n'y a aucun obstacle. Il y a donc lieu de veiller à ce que le faisceau de l'antenne ne soit pas dirigé vers une zone où pourrait se trouver des personnes pendant une période prolongée; ce faisceau peut être délimité par la courbe d'égale intensité correspondant à la limite de champ imposée; cette courbe, semblable à celle de la figure 2, peut être calculée à partir de formules théoriques et du diagramme de rayonnement de l'antenne.



*Figure 5 : Antennes situées nettement au dessus des habitations*

Dans les cas courants, et s'il n'y a qu'un seul opérateur, la distance, *dans le faisceau* (il se trouve en général nettement au-dessus du sol), à partir de laquelle la densité de puissance est

inférieure à 3 V/m varie entre 30 et 80 m, selon le type d'antenne et la puissance rayonnée. La hauteur de l'antenne par rapport au sol et aux bâtiments voisins est un paramètre prépondérant, comme le prouve les 2 exemples suivants. La figure 5 illustre un cas qui suscite souvent des inquiétudes, à tort, car le rayonnement passe nettement au-dessus du sommet des habitations. Les mesures, à 3 m du sol et à l'extérieur, indiquent que le champ ne dépassait jamais 0,6 V/m (ce qui équivaut à 1 mW/m<sup>2</sup>) pour une puissance rayonnée de 8 W (2 porteuses de 4 W).

L'exemple de la figure 6 requiert plus d'attention puisqu'un bâtiment se trouve dans le faisceau. Dans ce cas, il faut tenir compte de toutes les caractéristiques de l'antenne (puissance, gain, angle d'inclinaison du faisceau, nombre d'opérateurs, etc, ...), afin de contrôler si les limites prescrites sont respectées. Si ce n'est pas le cas, une solution consiste à utiliser un pylône plus élevé.



**Figure 6 : Bâtiment situé dans le faisceau**

Le cas des antennes installées sur le toit, ou le long des façades de bâtiments, ne devrait, normalement, présenter aucun risque pour ses occupants, du fait que les antennes concentrent leur rayonnement dans la direction horizontale et aussi grâce à la protection apportée par le toit et les murs. Par contre, il convient de veiller à ce qu'il n'y ait pas, face aux antennes, de bâtiments trop proches. Il en découle que les craintes soulevées par l'implantation d'antennes sur les toits d'hôpitaux ou d'écoles sont généralement non fondées, car les mesures prouvent que les champs y sont très inférieurs à la recommandation la plus restrictive (1 mW/m<sup>2</sup>).

L'étude a également mis en évidence l'importance de la hauteur de l'antenne par rapport au sol et aux bâtiments voisins et de l'angle d'inclinaison du faisceau (appelé angle de "tilt").

Dans le cas des antennes directives, les mesures ont montré que, dans le faisceau, le champ pouvait être calculé avec une bonne précision lorsqu'on se trouve à plus d'une quinzaine de mètres. Le calcul permet de délimiter le faisceau, comme illustré à la figure 2 ; ce calcul nécessite la connaissance de la forme du diagramme de rayonnement, du gain, de la puissance rayonnée et de l'angle de tilt.

En dessous du faisceau et jusqu'à une vingtaine de mètres de l'antenne, les valeurs fournies aux chapitres 8 et 9 permettent d'estimer le champ maximum à ces endroits.