



Institut Scientifique de Service Public

**ETUDE DES RISQUES LIES A L'EXPOSITION
AUX CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES RAYONNES
PAR LES FAISCEAUX HERTZIENS UTILISES PAR LES
OPERATEURS DE TELEPHONIE MOBILE**

**ETUDE REALISEE A LA DEMANDE
DE LA REGION DE BRUXELLES-CAPITALE**

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

Novembre 2001

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

1. Rôle du faisceau hertzien dans un réseau de téléphonie mobile
2. Caractéristiques des ondes électromagnétiques aux fréquences utilisées par les faisceaux hertziens
3. Normes d'exposition - Effets des rayonnements électromagnétiques aux fréquences utilisées par les faisceaux hertziens
4. Méthode de calcul du champ rayonné par l'antenne d'un faisceau hertzien
 - 4.1. Champ électromagnétique devant l'antenne
 - 4.2. Champ électromagnétique autour de l'antenne
5. Résultats des évaluations
6. Comparaison avec des résultats expérimentaux
7. Conclusions

ANNEXE A Feuilles de calcul

ANNEXE B Conditions de validité des modèles de calcul

- B.1. Champ électromagnétique - Onde plane
- B.2. Champs réactifs et champs de rayonnement
- B.3. Zones de champs réactifs, de champ proche rayonné et de champ éloigné

INTRODUCTION

Ce document présente les résultats d'une étude réalisée à la demande de la Région de Bruxelles-Capitale relative aux risques liés à l'exposition aux champs électromagnétiques rayonnés par les faisceaux hertziens utilisés par les opérateurs de téléphonie mobile.

Cette étude prend en compte deux aspects :

- le risque d'hyperthermie ou de brûlure qui pourrait résulter d'une exposition devant des antennes de faisceaux hertziens; ces antennes étant habituellement placées sur les toits des bâtiments ou au sommet de pylônes, ce risque ne concerne, en principe, que les personnes qui pourraient se trouver momentanément dans le faisceau (par exemple des travailleurs occupés sur une toiture)
- l'exposition permanente des riverains aux champs électromagnétiques produits par ces antennes

L'étude est basée sur les caractéristiques techniques communiquées par les opérateurs.

Le champ rayonné par les faisceaux hertziens a été évalué en considérant les hypothèses « maximalistes », c'est-à-dire :

- puissance égale au maximum de la « fourchette » communiquée par l'opérateur
- calculs effectués au moyen de modèles mathématiques les plus « pessimistes » (c'est-à-dire ceux fournissant les estimations les plus élevées)
- lorsqu'il y avait un doute sur la fiabilité du résultat d'un calcul (notamment dans la zone des champs proches), l'évaluation a été faite de manière à éviter toute sous-estimation

Le document est structuré de la manière suivante :

- le premier paragraphe donne un aperçu de la fonction du faisceau hertzien dans un réseau de téléphonie mobile
- le paragraphe 2 présente brièvement les caractéristiques essentielles des ondes électromagnétiques aux fréquences utilisées par les faisceaux hertziens
- les normes d'exposition et les effets des champs électromagnétiques aux fréquences concernées sont abordées au paragraphe 3
- les méthodes de calcul du champ devant et autour des antennes des faisceaux hertziens sont décrites au paragraphe 4. Les conditions de validité des méthodes de calcul utilisées sont également précisées en annexe B



Institut Scientifique de Service Public

- les résultats des évaluations sont résumés au paragraphe 5; le détail est également repris en annexe A. Une comparaison avec des résultats expérimentaux disponibles est faite au paragraphe 6
- le paragraphe 7 résume les conclusions de l'étude

1. RÔLE DU FAISCEAU HERTZIEN DANS UN RESEAU DE TELEPHONIE MOBILE

La figure 1 décrit le principe de base d'un réseau de téléphonie mobile, et plus particulièrement celui d'un réseau GSM dans lequel la transmission radio entre le téléphone portable et l'antenne-relais s'effectue dans une bande de fréquences proche de 900 MHz.

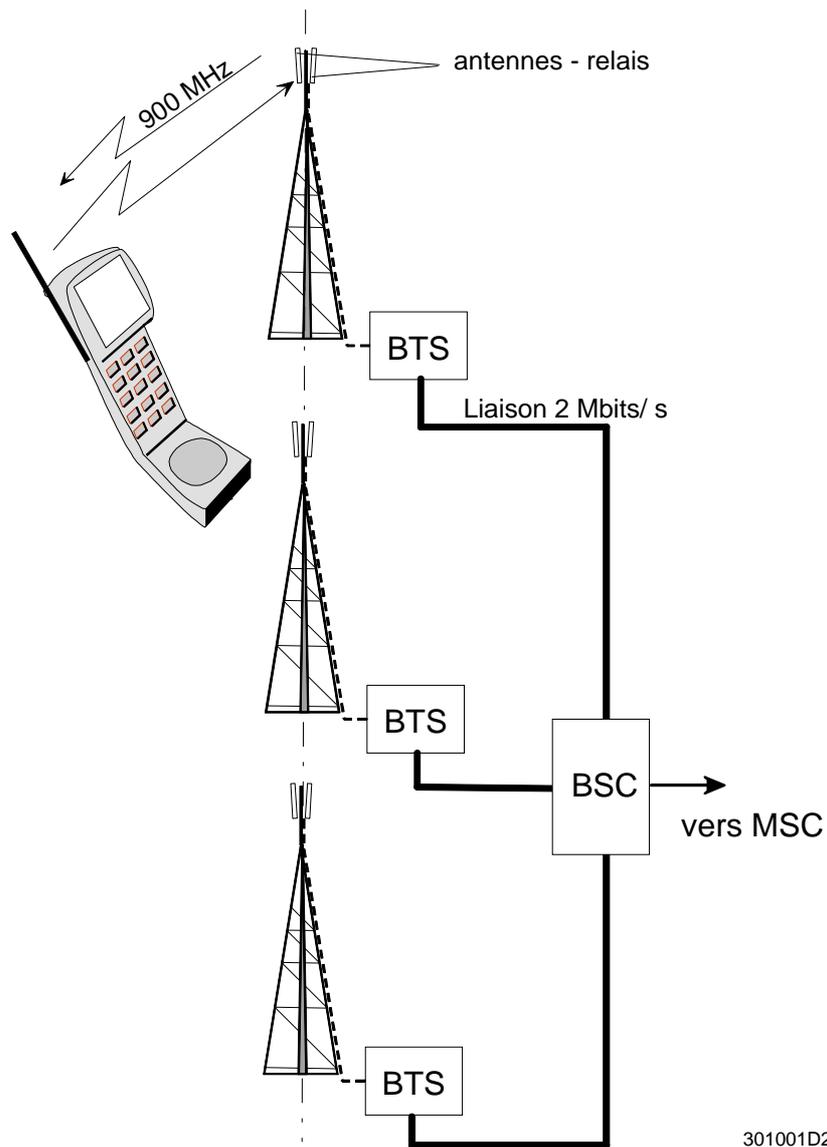


Figure 1 : Architecture de base d'un réseau de téléphonie mobile

Les signaux émis par le portable sont captés par l'antenne-relais et sont « traités » par les équipements électroniques de la BTS (« Base Transmission System »). Chaque antenne-relais couvre une zone dont la taille dépend de la densité de trafic; en zone urbaine, le rayon peut être de quelques centaines de mètres (et même moins pour les micro-cellules); en zone peu peuplée, il est de quelques kilomètres.

L'ensemble des BTS d'une certaine zone géographique sont connectées à une « Base Station Controller » qui lui-même relié à un commutateur appelé MSC (« Mobile Switching Center »), lequel est connecté au réseau téléphonique de BELGACOM, ainsi qu'aux réseaux de téléphonie mobile des opérateurs concurrents.

Seule la connexion entre la BTS et le BSC est concernée par la présente étude; il s'agit d'une liaison à haut débit (2 Mbits/s) qui peut être réalisée de deux manières :

- par un câble, c'est-à-dire une ligne louée à BELGACOM
- par un faisceau hertzien consistant en une transmission par onde radio à une fréquence très élevée (supérieure ou égale à 15 GHz dans le cas de opérateurs de téléphonie mobile)

Une transmission par câble représente un coût de location relativement important et nécessite la pose d'un câble, ce qui peut, dans certaines situations, impliquer un délai assez long. Un faisceau hertzien a un coût d'utilisation (maintenance et redevance IBPT) inférieur à celui d'une ligne louée.

Il faut toutefois signaler, qu'aux fréquences supérieures à quelques GHz, l'atténuation des obstacles est très importante (même le feuillage d'un arbre est suffisant pour perturber la transmission). Par conséquent, une liaison par faisceau hertzien ne peut être utilisée que si ses extrémités sont en vue directe l'une de l'autre; comme ceci n'est que très rarement le cas pour les BTS éloignées du BSC, la connexion peut être réalisée en plusieurs « sauts » comme illustré à la figure 2 sur laquelle les points A et B sont en vue directe, de même que B et C, ainsi que C et le BSC.

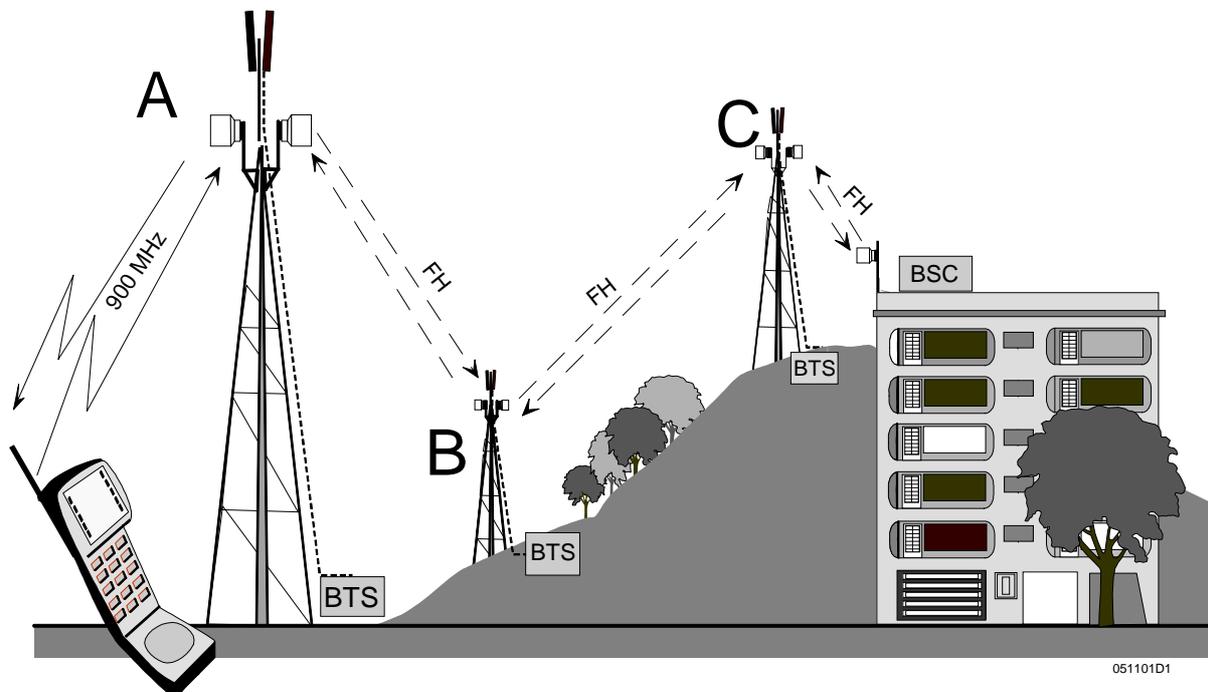


Figure 2 : Connexion en plusieurs « sauts »
(les lettres FH correspondent aux liaisons par faisceau hertzien)

2. CARACTERISTIQUES DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES AUX FREQUENCES UTILISEES PAR LES FAISCEAUX HERTZIENS

En Belgique, les fréquences allouées aux faisceaux hertziens utilisés dans les réseaux de téléphonie mobile sont toutes égales ou supérieures à 15 GHz (il existe également des faisceaux hertziens fonctionnant à des fréquences plus basses, mais ceux-ci sont employés dans d'autres applications que la téléphonie mobile).

Le tableau 1 reprend les bandes de fréquences allouées aux trois opérateurs utilisant des faisceaux hertziens dans la Région de Bruxelles-Capitale; PROXIMUS et DOLPHIN TELECOM ont confirmé ne pas employer cette technologie à Bruxelles.

Tableau 1
***Fréquences allouées aux opérateurs de téléphonie mobile
pour les transmissions par faisceau hertzien***

Opérateurs	Fréquences (GHz)
ASTRID	18 - 23
MOBISTAR	15 - 26
KPN-ORANGE	18 - 26 - 38

Les antennes des faisceaux hertziens sont de type parabolique (figure 3); le boîtier de forme cylindrique dans lequel elles sont contenues (et auquel elles doivent leur surnom de « casserole ») leur donne un aspect très différent des antennes « satellites » utilisées pour la réception d'émissions de télévision.

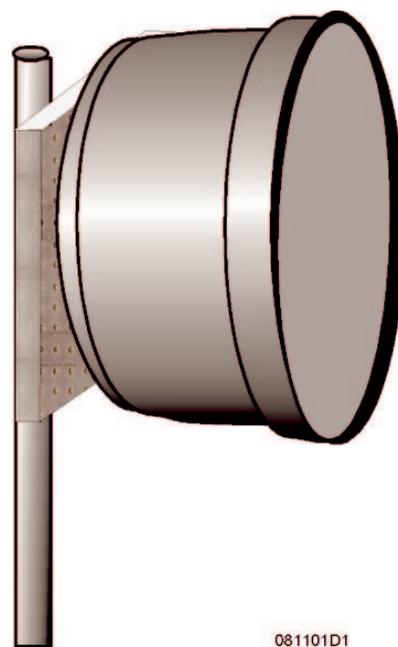


Figure 3 : Antenne parabolique d'un faisceau hertzien

L'arrière et le pourtour cylindrique constituent un blindage métallique; la partie avant est réalisée dans une matière plastique qui n'absorbe que très faiblement le rayonnement électromagnétique.

De manière générale, les antennes paraboliques ont comme particularité de produire un rayonnement « concentré » dans un faisceau extrêmement étroit; celles des faisceaux hertziens ont un angle d'ouverture généralement compris entre 1 et 3° selon le type (figure 4). Précisons toutefois qu'il s'agit de l'angle d'ouverture à 3 dB, c'est-à-dire l'angle dans lequel la densité de puissance (en W/m^2) est supérieure ou égale à 0,5 fois la valeur atteinte dans la direction où l'intensité du rayonnement est maximale (celle-ci se produisant au centre du faisceau et notée S_{max} sur la figure 4); ceci signifie qu'à l'intérieur de l'angle d'ouverture, la densité de puissance est comprise entre 0,5 et 1 fois la densité maximale. Toutefois, le champ électromagnétique n'est pas nul en dehors de l'angle d'ouverture; son intensité peut être calculée, à une certaine distance, au moyen du diagramme de rayonnement de l'antenne. Sans anticiper sur les résultats, qui seront exposés au § 5, il est clair que les propriétés de directivité des antennes des faisceaux hertziens ont pour conséquence que le diamètre du faisceau est très petit.

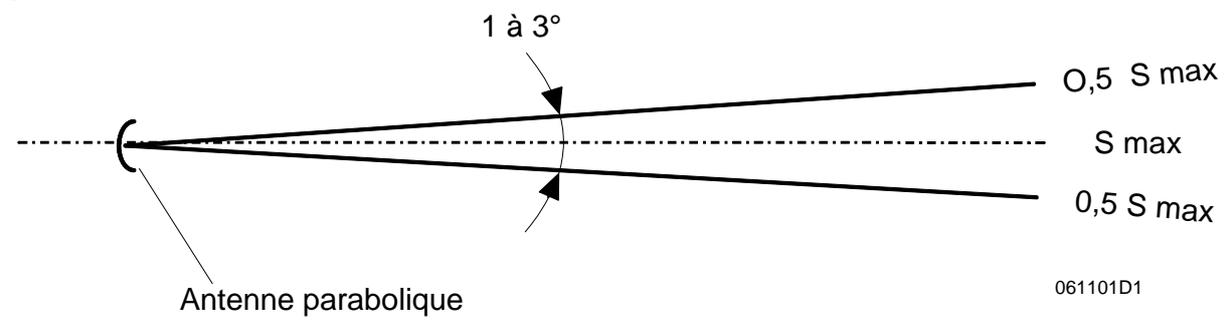


Figure 4 : Angle d'ouverture d'une antenne

D'autre part, aux fréquences comprises entre 10 et 20 GHz, la densité de puissance d'une onde électromagnétique traversant une cloison légère (en bois ou en plâtre), une fenêtre ou un toit en tuiles ou en ardoises, subit une atténuation par un facteur dont l'ordre de grandeur est compris entre 10 et 100 (l'atténuation réelle dépend de divers paramètres, tels que : la fréquence, l'épaisseur et la nature de l'obstacle, son taux d'humidité, etc.). De même, un mur en briques d'épaisseur moyenne réduit la densité de puissance (et par conséquent l'exposition) d'un facteur compris entre 1.000 et 10.000; l'atténuation d'un toit en béton armé est encore plus élevée. Le tableau 2 résume ces données; l'affaiblissement correspondant du champ électromagnétique¹ (exprimé en V/m) est également indiqué, ainsi que la valeur correspondante en décibel (dB).

Il est à noter qu'aux fréquences de 23, 26 et 38 GHz, utilisées par certains opérateurs, l'atténuation est supérieure aux valeurs du tableau 2, puisqu'elle augmente avec la fréquence.

¹ La densité de puissance étant proportionnelle au carré du champ, une réduction de la densité de puissance par un facteur 100 se traduit par une réduction du champ d'un facteur 10.

Tableau 2
Ordre de grandeur de l'atténuation due aux obstacles
(fréquences entre 10 et 20 GHz)

Type d'obstacle	Facteur de réduction de la densité de puissance	Facteur de réduction de champ électromagnétique	Atténuation en dB
Cloison légère, fenêtre, toit en tuiles ou en ardoises	10 à 100	3 à 10	> 10 dB
Mur en briques	1.000 à 10.000	30 à 100	> 30 dB

La nécessité d'avoir les extrémités d'une liaison par faisceau hertzien en vue directe est une conséquence de cette atténuation élevée; il est donc impératif, pour garantir la fiabilité de la transmission, que les antennes d'une liaison par faisceau hertzien soient placées de telle manière que le faisceau ne puisse jamais être interrompu par aucun obstacle.

Ajoutons également que l'atténuation due aux obstacles est beaucoup plus élevée aux fréquences utilisées par la faisceaux hertziens qu'elle ne l'est aux fréquences allouées à la liaison entre l'antenne-relais et le portable; celles-ci sont respectivement de 400, 900 et 1.800 MHz pour les réseaux TETRA (ASTRID et DOLPHIN TELECOM), GSM (PROXIMUS et MOBISTAR) et DCS 1800 (PROXIMUS, MOBISTAR et KPN-ORANGE).

3. NORMES D'EXPOSITION - EFFETS DES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES AUX FREQUENCES UTILISEES PAR LES FAISCEAUX HERTZIENS

Le Gouvernement fédéral a adopté, par Arrêté royal du 29 avril 2001, une norme d'exposition relative aux champs électromagnétiques rayonnés par des antennes dans la gamme des fréquences comprises entre 10 MHz et 10 GHz; cette norme introduit un facteur de précaution supplémentaire de quatre par rapport aux recommandations de l'ICNIRP². Toutefois, la norme belge ne couvre qu'une partie très limitée du spectre des champs électromagnétiques; le Rapport au Roi, également publié dans le Moniteur du 29 mai 2001, précise au point 7, intitulé « Discussion par article » que « pour les autres fréquences, les recommandations européennes et internationales sont d'application ». Les recommandations du Conseil de l'Europe³, qui sont identiques à celles de l'ICNIRP, précisent des limites applicables entre 0 Hz et 300 GHz.

² ICNIRP guidelines (1998).

³ Recommandation du Conseil du 12 juillet 1999 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz); cette recommandation a été publiée, au Journal Officiel des Communautés Européennes, le 30 juillet 1999. La recommandation du Conseil de l'Europe est identique à celles de l'ICNIRP, mais ne concerne que le public. La recommandation de l'ICNIRP prévoit deux catégories de limites, selon qu'il s'agit du public ou de travailleurs.

Nous traiterons donc le cas des faisceaux hertziens, selon les recommandations de l'ICNIRP ou du Conseil de l'Europe, et de manière à tenir compte d'un facteur de précaution supplémentaire, nous ferons également une évaluation par rapport à un seuil de 3 V/m choisi arbitrairement et équivalant à une densité de puissance de 24 mW/m².

Les recommandations de l'ICNIRP, ou du Conseil de l'Europe, sont fondées directement sur les effets avérés sur la santé. Ces recommandations fixent des limites d'exposition qui sont fonction de la fréquence. Au-dessus de 2 GHz et jusqu'à 300 GHz, la densité de puissance moyenne⁴ ne peut dépasser 10 W/m², ce qui correspond à un champ électrique de 61 V/m; précisons que ces limites concernent le public; elles sont cinq fois plus élevées lorsqu'il s'agit de travailleurs professionnellement exposés.

Selon les recommandations de l'ICNIRP, ou du Conseil de l'Europe, l'unique effet avéré, au-dessus de 10 GHz, est un échauffement des tissus à la surface du corps, ou à proximité de cette surface car le rayonnement ne pénètre qu'à une profondeur de l'ordre de quelques millimètres.

N.B. :

Aux fréquences plus basses, l'échauffement des tissus se produit jusqu'à une profondeur qui est inversement proportionnelle à la fréquence. Entre 0 et 10 MHz, les limites d'exposition des recommandations de l'ICNIRP, ou du Conseil de l'Europe, tiennent également compte des effets sur les fonctions du système nerveux qui sont produits par les courants induits dans le corps.

En ce qui concerne l'effet thermique aux fréquences inférieures à 10 GHz, les recommandations de l'ICNIRP, ou du Conseil de l'Europe, ont été établies de manière à garantir que l'élévation de température ne dépasse pas 0,02 degré centigrade en moyenne.

4. METHODE DE CALCUL DU CHAMP RAYONNE PAR L'ANTENNE D'UN FAISCEAU HERTZIEN

Comme exposé aux § 2 et 3, toute interruption par un obstacle du trajet d'un faisceau hertzien perturbera la transmission. Par conséquent, les antennes doivent donc être placées de telle manière que personne ne puisse interrompre le faisceau, ce qui réduit fortement la probabilité qu'un riverain puisse se trouver à cet endroit. Toutefois, on ne peut totalement exclure que des travailleurs (plombiers-zingueurs, peintres, ...) effectuant des travaux sur le toit d'un bâtiment puissent se trouver momentanément dans le faisceau. Nous traiterons ce cas en considérant l'hypothèse la plus défavorable, c'est-à-dire celle d'une personne se trouvant en face de l'antenne, à proximité immédiate de celle-ci, comme illustré à la figure 5. L'étude de ce cas est présentée dans le § 4.1. intitulé « Champ électromagnétique devant l'antenne ». Nous évaluerons le risque de brûlure ou d'hyperthermie en nous référant aux recommandations de l'ICNIRP, ou du Conseil de l'Europe, applicables au public. En effet, les catégories de travailleurs citées ci-dessus ne sont pas nécessairement informées des mesures de précautions à adopter en présence de champs électromagnétiques; par conséquent, elles doivent être considérées comme faisant partie du public.

⁴ La densité moyenne doit être calculée sur une période de 4 minutes à 15 GHz ; par exemple, la durée d'exposition ne pourra dépasser une minute si la densité de puissance est de 40 W/m².

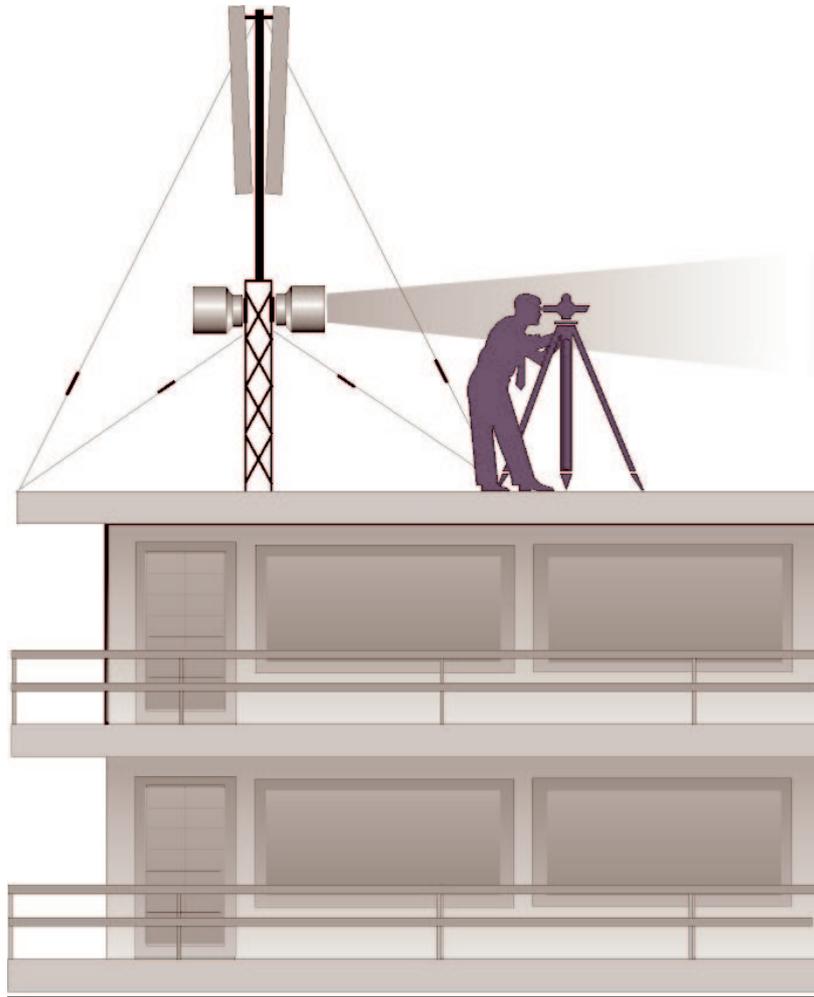


Figure 5 : Exposition dans le faisceau d'une antenne parabolique

Nous calculerons également l'exposition à laquelle sont soumis les riverains d'un faisceau hertzien; la méthode est décrite dans le § 4.2. intitulé « Champ électromagnétique autour de l'antenne ». Comme il s'agit d'une exposition permanente, nous avons choisi, arbitrairement, de nous référer à une limite de 3 V/m, qui est 400 fois plus restrictive que les recommandations de l'ICNIRP, ou du Conseil de l'Europe, qui sont applicables au public.

Les calculs de champ, devant et autour de l'antenne, font appel à des méthodes de calcul spécifiques et dont les domaines de validité (dans l'espace) sont différents; la question des conditions de validité des modèles de calcul est abordée au § 4.2. ainsi que dans l'annexe B.

4.1. Champ électromagnétique devant l'antenne

On trouve, dans la littérature, plusieurs exposés de méthodes calcul du champ électromagnétique devant une antenne parabolique et dont nous décrivons brièvement le principe ci-après; ces méthodes reposent sur le mode de fonctionnement de ce type d'antenne.

Comme le montre la figure 6, une antenne parabolique comporte une source de rayonnement (que nous appellerons source primaire) qui est généralement constituée d'un guide d'ondes dont l'ouverture (comprenant éventuellement un cornet) est placée au foyer de la parabole. Il découle des propriétés géométriques de la parabole que les rayons réfléchis sortent parallèlement à l'axe de celle-ci. Par conséquent, l'énergie rayonnée par la source primaire reste concentrée, au moins à 90 % (voir [3], page 134) dans un faisceau tubulaire dont le diamètre est pratiquement égal à celui de la parabole. On notera cependant que la densité de puissance n'est pas nécessairement uniforme dans le cylindre, car elle dépend du diagramme de rayonnement de la source primaire.

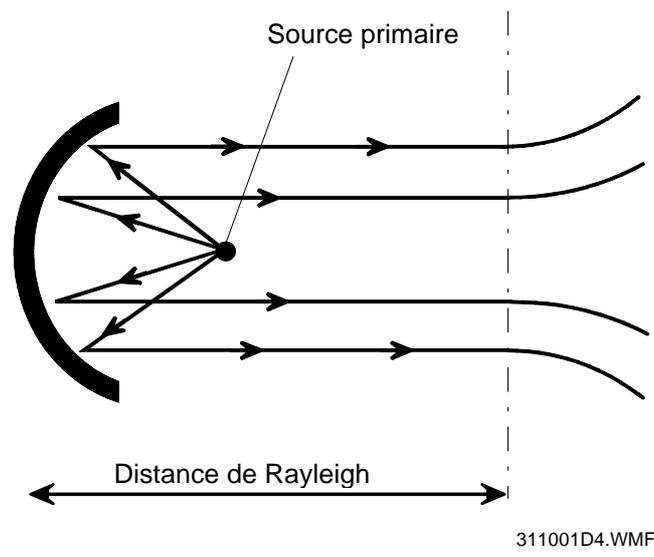


Figure 6 : Propagation du rayonnement devant une antenne parabolique

En faisant appel à la théorie ondulatoire, Rayleigh a démontré que le rayonnement en faisceau parallèle ne se maintient que jusqu'à une distance égale à d_R (appelée distance de Rayleigh) qui est donnée par :

$$d_R = \frac{D^2}{2\lambda} \tag{1}$$

où D représente le diamètre de la parabole et λ la longueur d'onde du rayonnement émis.

Au-delà de la distance $D^2/2\lambda$, la propagation passe à un mode radial et le faisceau s'élargit progressivement (ce phénomène a été volontairement exagéré sur la figure 6). Par conséquent, le champ décroît selon une loi en $1/d$ (où d est la distance par rapport à l'antenne). La densité de puissance S , dans la zone de Rayleigh, peut être calculée avec une assez bonne approximation, en considérant que la puissance rayonnée par la source primaire se propage dans un faisceau tubulaire de diamètre D . Si l'on considère le cas élémentaire où la densité de puissance est uniforme dans la section tubulaire, on obtient :

$$S = \frac{P}{A} \tag{2}$$

où P représente la puissance fournie à l'entrée de l'antenne (en W) et A est la surface du tube (en m²) qui est égale à $\pi D^2/4$.

En pratique, le profil de la densité de puissance dans le tube n'est généralement pas uniforme. En effet, la source primaire produit une « illumination » qui est plus intense au centre de la parabole que sur les bords; ce profil d'illumination est étudié pour réduire l'intensité du rayonnement dans les lobes secondaires, c'est-à-dire en dehors de l'angle d'ouverture. La figure 7 présente trois profils d'illumination typiques; l'axe vertical correspond à l'intensité de l'illumination le long d'un diamètre du tube; les trois courbes d'intensité sont proportionnelles, respectivement, à une fonction cos, cos² et cos³. On constate que l'intensité au centre du faisceau tubulaire est beaucoup plus élevée que l'intensité sur la périphérie.

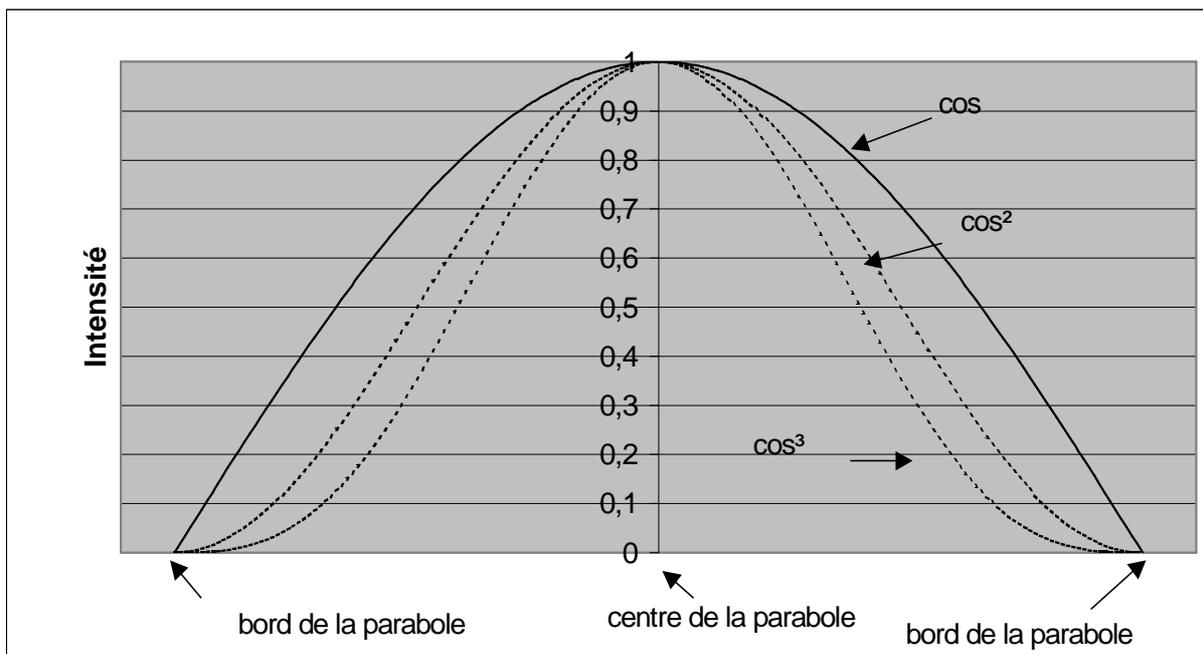


Figure 7 : Profils d'illumination d'antenne fréquemment utilisés

On trouve dans la littérature scientifique (voir [1], pages 89 à 107 et [2]) diverses formules qui tiennent compte d'un éclairage non uniforme de l'antenne; la référence [1] donne les deux formules suivantes :

$$S_{\max} = \frac{2P}{D^2} \tag{3}$$

$$S_{\max} = \frac{P \cdot G}{4\pi d_R^2} \quad (4)$$

dans lesquelles S_{\max} est la densité de puissance au centre du faisceau.

La relation (3) est une formule approchée dans laquelle la densité de puissance maximale (au centre du tube) est supérieure de 57 % à celle correspondant à une illumination uniforme obtenue par la formule (1).

La formule (4), dans laquelle d_R est la distance de Rayleigh définie ci-dessus, fait intervenir le gain G de l'antenne.

La formule proposée dans la référence [2] est la suivante :

$$S_{\max} = \frac{3P}{A} \quad (5)$$

dans laquelle P et A ont la même signification que dans la relation (2).

La formule (5) a été établie en considérant le profil d'illumination conduisant à la densité de puissance (au centre du faisceau) la plus élevée. La densité de puissance maximale obtenue avec cette formule est le triple de celle qui correspond à une illumination uniforme (formule (2)). L'estimation fournie par la formule (5) peut s'avérer, dans certains cas, nettement supérieure à la valeur réelle. On admettra qu'une certaine imprécision dans la méthode de calcul est acceptable lorsque l'erreur va dans le sens de la sécurité; ce qui justifie le choix, dans la présente étude, de cette formule pour calculer la densité de puissance devant l'antenne.

4.2. Champ électromagnétique autour de l'antenne

N.B. :

Le lecteur uniquement intéressé par les résultats peut éventuellement passer ce paragraphe très technique.

De manière générale, la validité et la précision des méthodes de calcul du champ électromagnétique en un point de l'espace dépendent de la distance entre ce point et la source d'émission. De manière à clarifier cet aspect, il faut rappeler que le volume entourant une antenne peut être décomposé en quatre parties (figure 8) comprenant :

- la zone où le champ réactif est dominant⁵ (distance depuis l'antenne comprise entre 0 et $\lambda/2\pi$ - cette zone représente un volume négligeable aux fréquences concernées par la présente étude)

⁵ En fait, le champ réactif subsiste jusqu'à une distance de l'antenne qui est de l'ordre de la longueur d'onde, mais il peut être démontré, notamment pour les antennes monopôles et dipôles, que le champ proche rayonné est supérieur au champ réactif au-delà d'une distance égale à $\lambda/2\pi$.

- la zone de champ proche rayonné comprenant :
 - la zone de Rayleigh (distance depuis l'antenne comprise entre $\lambda/2\pi$ et $D^2/2\lambda$)
 - la zone de transition (distance depuis l'antenne comprise entre $D^2/2\lambda$ et $2D^2/\lambda$)
- la zone de champ éloigné également appelée zone de Fraunhofer (distance depuis l'antenne supérieure $2D^2/\lambda$)

Dans ces différentes limites de zones, D représente la plus grande dimension de l'antenne dans la direction perpendiculaire à la direction du rayonnement (en m); en fait, il s'agit de la plus grande dimension de l'antenne « vue » depuis le point considéré ; dans le cas d'une antenne parabolique, cette plus grande dimension est le diamètre de l'antenne.

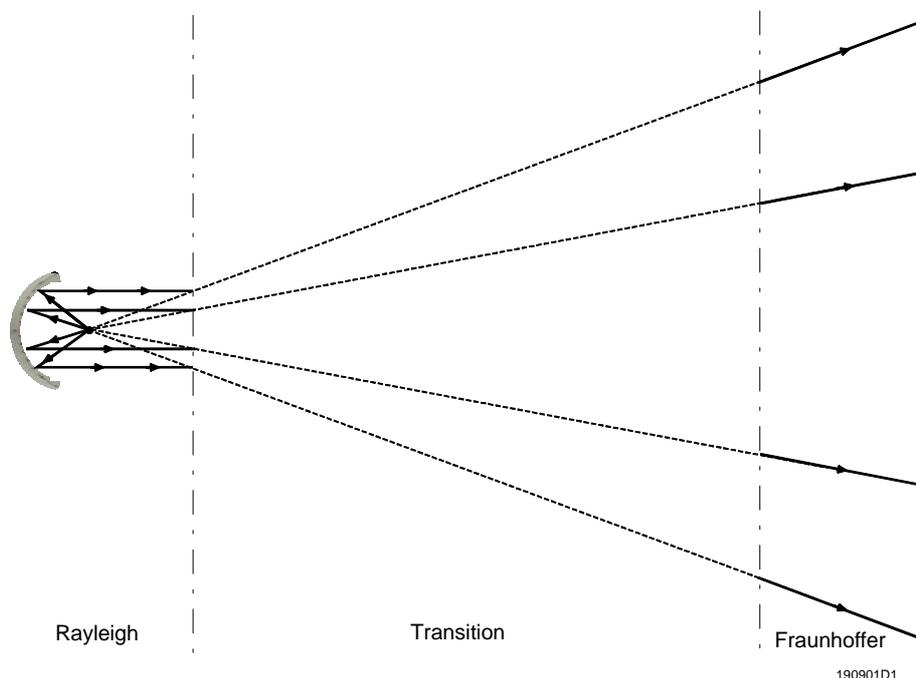


Figure 8 : Zones de champ devant une antenne parabolique

Afin de fixer les ordres de grandeurs, le tableau 3 donne les distances correspondant à ces différentes zones pour quelques types d'antennes utilisés par les opérateurs.

Tableau 3
Longueur de la zone des champs réactifs, distances de Rayleigh et de Fraunhofer pour quatre types d'antennes

	Formules	18 GHz - 30 cm	18 GHz - 60 cm	26 GHz - 60 cm	38 GHz - 60 cm
Zone des champs réactifs	$\lambda/2\pi$	2,6 mm	2,6 mm	1,8 mm	1,2 mm
Distance de Rayleigh	$D^2/2\lambda$	2,7 m	10,8 m	15,6 m	22,8 m
Distance de Fraunhofer	$2D^2/\lambda$	10,8 m	43,2 m	62,4 m	91,2 m

Le calcul du champ est relativement simple dans la zone de champ éloigné; il peut être effectué au moyen des formules dites « du champ éloigné »; il est couramment admis que ces formules :

- offrent une bonne précision dans la zone de champ éloigné
- offrent une précision tout à fait suffisante dans la zone de transition
- fournissent, généralement, une estimation du **champ moyen** qui est supérieure à la valeur réelle jusqu'à une distance de l'ordre de quelques longueurs d'onde; notons qu'une surestimation par rapport à la valeur réelle est acceptable, puisqu'elle va dans le sens de la sécurité

Ces considérations, relatives à la précision des formules du champ éloigné, justifient le choix de celles-ci comme modèle de calcul applicable dans la zone de champ éloigné et dans la zone de transition, c'est-à-dire pour une distance égale ou supérieure à $D^2/2\lambda$. En deçà de cette distance, nous considérons que la fiabilité des formules du champ éloigné ne peut être garantie.

L'expression (6) est la formule du champ éloigné permettant de calculer l'intensité de la composante électrique du champ.

$$E = \frac{(30 P \cdot G)^{1/2}}{A(\phi, \theta) \cdot d} \quad (6)$$

avec :

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

Le terme A(ϕ, θ) de l'expression (6) est déduit des diagrammes de rayonnement de l'antenne; ces diagrammes fournissent des renseignements quantitatifs sur l'effet directionnel d'une antenne (intensité du rayonnement en fonction de la direction considérée).

Les diagrammes de rayonnement constituent une base importante pour le calcul du champ électromagnétique au moyen des formules du champ éloigné. Les constructeurs d'antennes paraboliques fournissent les diagrammes de rayonnement sous forme de graphiques ou de tableaux. Le haut de la figure 9 représente ce type de graphique. Pour les calculs, il a lieu de tenir compte que la précision des angles est assez médiocre, particulièrement en ce qui

concerne les lobes secondaires, par conséquent, il est préférable d'utiliser un diagramme modifié qui est la «courbe enveloppe⁶» reliant les extrémités des lobes secondaires, comme l'illustre le bas de la figure 9; cette manière de procéder conduit évidemment à une surestimation globale du rayonnement émis en dehors du lobe principal, ce qui va dans le sens de la sécurité

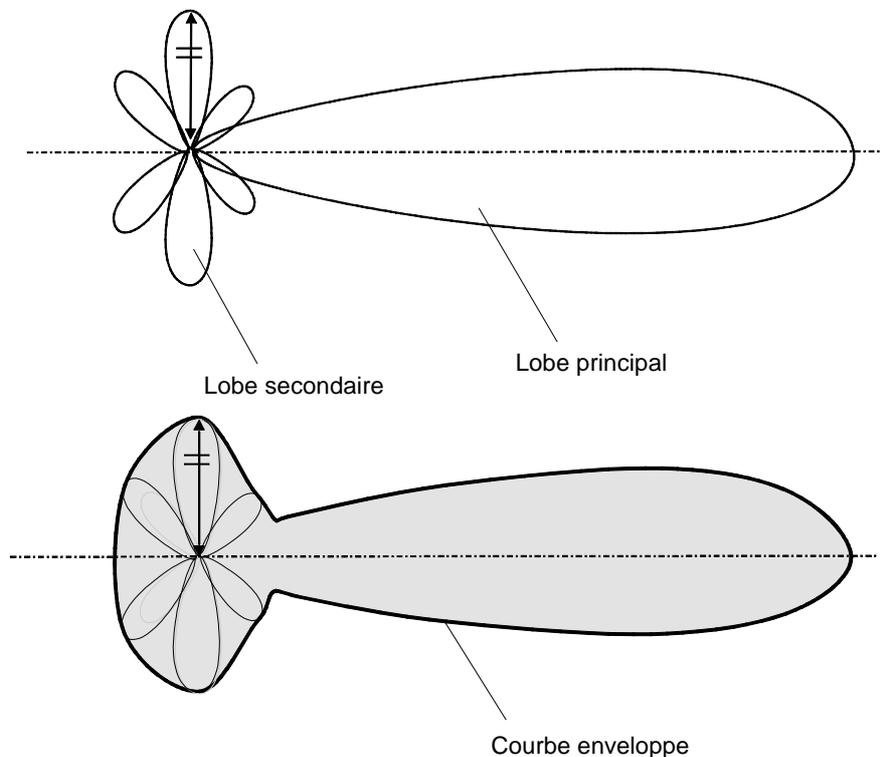


Figure 9 : Courbe enveloppe du diagramme de rayonnement

L'expression (6) permet, au moyen de l'enveloppe du diagramme de rayonnement, de calculer une courbe d'iso-valeur du champ électromagnétique. Il s'agit d'une courbe d'égale intensité du champ électromagnétique. La figure 10 représente une telle courbe pour une valeur de référence de 3 V/m, correspondant à une antenne parabolique de type NOKIA 18 GHz - 60 cm rayonnant une puissance de 65 mW. Il s'agit d'une courbe d'iso-valeur située dans un plan contenant l'axe du lobe principal que nous avons fait coïncider avec l'axe des abscisses. En principe, le champ réel, en tout point de la courbe est inférieur⁷ ou égal à 3 V/m; à l'extérieur de la courbe, le champ est inférieur à cette valeur.

Il est à noter que la courbe de la figure 10 est pratiquement la même, quel que soit le plan axial considéré lorsque le diagramme de rayonnement de l'antenne présente une symétrie de révolution autour de l'axe du faisceau, ce qui est le cas, en première approximation, pour les antennes paraboliques à ouverture circulaire utilisées par les opérateurs de téléphonie mobile.

⁶ Cette courbe est appelée « Radiation Pattern Envelope » en anglais.

⁷ Le champ réel, en un point de l'iso-valeur 3 V/m, pourrait être inférieur à cette valeur puisque le calcul est basé sur la courbe enveloppe du diagramme de rayonnement.

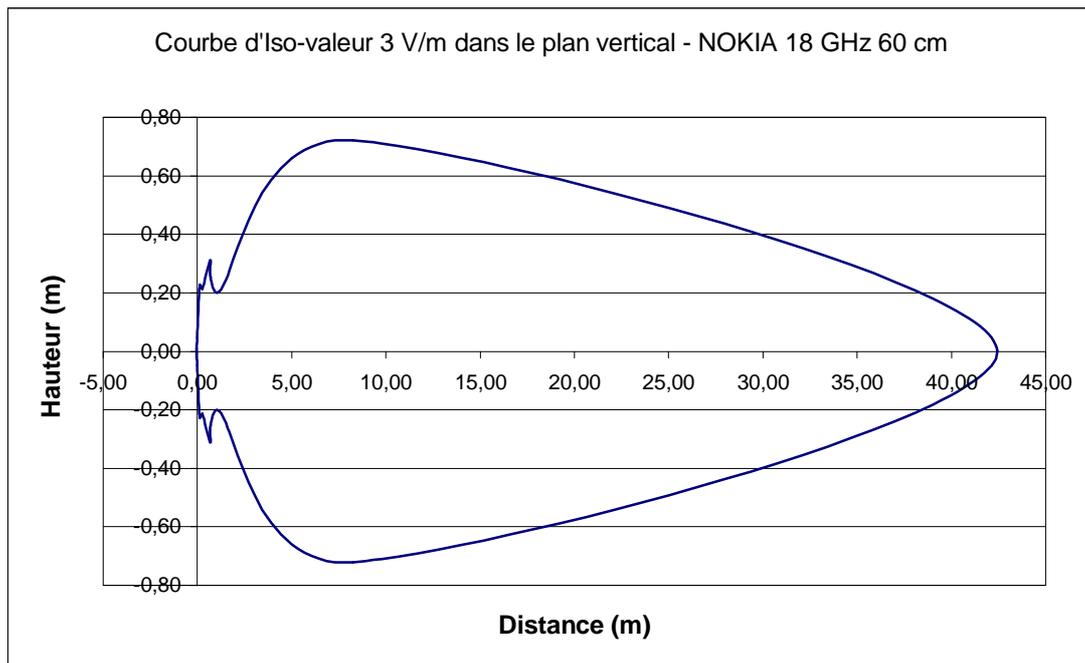


Figure 10 : Courbe d'iso-valeur 3 V/m pour une antenne NOKIA 18 GHz - 60 cm

La figure 10 montre que le champ atteint une intensité de 3 V/m à une distance de 42,5 m de l'antenne dans l'axe du lobe principal. Cette figure indique également l'étroitesse de la zone où l'intensité de 3 V/m est atteinte. Selon la figure 10, le champ serait inférieur à 3 V/m lorsqu'on s'écarte de plus de 70 cm de l'axe du faisceau. Etant donné la symétrie de révolution autour de l'axe du faisceau, le diamètre maximum du volume où la valeur de 3 V/m pourrait être dépassée est seulement de 1,4 m. Il faut toutefois être prudent dans l'interprétation de ce résultat, car comme nous l'avons signalé en début de paragraphe, la précision des formules du champ éloigné se dégrade lorsqu'on se trouve à une distance de l'antenne inférieure à la distance de Rayleigh. Dans le cas présent, la zone où l'iso-valeur est la plus large se trouve à environ 8 m de l'antenne, alors que la distance de Rayleigh est égale à 10,8 m (tableau 3); à cet endroit, le tracé de l'iso-valeur ne doit donc être considéré qu'à titre indicatif.

N.B. :

Comme nous l'avons indiqué, il est couramment admis que les formules du champ éloigné fournissent, généralement, une estimation du champ moyen qui est supérieure à la valeur réelle jusqu'à une distance de l'ordre de quelques longueurs d'onde ($\lambda = 16,6$ mm à 18 GHz). Toutefois, on ne peut garantir, de manière absolue, qu'il en est toujours ainsi.

Afin de pallier à l'incertitude de la méthode lorsqu'on se trouve à proximité de l'antenne, nous avons calculé le champ en différents points situés le long d'une ligne droite, horizontale, parallèle à l'axe du faisceau, comme le décrit la figure 11. La distance entre la droite et l'axe du faisceau a été prise égale à la distance de Rayleigh, de telle manière que l'on puisse garantir la fiabilité du résultat. La figure 12 présente le résultat pour l'antenne NOKIA 18 GHz - 60 cm rayonnant une puissance de 65 mW.

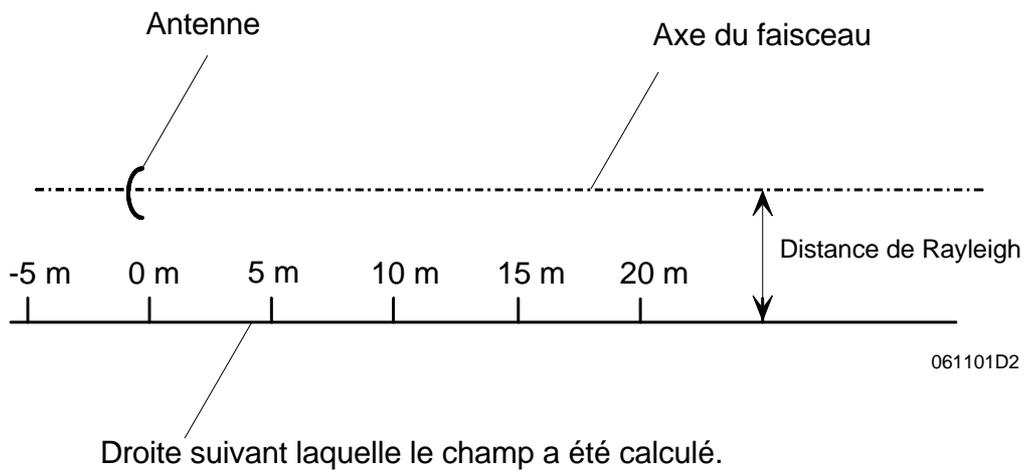


Figure 11 : Position de la droite le long de laquelle le champ a été calculé

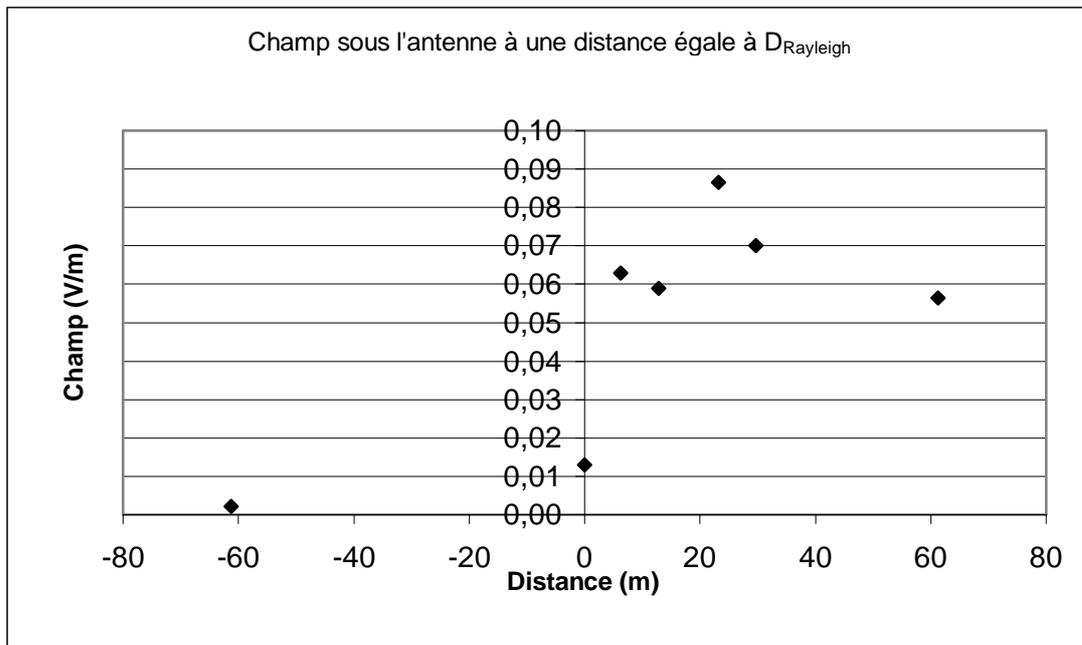


Figure 12 : Valeurs maximales du champ à 10,8 m sous une antenne NOKIA 18 GHz-- 60 cm

La figure 12 indique qu'à 10,8 m sous l'axe du faisceau, le champ atteint une valeur maximale inférieure à 0,09 V/m ; cette valeur est obtenue à une vingtaine de mètres de l'antenne. Compte tenu de l'approximation faite sur le diagramme de rayonnement (utilisation de la courbe enveloppe), la valeur réelle sera inférieure ou égale à la valeur calculée.

5. RESULTATS DES EVALUATIONS

Pour chaque modèle d'antenne utilisé par un opérateur nous avons calculé :

- la densité de puissance à laquelle serait soumise une personne se trouvant en face de l'antenne et à proximité immédiate de celle-ci (selon la méthode du § 4.1)
- la courbe d'iso-valeur correspondant à une limite de 3 V/m (selon la méthode du § 4.2)
- le champ en différents points situés le long d'une ligne droite parallèle à l'axe du faisceau (selon la méthode du § 4.2); la distance entre la droite et l'axe du faisceau a été prise égale à la distance de Rayleigh, comme le montre la figure 11; précisons qu'il s'agit du champ en l'absence d'obstacle entre l'antenne et le point considéré.

Tous les calculs ont été effectués pour une puissance égale au maximum de la « fourchette » communiquée par l'opérateur.

Les feuilles de calcul, correspondant à chaque antenne, sont rassemblées dans l'annexe A. Les principaux résultats sont repris dans le tableau 4 dont les différentes colonnes fournissent les renseignements suivants :

- 1^{ère} colonne : nom de l'opérateur utilisant ce type d'antenne
- 2^{ème} colonne : fréquence d'émission et diamètre de la parabole
- 3^{ème} colonne : nom du constructeur (l'éventuel second nom est celui du constructeur de l'antenne)
- 4^{ème} colonne : puissance maximale déclarée par l'opérateur
- 5^{ème} colonne : densité de puissance maximale devant l'antenne au contact direct de celle-ci et jusqu'à une distance égale à la distance de Rayleigh (c'est-à-dire quelques mètres)
- 6^{ème} colonne : distance dans l'axe du faisceau au-delà de laquelle le champ est inférieur ou égal à 3 V/m
- 7^{ème} colonne : estimation du diamètre maximum du volume où le champ pourrait atteindre 3 V/m
- 8^{ème} colonne : distance de Rayleigh donnée par $D^2/2\lambda$
- 9^{ème} colonne : valeur maximale du champ le long d'une ligne droite parallèle à l'axe du faisceau; la distance entre la droite et l'axe du faisceau a été prise égale à la distance de Rayleigh (figure 11) ; il s'agit du champ en l'absence de tout obstacle entre l'antenne et le point considéré
- 10^{ème} colonne : numéro de la feuille de calcul reprise dans l'annexe 1

En ce qui concerne le diamètre du volume où le champ pourrait atteindre 3 V/m (7^{ème} colonne), les caractères en italiques (gras) dans le tableau 4 signalent les cas où ce résultat ne doit être pris qu'à titre indicatif. En effet, comme expliqué au § 4.4, la partie de la courbe d'iso-valeur 3 V/m qui se trouve à une distance de l'antenne inférieure à la distance de Rayleigh est relativement imprécise.

Tableau 4
Résultats des évaluations pour la puissance maximale

Op.	Fréq. - Ø	Construc- teur	P _{max} (mW)	S _{max dev.} antenne (W/m ²)	L (3 V/m) (m)	Ø (3 V/m) (m)	Dist. Rayleigh (m)	E _{max sous} dist. Rayl. (V/m)	Fig.
ASTRID	18 GHZ - 30 cm	NOKIA	65	2,7	24,4	1,4	2,7	0,6	A1
	18 GHZ - 60 cm	NOKIA	65	0,7	42,5	1,4	10,8	0,09	A2
	18 GHZ - 120 cm	NOKIA	65	0,2	79	0,6	43,2	0,02	A3
	23 GHZ - 30 cm	NOKIA	65	2,7	24,4	1,4	3,5	0,5	A4
	23 GHZ - 60 cm	NOKIA	65	0,7	49,9	0,6	13,8	0,07	A5
	23 GHZ - 120 cm	NOKIA	65	0,2	92,9	0,6	55,2	0,02	A6
KPN-ORANGE	18 GHZ - 30 cm	ERICSON	250	10,6	40,8	2,8	2,7	1,2	A7
	18 GHZ - 30 cm	SIEMENS- ANDREW	71	3	21,5	0,6	2,7	0,32	A8
	18 GHZ - 60 cm	ERICSON	250	2,6	70,1	1,2	10,8	0,14	A9
	18 GHZ - 60 cm	SIEMENS- ANDREW	71	0,7	42,4	1,6	10,8	0,16	A10
	26 GHZ - 30 cm	ERICSON	63	2,7	27,3	0,8	3,9	0,35	A11
	26 GHZ - 30 cm	SIEMENS- ANDREW	28	1,2	19,1	0,6	3,9	0,21	A12
	26 GHZ - 60 cm	ERICSON	63	0,7	51,4	0,8	15,6	0,09	A13
	26 GHZ - 60 cm	SIEMENS- ANDREW	28	0,3	34,3	0,6	15,6	0,3	A14
	38 GHZ - 15 cm	ERICSON- RFS	45	7,6	18,8	1	1,4	1	A15
	38 GHZ - 30 cm	ERICSON	45	1,9	33,7	0,6	5,7	0,16	A16
38 GHZ - 60 cm	ERICSON	45	0,5	63,5	0,6	22,8	0,04	A17	
MOBI- STAR	15 GHZ - 30 cm	ANDREW	50	2,1	14,7	0,8	2,3	0,5	A18
	15 GHZ - 60 cm	ANDREW	50	0,5	27,3	0,8	9	0,1	A19
	25 GHZ - 30 cm	ANDREW	50	2,1	25,5	0,8	3,8	0,3	A20
	25 GHZ - 60 cm	ANDREW	50	0,5	45,8	0,8	15	0,07	A21

L'examen du tableau 4 montre qu'en ce qui concerne le niveau d'exposition devant l'antenne, la densité de puissance est toujours nettement inférieure aux recommandations de l'ICNIRP, ou du Conseil de l'Europe (10 W/m²), sauf dans le seul cas de l'antenne ERICSON 18 GHz - 30 cm où elle atteint 10,6 W/m² lorsque l'opérateur émet à la puissance maximale de 250 mW. Précisons toutefois qu'il y a peu de chance que la limite de 10 W/m² soit effectivement dépassée, étant donné que le modèle de calcul qui a été utilisé donne un résultat maximaliste ; par exemple, le calcul selon la formule (4) donne un résultat de 5,5 W/m² pour cette même antenne.

Le tableau 4 montre également que pratiquement toutes les antennes produisent une densité de puissance inférieure à 3 W/m²; si l'on ne considère que l'échauffement des tissus, il est clair que tout risque de brûlure ou d'hyperthermie est tout à fait exclu à un tel niveau d'exposition. A titre de comparaison, cette densité de puissance est la même que celle à laquelle on est exposé lorsqu'on se trouve à 1 m d'une ampoule électrique de 25 W.

En ce qui concerne la zone où la limite de 3 V/m pourrait être dépassée, la 6^{ème} colonne du tableau 4 montre que sa longueur maximale est de 92,9 m; son diamètre maximum ne dépasse pas 2,8 m selon les estimations reprises dans la 7^{ème} colonne. Compte tenu que le faisceau d'une antenne parabolique ne peut en aucun cas être interrompu par un obstacle pour les

raisons exposées au § 3, on peut en conclure que le risque que des riverains soient exposés durablement à un champ dépassant 3 V/m est pratiquement nul.

La dernière colonne du tableau 4 montre que le champ maximum, à 2 ou 3 m sous l'axe du faisceau, est compris entre 0,5 et 1,2 V/m ; il s'agit, rappelons-le, de la valeur qui serait obtenue s'il n'y avait aucun obstacle entre l'antenne et le point où ce maximum se produit. Si l'on se trouve à l'intérieur d'un bâtiment et que le rayonnement électromagnétique y pénètre par la toiture ou par une fenêtre, le champ y sera entre 3 et 10 fois plus faible, soit entre 0,1 et 0,4 V/m. Si le toit est constitué d'une plate-forme en béton, la diminution est encore beaucoup plus importante.

6. COMPARAISON AVEC DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

On trouve dans la référence [5] des résultats de mesures de champs rayonnés par des faisceaux hertziens utilisés par KPN-ORANGE (18 GHz - 60 cm et 38 GHz - 30 cm). Les mesures ont été effectuées en plusieurs points situés à quelques mètres de l'antenne et à des distances de l'axe du faisceau comprises entre 2 et 5 m. Les valeurs maximales mesurées, pour les deux antennes, varient entre quelques centièmes de V/m et quelques dixièmes de V/m; ces valeurs sont comparables, voire légèrement inférieures, aux résultats des évaluations reprises dans la dernière colonne du tableau 4.

7. CONCLUSIONS

Dans la présente étude, nous avons considéré deux aspects :

- le risque d'hyperthermie, ou de brûlure, qui pourrait résulter d'une exposition devant des antennes de faisceaux hertziens
- l'exposition permanente des riverains aux champs électromagnétiques de telles antennes

Les calculs ont été effectués en considérant systématiquement les cas les plus défavorables, c'est-à-dire :

- puissance égale au maximum de la « fourchette » communiquée par l'opérateur
- calculs basés sur les modèles mathématiques les plus « pessimistes » (c'est-à-dire ceux qui fournissent les estimations les plus élevées)
- lorsqu'un diagramme de rayonnement était nécessaire, nous avons utilisé la « courbe enveloppe des lobes secondaires » de manière à éviter toute sous-estimation dans les directions situées en-dehors du lobe principal

Le premier aspect a été traité en prenant comme référence les recommandations de l'ICNIRP, applicables au public et qui sont identiques à celles du Conseil de l'Europe; elles fixent une limite de 10 W/m² (équivalent à 61 V/m), ce qui correspond à un échauffement de l'ordre de 0,02°C en cas d'exposition prolongée.

Les résultats des calculs indiquent que la densité de puissance devant l'antenne (jusqu'à une distance égale à la distance de Rayleigh, c'est-à-dire quelques mètres) est toujours nettement inférieure à 10 W/m^2 , sauf dans le seul cas de l'antenne ERICSON 18 GHz - 30 cm où elle atteint $10,6 \text{ W/m}^2$ lorsque l'opérateur émet à la puissance maximale de 250 mW. Précisons toutefois qu'il y a peu de chance que la limite de 10 W/m^2 soit effectivement dépassée, étant donné que le modèle de calcul qui a été utilisé donne un résultat maximaliste ; par exemple, le calcul selon un autre modèle mathématique donne un résultat de $5,5 \text{ W/m}^2$ pour cette même antenne.

Les résultats montrent également que pratiquement toutes les antennes produisent une densité de puissance inférieure à 3 W/m^2 ; si l'on ne considère que l'échauffement des tissus, il est clair que tout risque de brûlure ou d'hyperthermie est tout à fait exclu à un tel niveau d'exposition. A titre de comparaison, cette densité de puissance est la même que celle à laquelle on est exposé lorsqu'on se trouve à 1 m d'une ampoule électrique de 25 W; précisons cependant que cette comparaison n'a de sens que par rapport à l'échauffement des tissus; en effet, elle ne peut être appliquée à d'autres effets éventuels puisque les fréquences sont très différentes (celle de la lumière visible est de l'ordre de 1.000.000 GHz).

En ce qui concerne le second aspect, les résultats ont été comparés à une limite de 3 V/m (équivalente à 24 mW/m^2), choisie arbitrairement, pour tenir compte qu'il s'agit d'une exposition permanente; cette limite est 400 fois plus restrictive que ce que recommande l'Organisation Mondiale de la Santé, l'ICNIRP, ou le Conseil de l'Europe, dans le cas d'une exposition permanente.

Les calculs montrent que l'étendue de la zone où la limite de 3 V/m pourrait être dépassée a une longueur maximale inférieure à 100 m et son diamètre maximum ne devrait pas dépasser 2,8 m. Compte tenu que le faisceau d'une antenne parabolique ne peut en aucun cas être interrompu par un obstacle pour les raisons exposées au § 3, on peut en conclure que le risque que des riverains soient exposés durablement à un champ dépassant 3 V/m est pratiquement nul.

Les mêmes calculs montrent que le champ maximum, à 2 ou 3 m sous l'axe du faisceau, est de l'ordre de 0,5 à 1 V/m; il s'agit de la valeur qui serait obtenue s'il n'y avait aucun obstacle entre l'antenne et le point où ce maximum se produit. Si l'on se trouve à l'intérieur d'un bâtiment et que le rayonnement électromagnétique y pénètre par la toiture ou par une fenêtre, le champ y sera, au minimum, entre 3 et 10 fois plus faible, soit entre 0,1 et 0,3 V/m. Si le toit est constitué d'une dalle en béton, la diminution est encore beaucoup plus importante. Par conséquent, il est pratiquement exclu que les faisceaux hertziens utilisés par les opérateurs de téléphonie mobile puissent produire, aux endroits où des personnes séjournent (c'est-à-dire à l'intérieur des bâtiments), un champ électromagnétique dépassant 0,3 V/m (équivalent à $0,2 \text{ mW/m}^2$ ou $0,02 \mu\text{W/cm}^2$) à plus de 2 ou 3 m en dessous de l'axe du faisceau; un tel niveau, n'est détectable qu'avec un équipement de mesure présentant une très grande sensibilité.

Il est également important de noter que le champ est très faible à l'arrière d'une antenne de faisceau hertzien; ceci est dû au blindage métallique qui constitue la face arrière et le pourtour de l'antenne.

En conclusion, on peut exclure tout risque de brûlure ou d'hyperthermie à proximité immédiate des antennes paraboliques utilisées dans les faisceaux hertziens des opérateurs de téléphonie mobile. D'autre part, les caractéristiques de telles antennes, leurs conditions d'installation ainsi que les propriétés des rayonnements électromagnétiques aux fréquences allouées à cette application ont pour conséquence que les champs auxquels sont soumis les riverains sont négligeables au regard des normes internationales, des recommandations d'organismes officiels et groupes de pression.

Il convient de préciser que les résultats de la présente étude ne concernent que les faisceaux hertziens qu'utilisent couramment les opérateurs de téléphonie mobile dont les trois caractéristiques principales sont : la fréquence d'émission, la puissance à l'entrée de l'antenne et le diamètre de la parabole. Comme indiqué précédemment :

- la fréquence d'émission est comprise entre 15 et 38 GHz
- la puissance à l'entrée de l'antenne est inférieure ou égale à 250 mW
- le diamètre de la parabole est compris entre 15 et 120 cm

Il existe de nombreuses applications (radiodiffusion, communications militaires, etc.) qui emploient la technique des faisceaux hertziens dans d'autres gammes de fréquences et à d'autres niveaux de puissance; les conclusions exposées ici ne peuvent évidemment pas être généralisées à toutes ces applications. En ce qui concerne le calcul de la densité de puissance devant l'antenne, la formule (5) permet de déterminer aisément si les recommandations de l'ICNIRP, ou du Conseil de l'Europe (c'est-à-dire 10 W/m^2 si la fréquence est supérieure à 10 GHz), sont respectées.

ANNEXE A

FEUILLES DE CALCUL

Les feuilles de calcul relatives aux antennes reprises dans le tableau 4 du § 5 sont reprises ci-après.

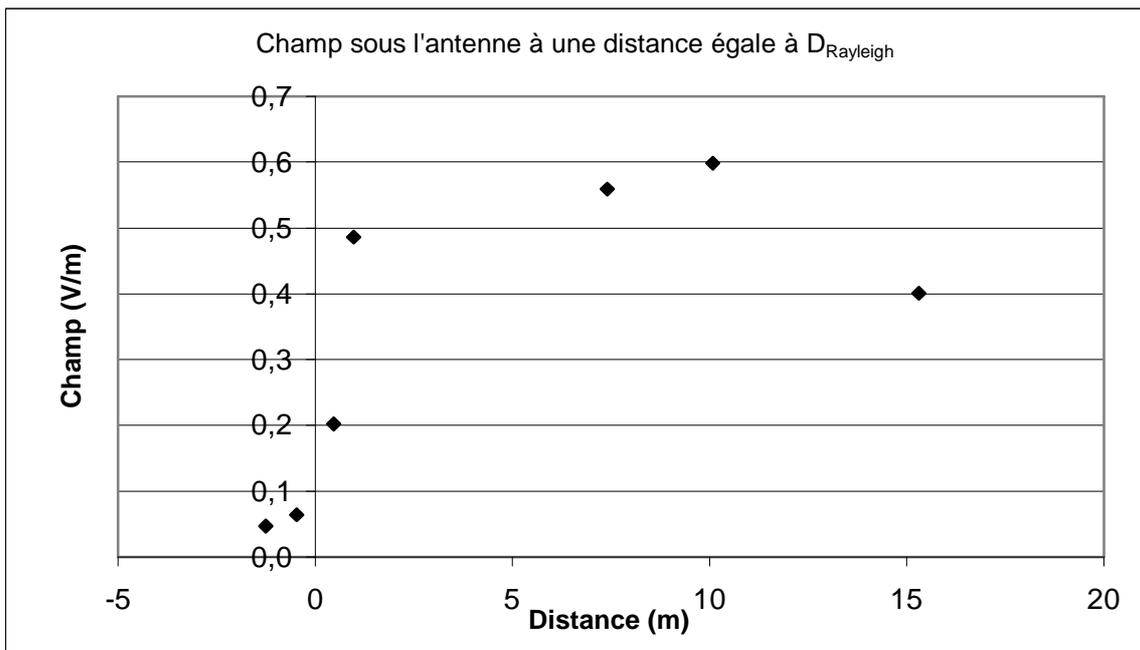
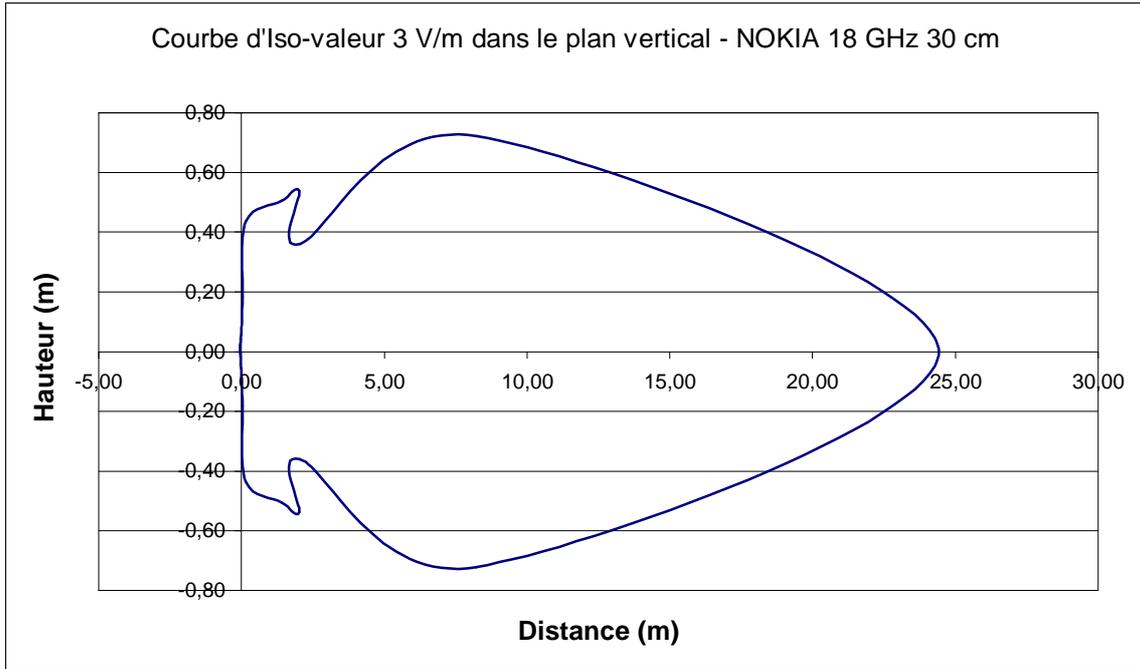
La légende de chaque feuille reprend le nom de l'opérateur ainsi que les caractéristiques principales de l'antenne. Chaque feuille indique :

- la puissance pour laquelle les calculs ont été effectués
- la valeur de référence pour laquelle les iso-valeurs ont été calculées
- le gain de l'antenne (exprimé en dBi)
- la distance maximale D_{\max} où le champ atteint 3 V/m
- la distance axiale maximale H_{\max} où le champ atteint 3 V/m
- la densité de puissance maximale devant l'antenne
- la distance de Rayleigh
- la courbe d'iso-valeur correspondant à 3 V/m
- le calcul du champ, sous l'antenne, à une distance égale à la distance de Rayleigh (voir figure 11)

Type : **NOKIA 18 GHz 30 cm**

Puissance (W)	0,065	Gain en dBi (à 0°)	34,4
Iso-Valeur (V/m) :	3		

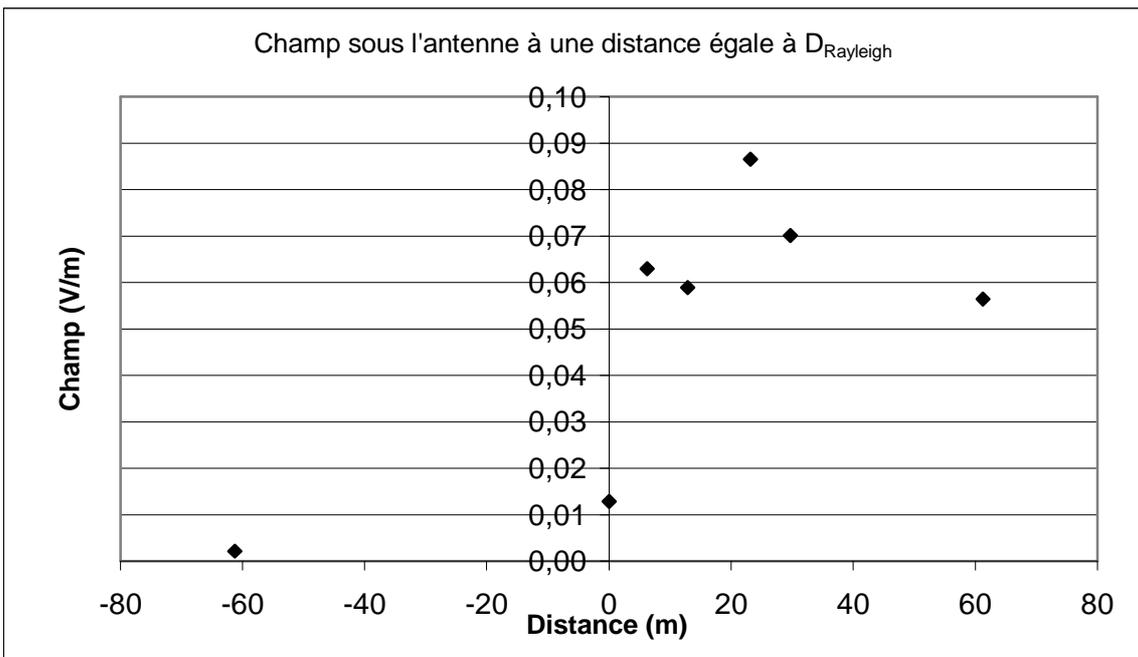
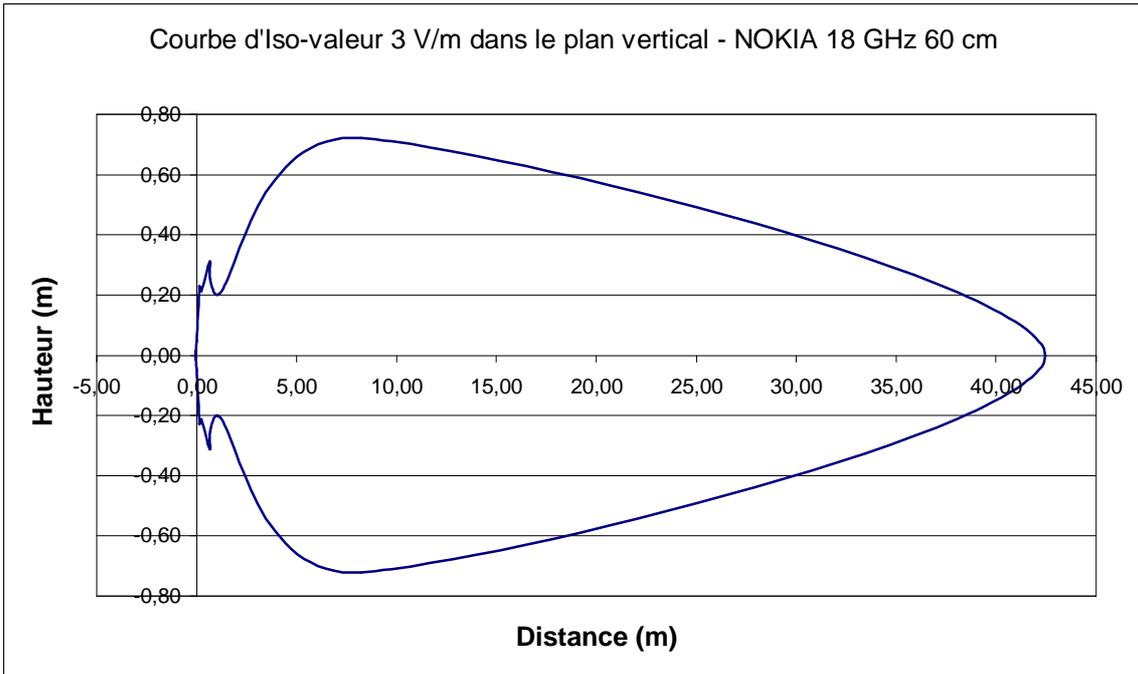
D max 3V/m (m) :	24,4	Densité maximale (W/m²)	2,7
H max 3V/m (m) :	-0,7	Distance de Rayleigh (m) :	2,7



Type : **NOKIA 18 GHz 60 cm**

Puissance (W)	0,065	Gain en dBi (à 0°)	39,2
Iso-Valeur (V/m) :	3		

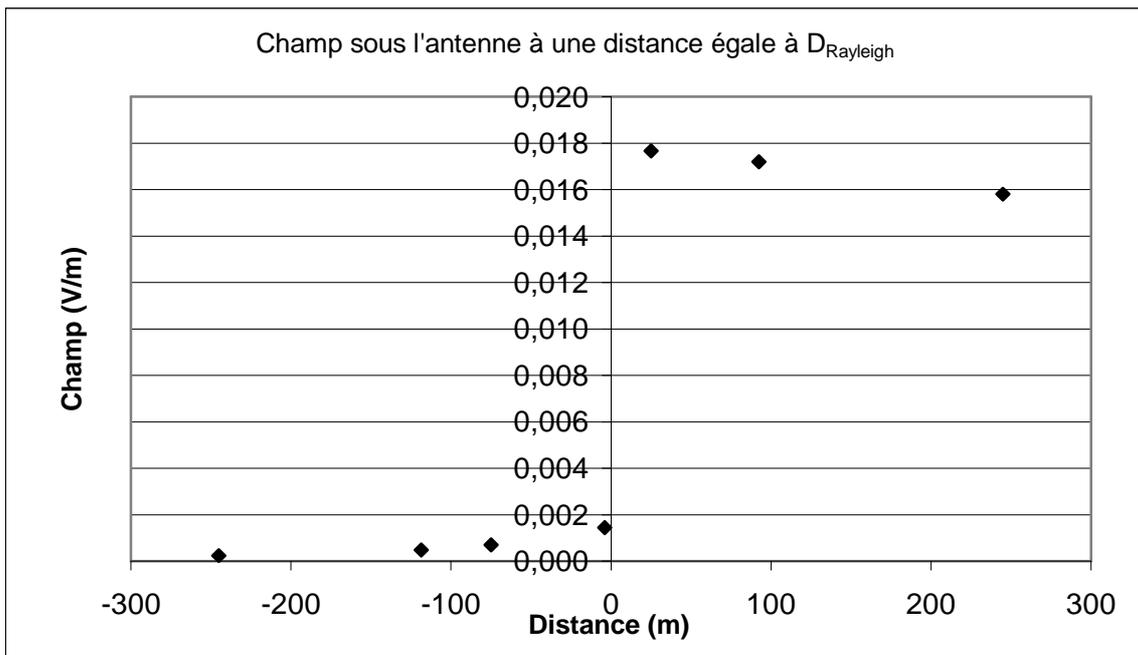
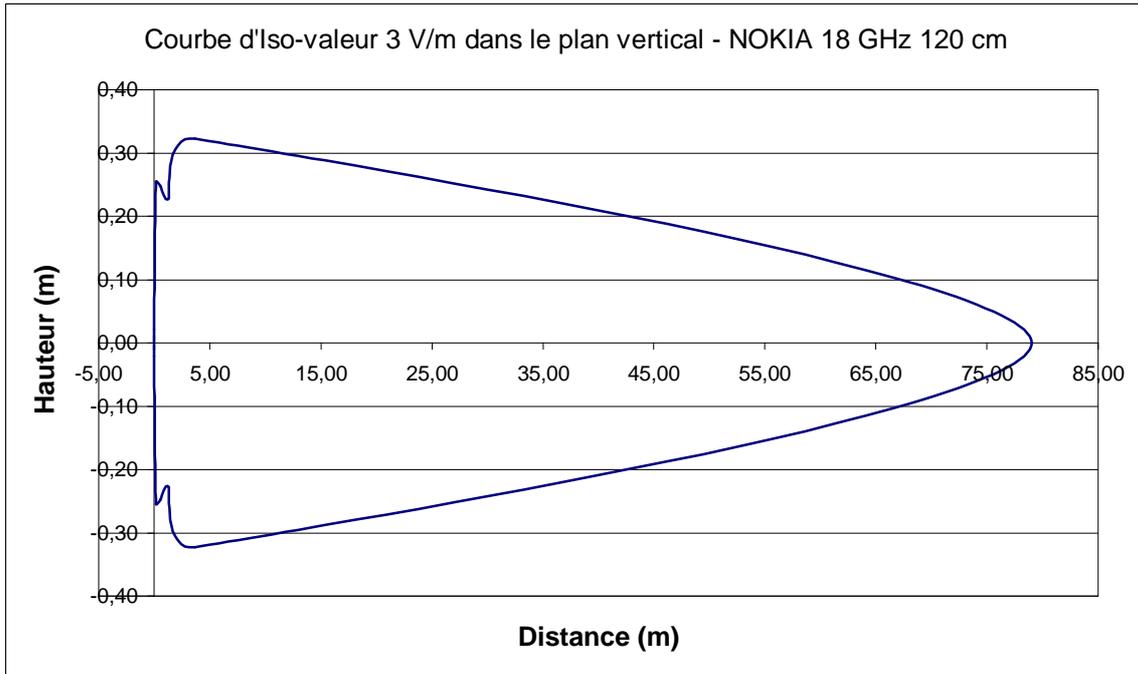
D max 3V/m (m) :	42,5	Densité maximale (W/m²)	0,7
H max 3V/m (m) :	-0,7	Distance de Rayleigh (m) :	10,8



Type : **NOKIA 18 GHz 120 cm**

Puissance (W)	0,065	Gain en dBi (à 0°)	44,6
Iso-Valeur (V/m) :	3		

D max 3V/m (m) :	79,0	Densité maximale (W/m²)	0,2
H max 3V/m (m) :	-0,3	Distance de Rayleigh (m) :	43,2

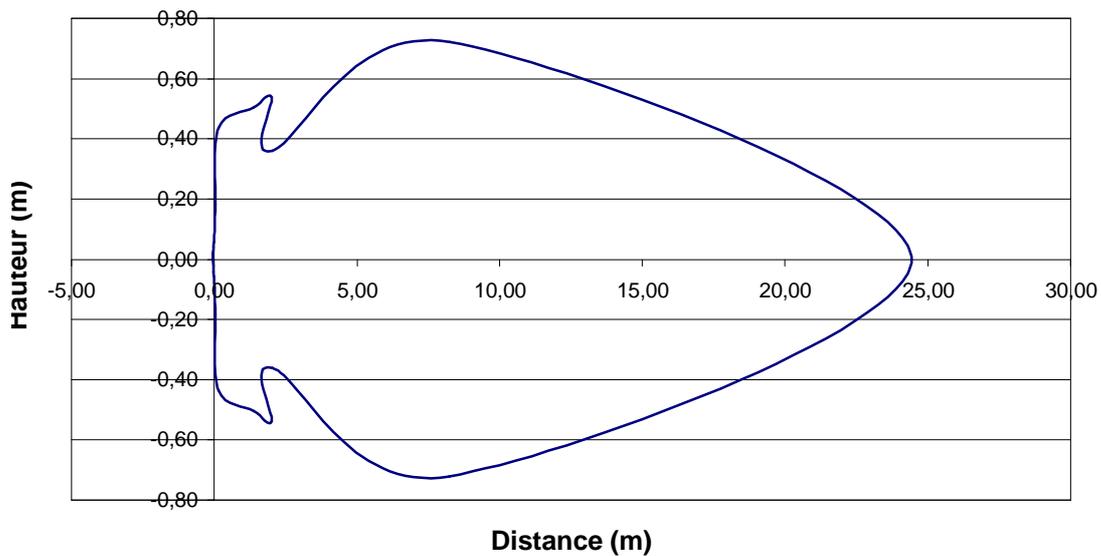


Type : **NOKIA 23 GHz 30 cm**

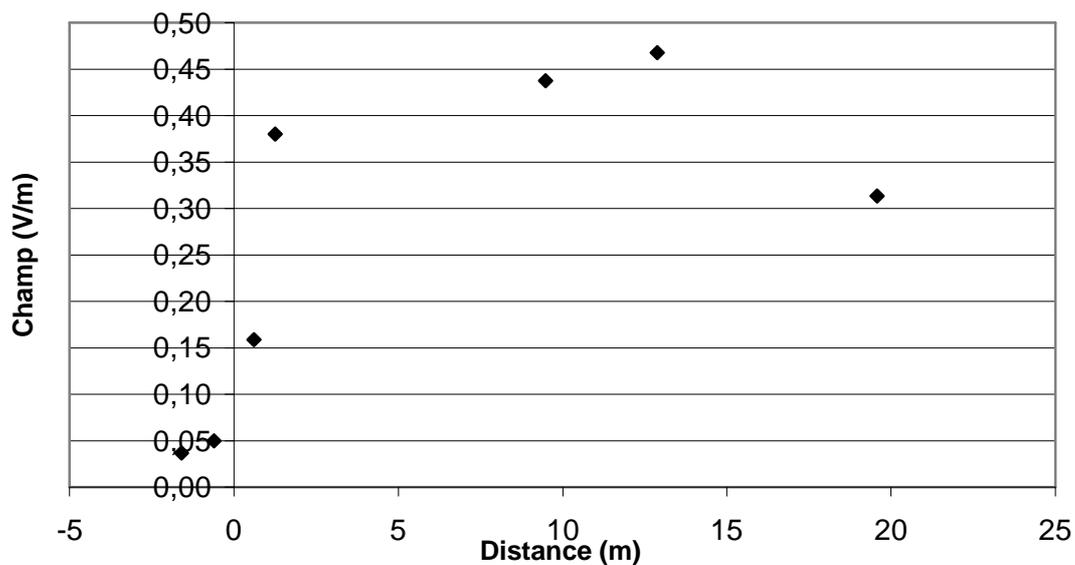
Puissance (W)	0,065	Gain en dBi (à 0°)	34,4
Iso-Valeur (V/m) :	3		

D max 3V/m (m) :	24,4	Densité maximale (W/m²)	2,7
H max 3V/m (m) :	-0,7	Distance de Rayleigh (m) :	3,5

Courbe d'Iso-valeur 3 V/m dans le plan vertical - NOKIA 23 GHz 30 cm



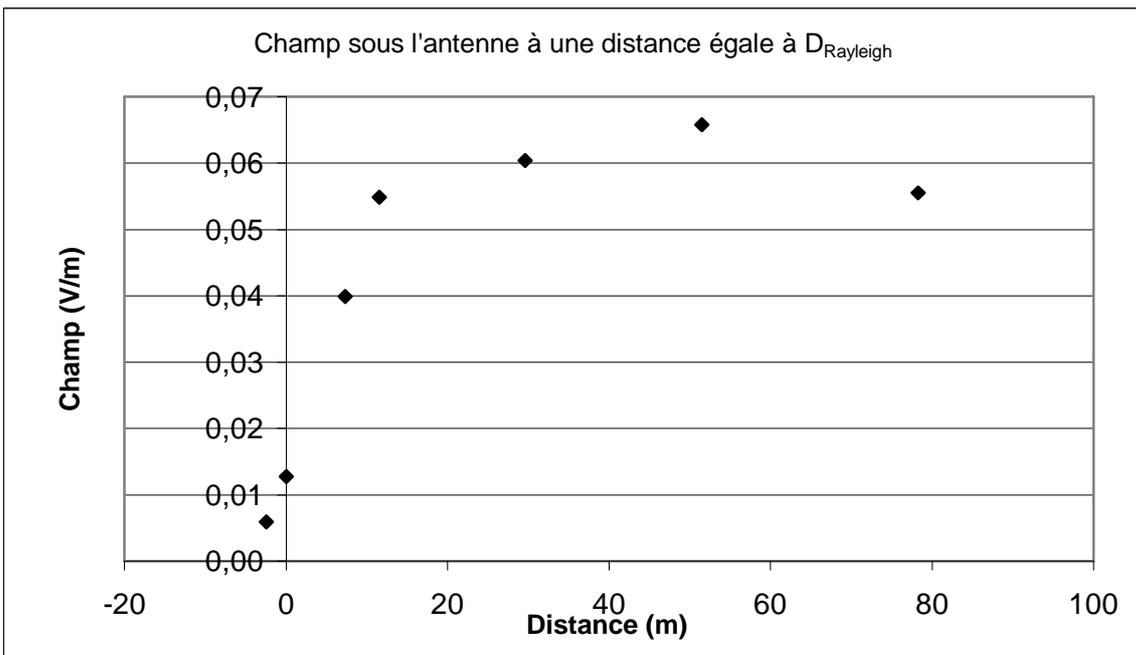
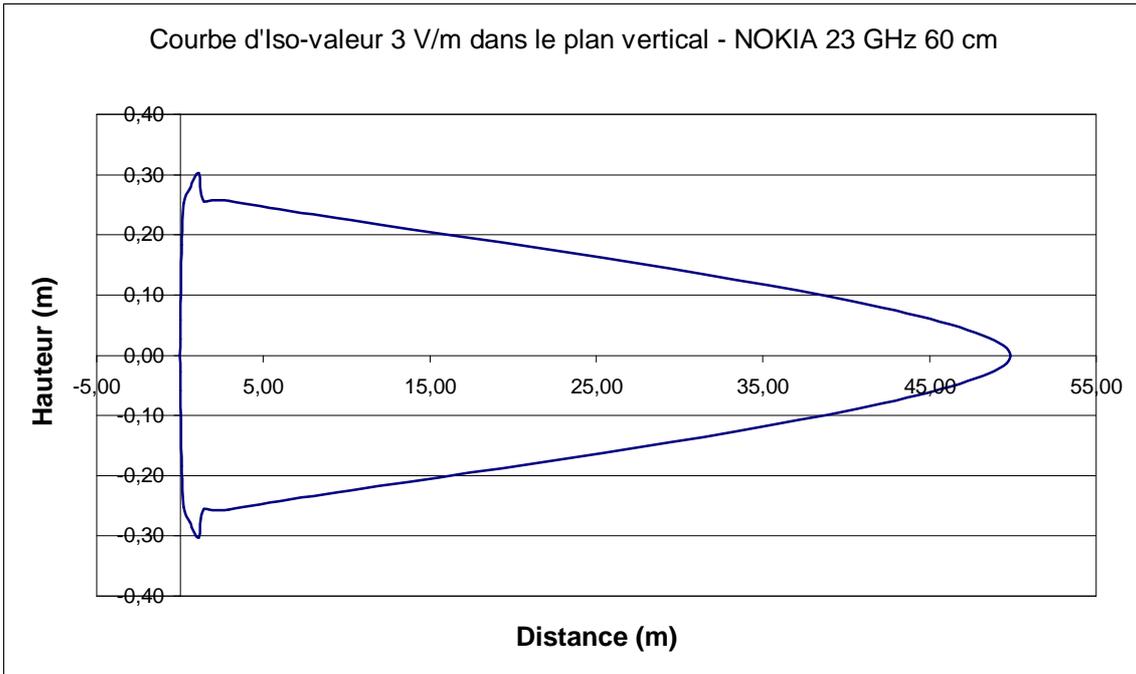
Champ sous l'antenne à une distance égale à D_{Rayleigh}



Type : **NOKIA 23 GHz 60 cm**

Puissance (W)	0,065	Gain en dBi (à 0°)	40,6
Iso-Valeur (V/m) :	3		

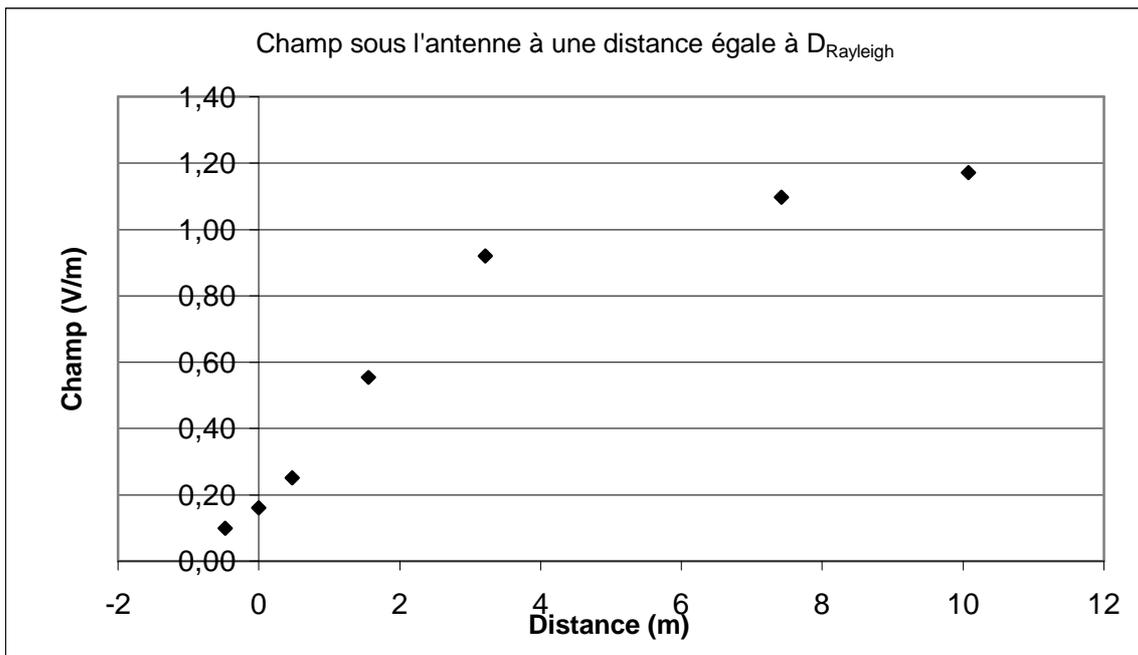
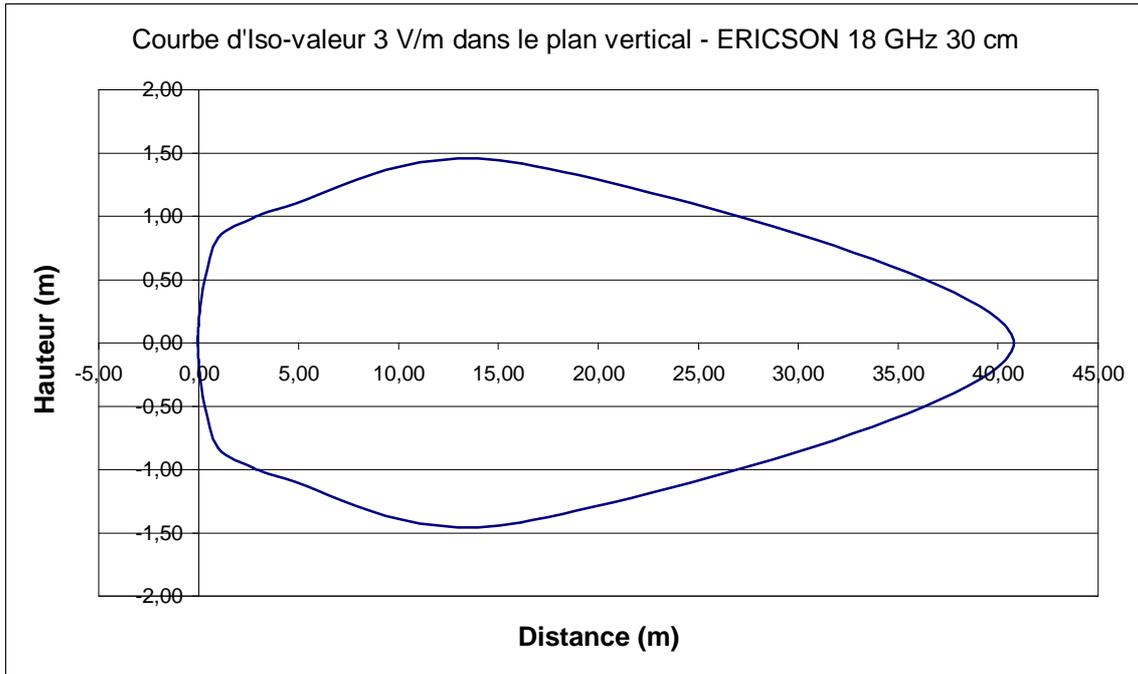
D max 3V/m (m) :	49,9	Densité maximale (W/m²)	0,7
H max 3V/m (m) :	-0,3	Distance de Rayleigh (m) :	13,8



Type : **ERICSON 18 GHz 30 cm**

Puissance (W)	0,25	Gain en dBi (à 0°)	33
Iso-Valeur (V/m) :	3		

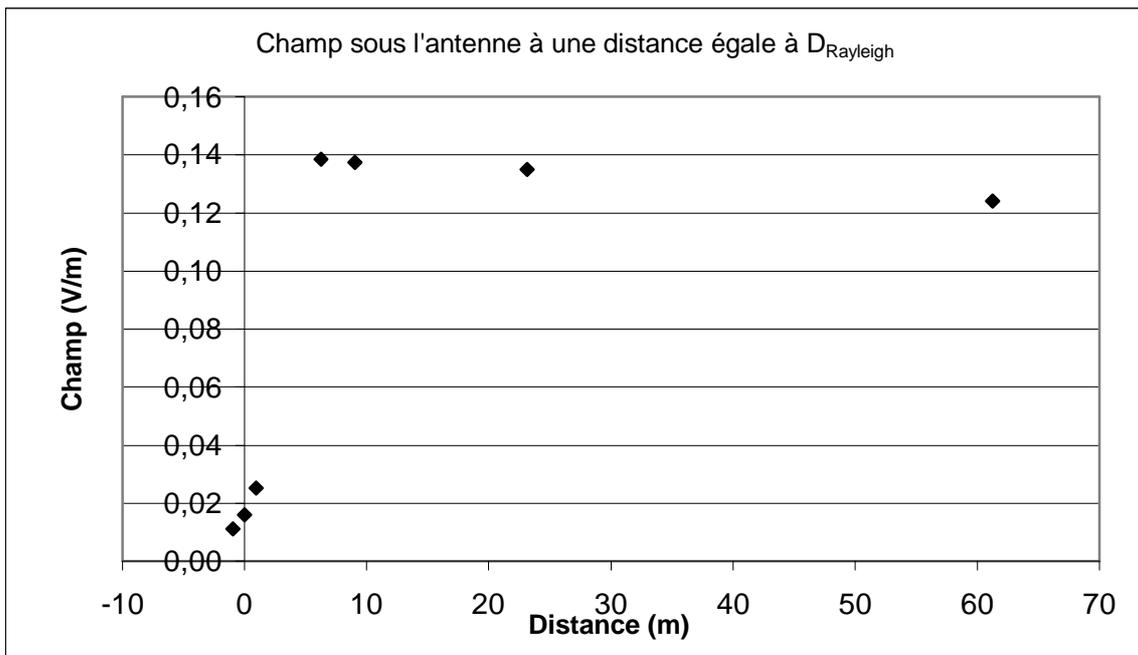
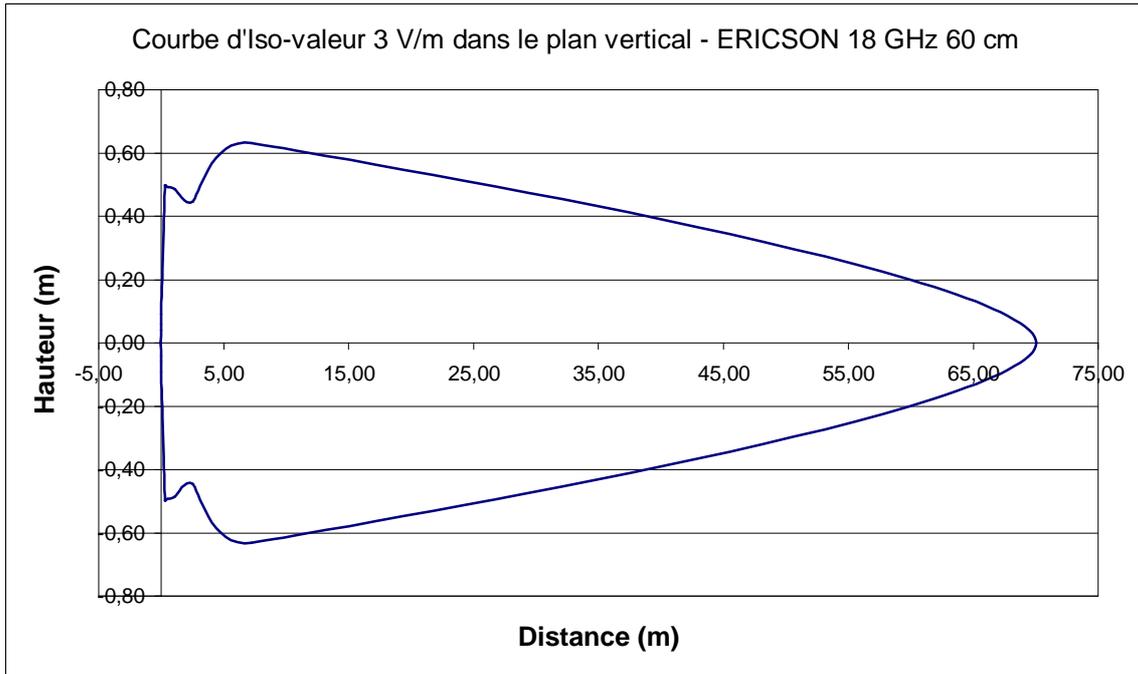
D max 3V/m (m) :	40,8	Densité maximale (W/m²)	10,6
H max 3V/m (m) :	-1,4	Distance de Rayleigh (m) :	2,7



Type : **ERICSON 18 GHz 60 cm**

Puissance (W)	0,25	Gain en dBi (à 0°)	37,7
Iso-Valeur (V/m) :	3		

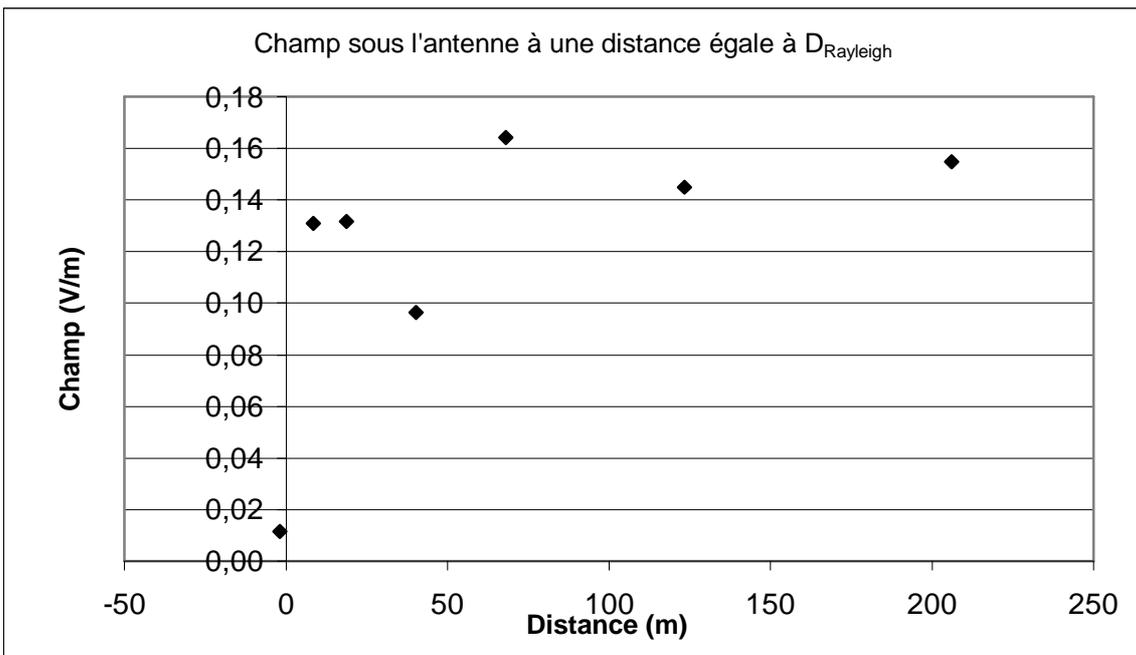
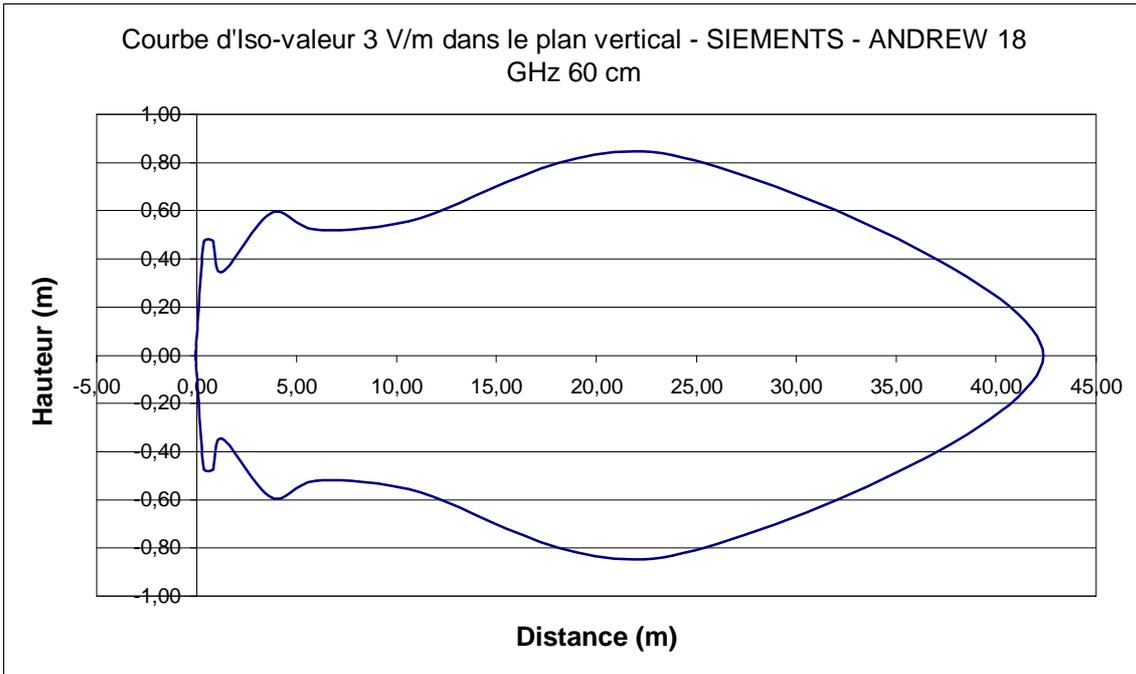
D max 3V/m (m) :	70,1	Densité maximale (W/m²)	2,6
H max 3V/m (m) :	-0,6	Distance de Rayleigh (m) :	10,8



Type : **SIEMENTS - ANDREW 18 GHz 60 cm**

Puissance (W) 0,071 Gain en dBi (à 0°) 38,8
 Iso-Valeur (V/m) : 3

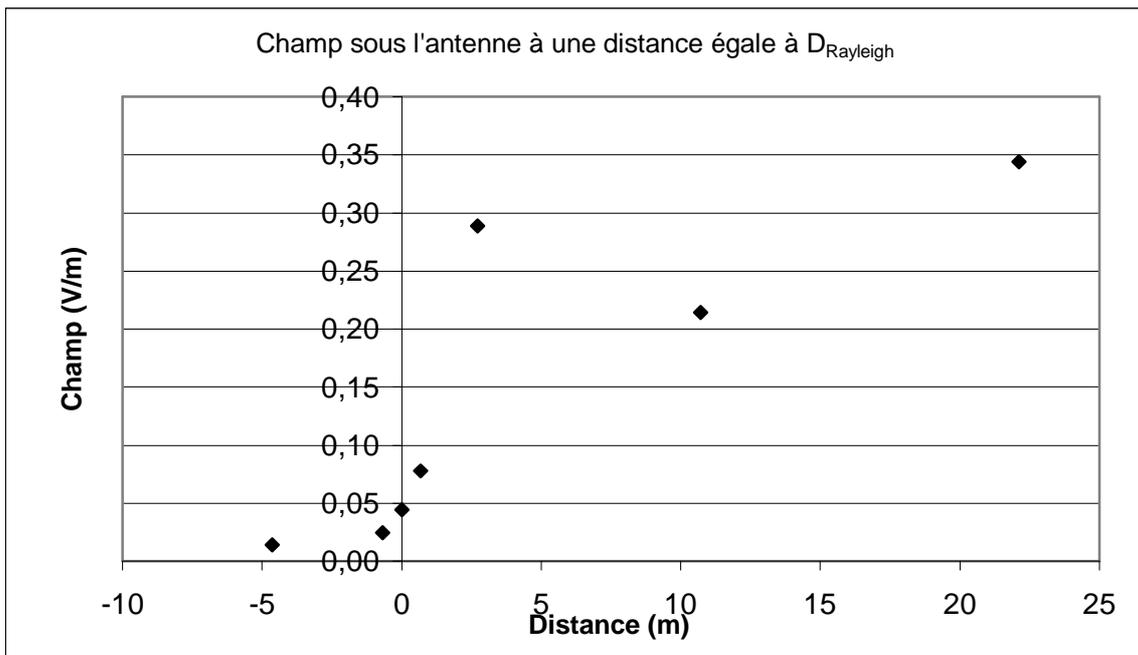
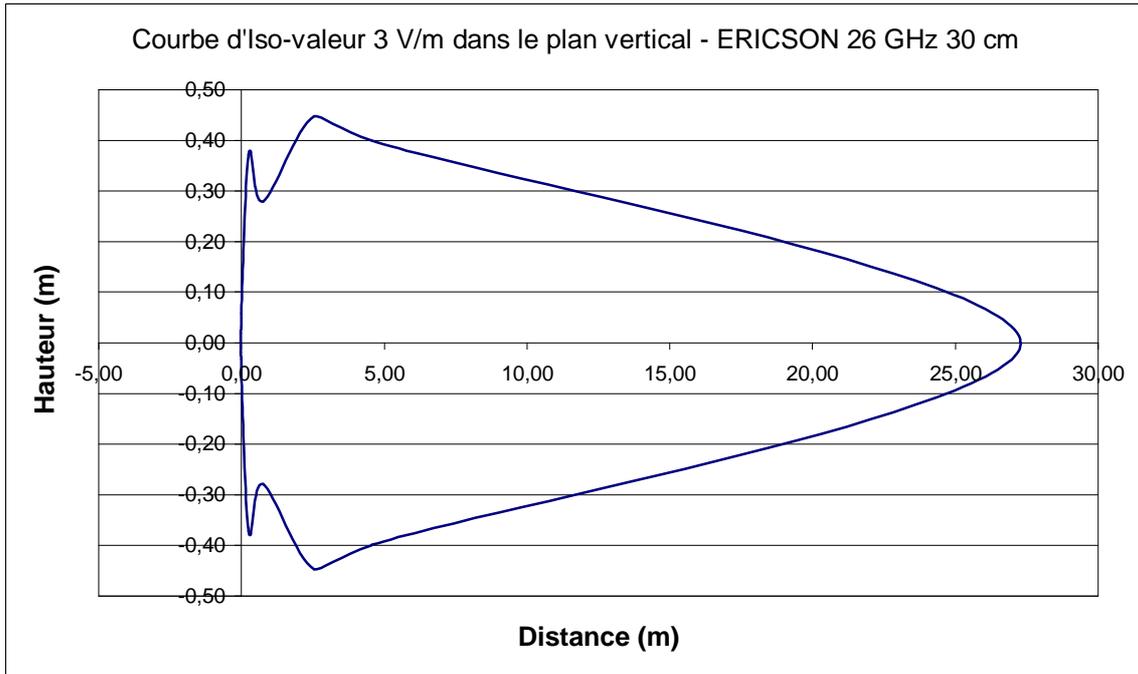
D max 3V/m (m) : 42,4 **Densité maximale (W/m²) 0,7**
H max 3V/m (m) : -0,8 **Distance de Rayleigh (m) : 10,8**



Type : **ERICSON 26 GHz 30 cm**

Puissance (W)	0,063	Gain en dBi (à 0°)	35,5
Iso-Valeur (V/m) :	3		

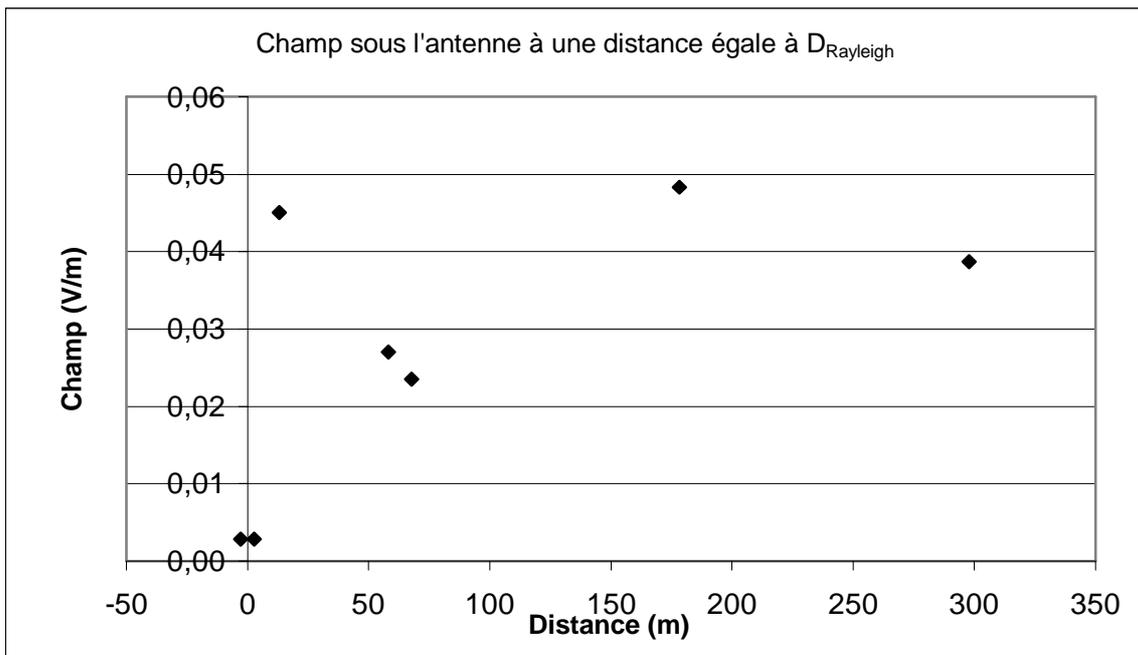
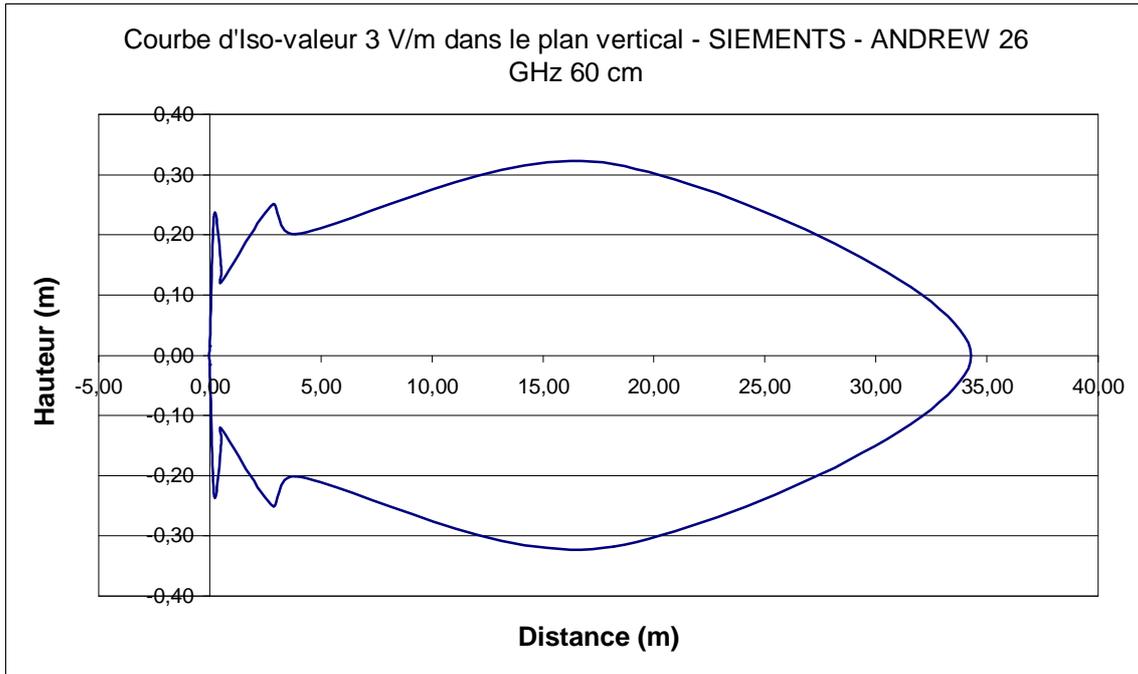
D max 3V/m (m) :	27,3	Densité maximale (W/m²)	2,7
H max 3V/m (m) :	-0,4	Distance de Rayleigh (m) :	3,9



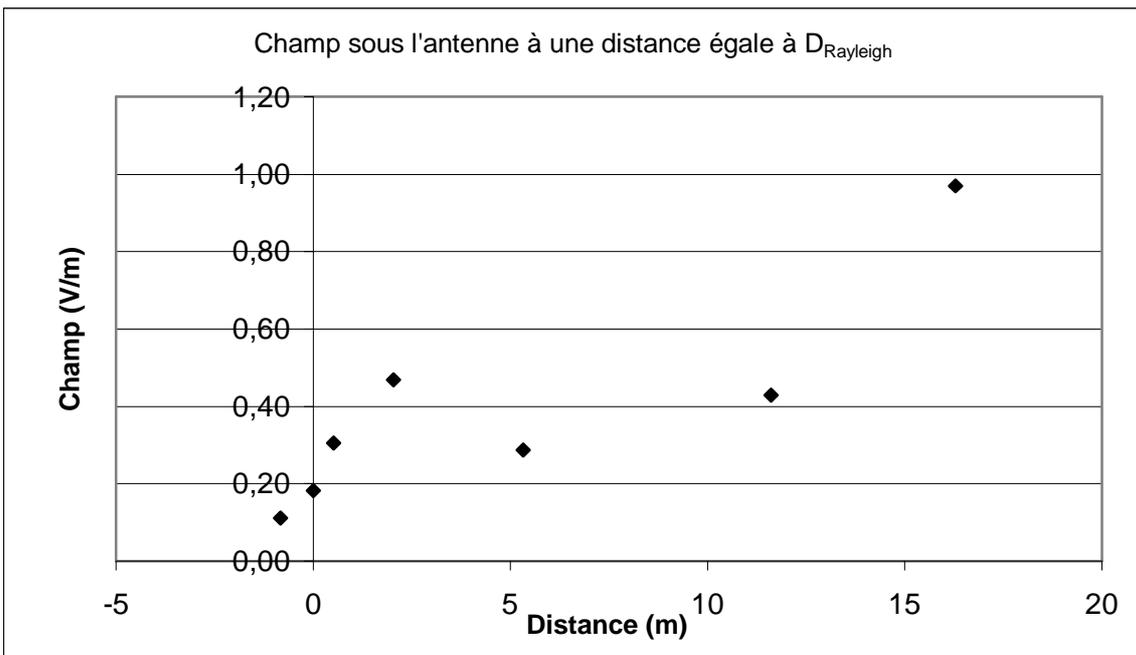
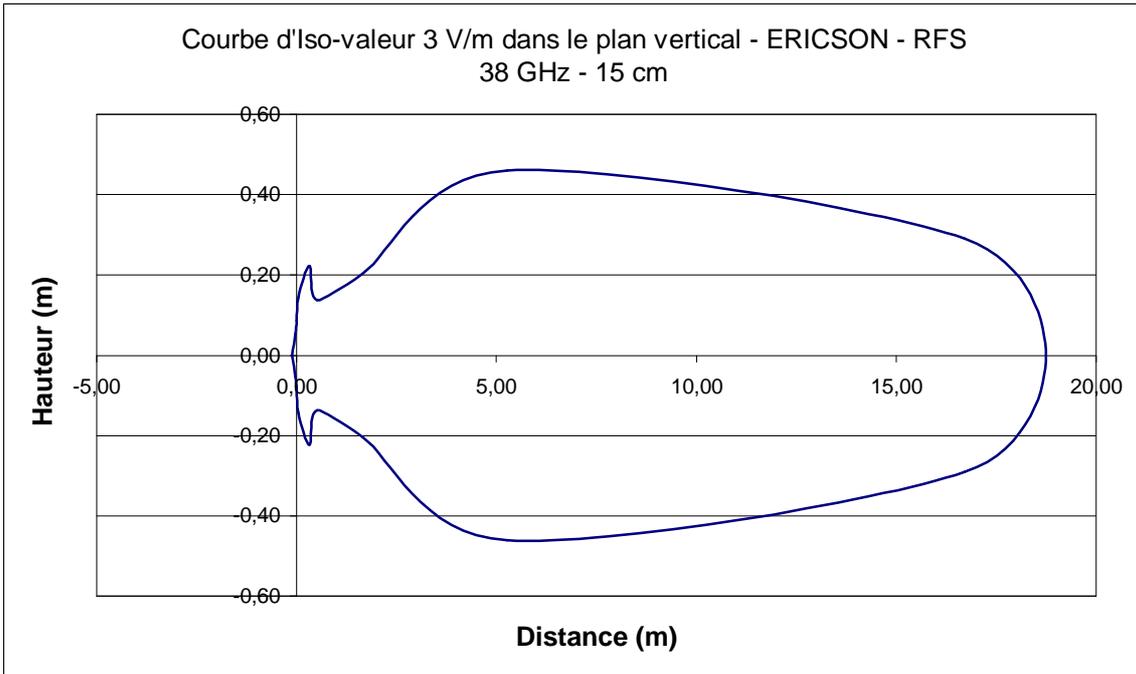
Type : **SIEMENTS - ANDREW 26 GHz 60 cm**

Puissance (W)	0,028	Gain en dBi (à 0°)	41
Iso-Valeur (V/m) :	3		

D max 3V/m (m) :	34,3	Densité maximale (W/m²)	0,3
H max 3V/m (m) :	-0,3	Distance de Rayleigh (m) :	15,6



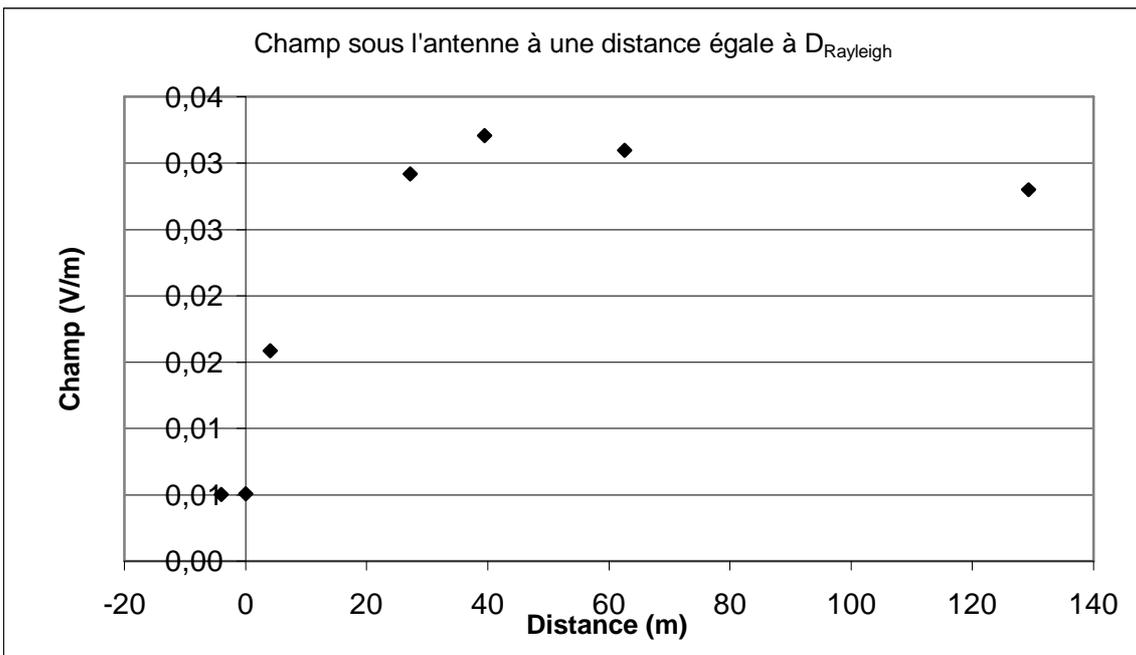
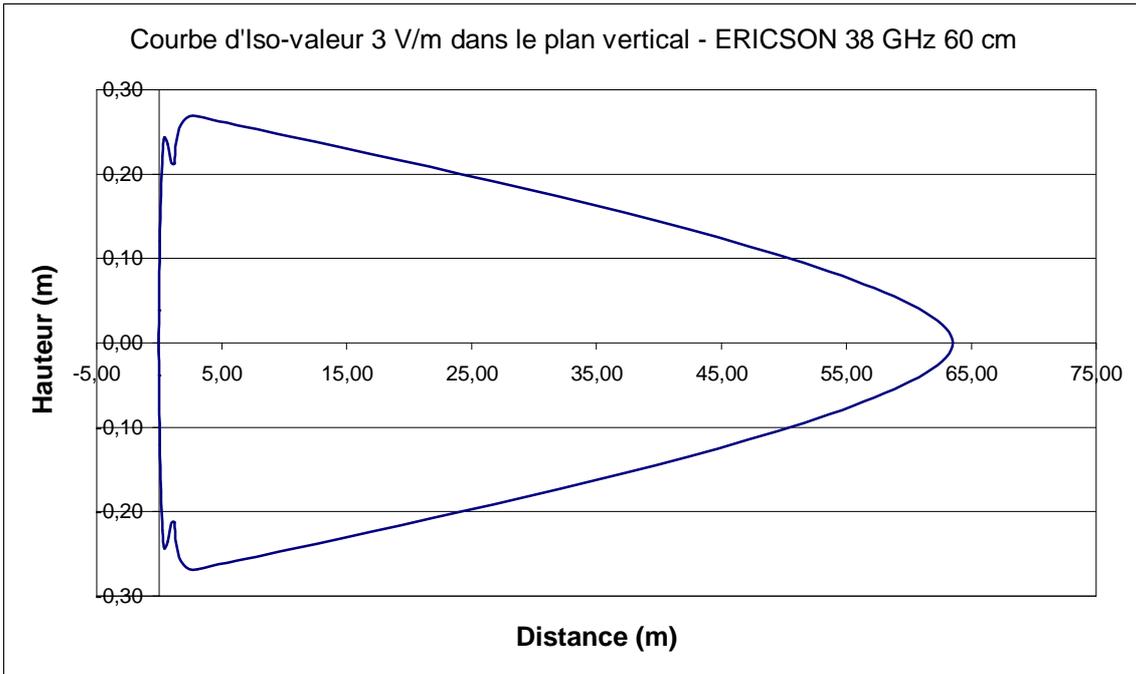
Type :	ERICSON - RFS	38 GHz - 15 cm	
Puissance (W)	0,045	Gain en dBi (à 0°)	33,7
Iso-Valeur (V/m) :	3		
D max 3V/m (m) :	18,8	Densité maximale (W/m²)	7,6
H max 3V/m (m) :	-0,5	Distance de Rayleigh (m) :	1,4



Type : **ERICSON 38 GHz 60 cm**

Puissance (W)	0,045	Gain en dBi (à 0°)	44,3
Iso-Valeur (V/m) :	3		

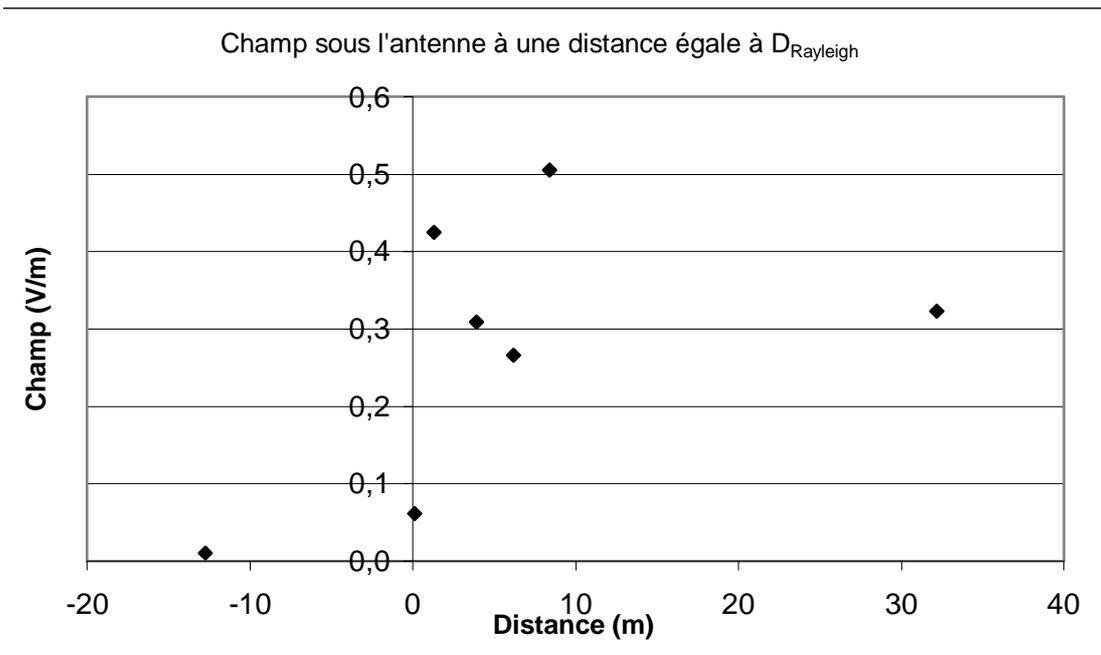
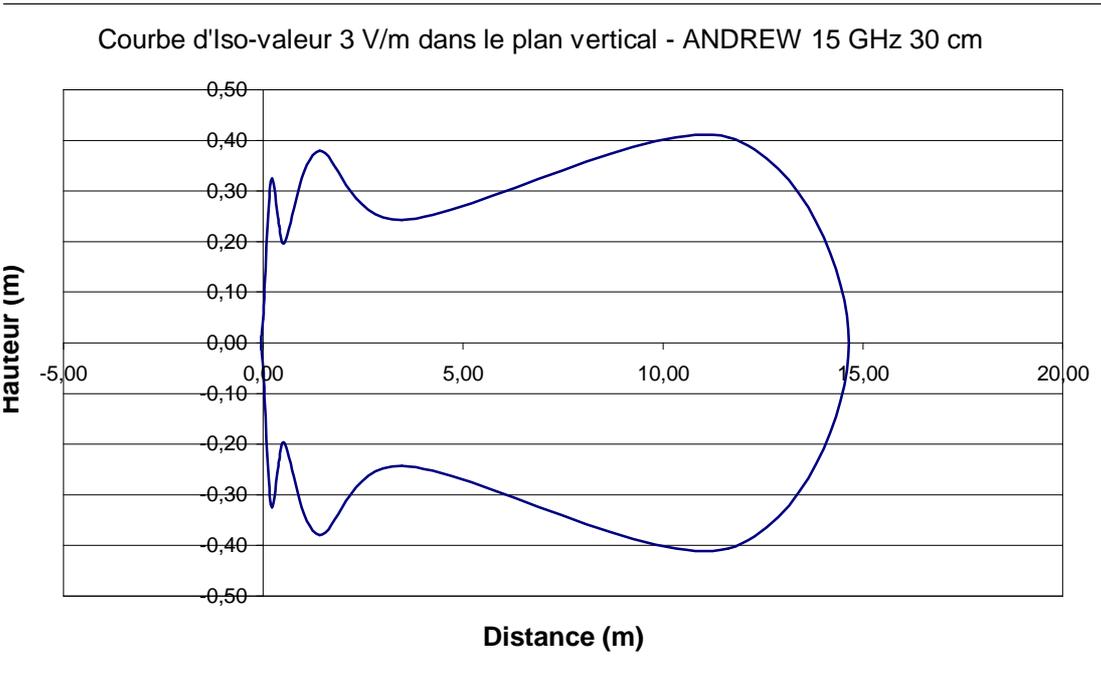
D max 3V/m (m) :	63,5	Densité maximale (W/m²)	0,5
H max 3V/m (m) :	-0,3	Distance de Rayleigh (m) :	22,8



Type : **ANDREW 15 GHz 30 cm**

Puissance (W)	0,05	Gain en dBi (à 0°)	31,1
Iso-Valeur (V/m) :	3		

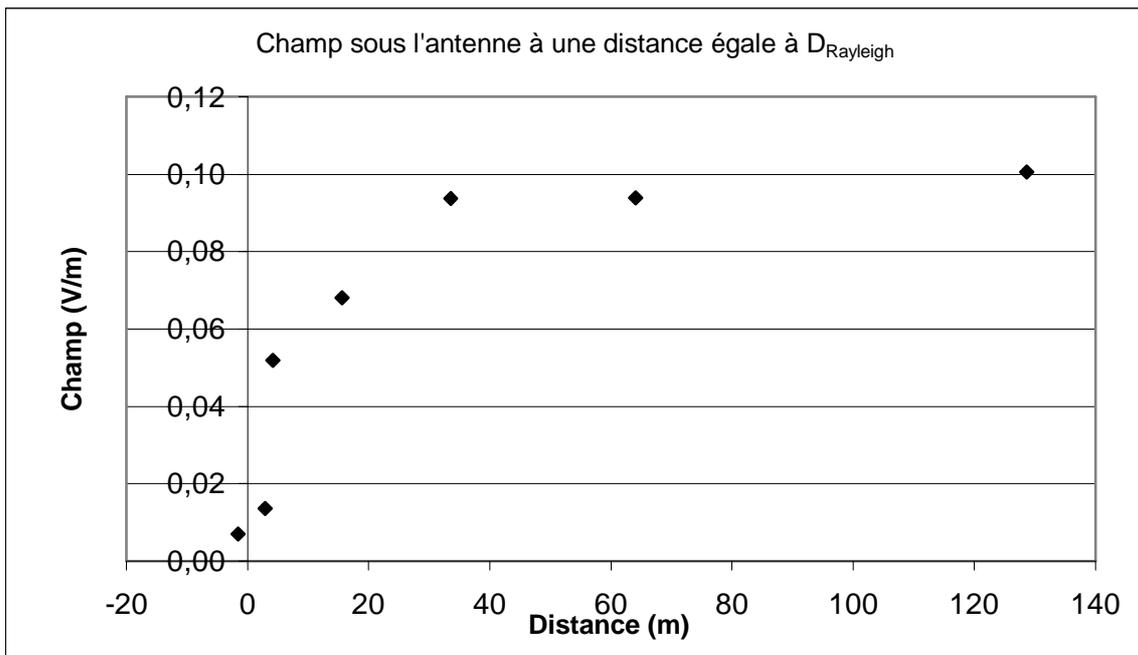
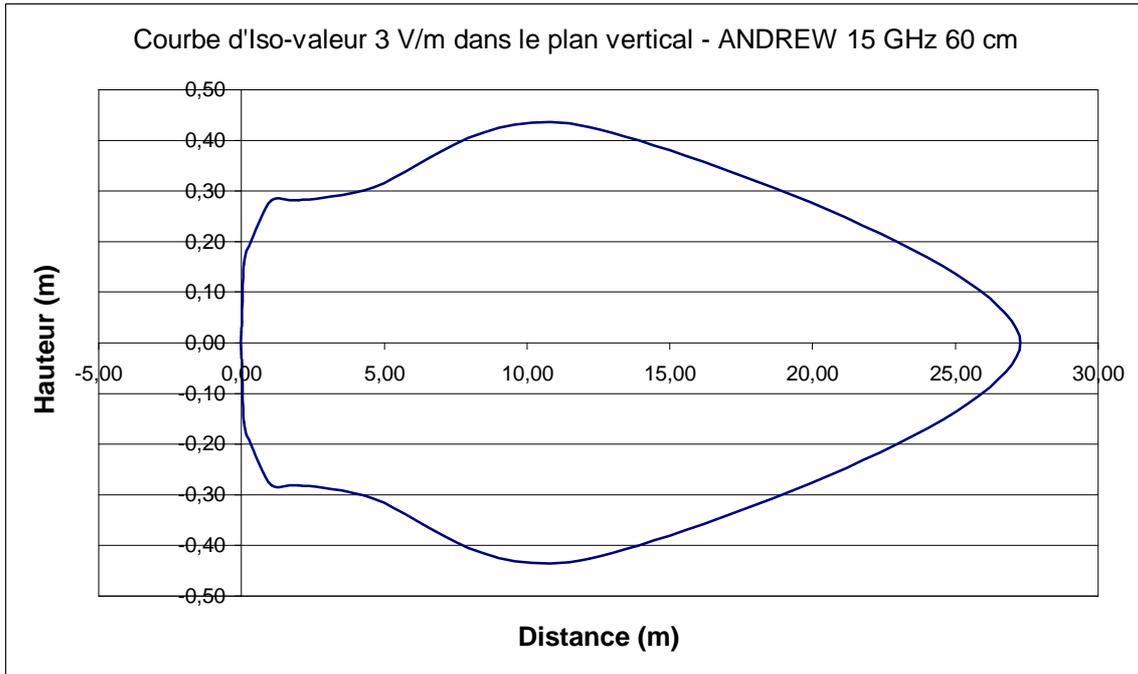
D max 3V/m (m) :	14,7	Densité maximale (W/m²)	2,1
H max 3V/m (m) :	-0,4	Distance de Rayleigh (m) :	2,3



Type : **ANDREW 15 GHz 60 cm**

Puissance (W)	0,05	Gain en dBi (à 0°)	36,5
Iso-Valeur (V/m) :	3		

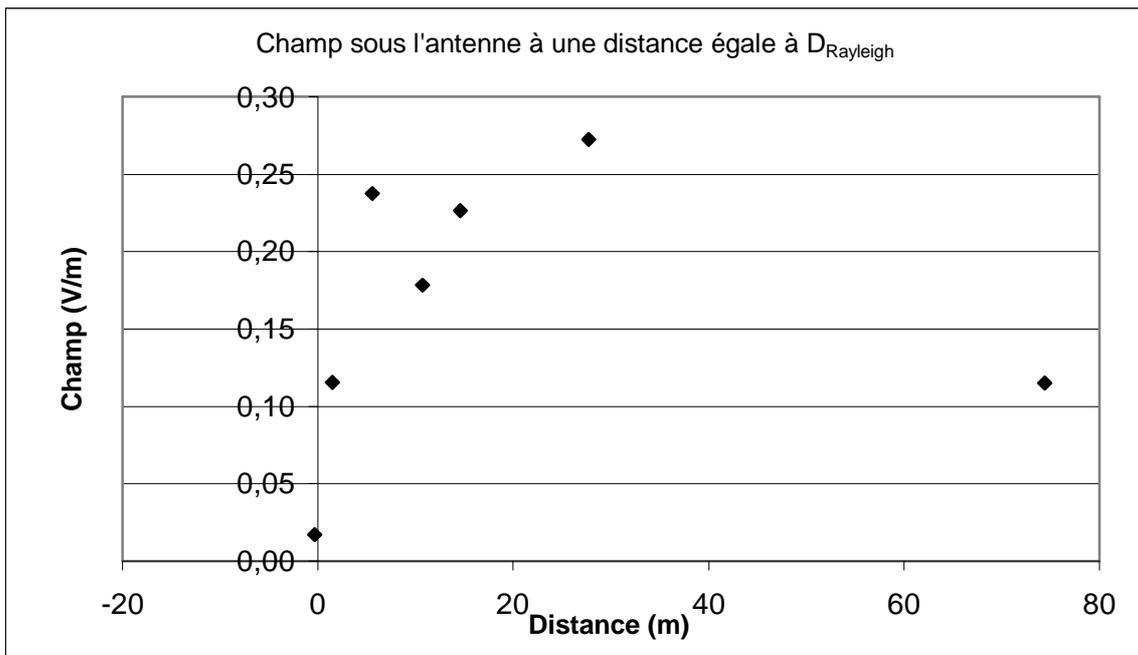
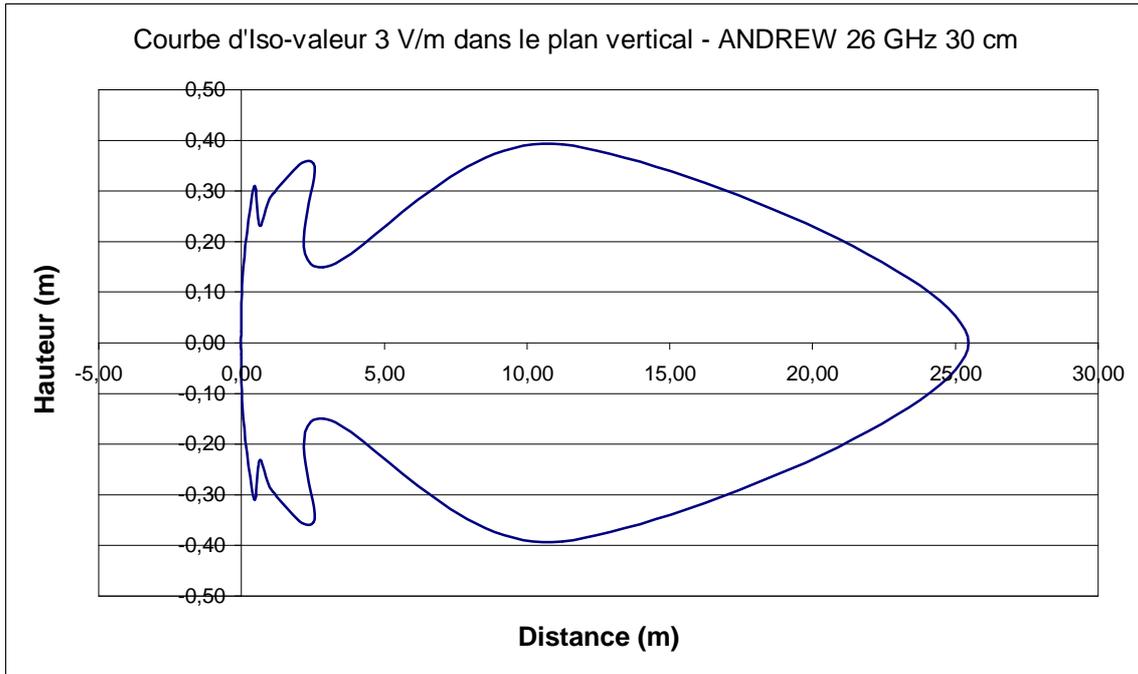
D max 3V/m (m) :	27,3	Densité maximale (W/m²)	0,5
H max 3V/m (m) :	-0,4	Distance de Rayleigh (m) :	9,0



Type : **ANDREW 26 GHz 30 cm**

Puissance (W)	0,05	Gain en dBi (à 0°)	35,9
Iso-Valeur (V/m) :	3		

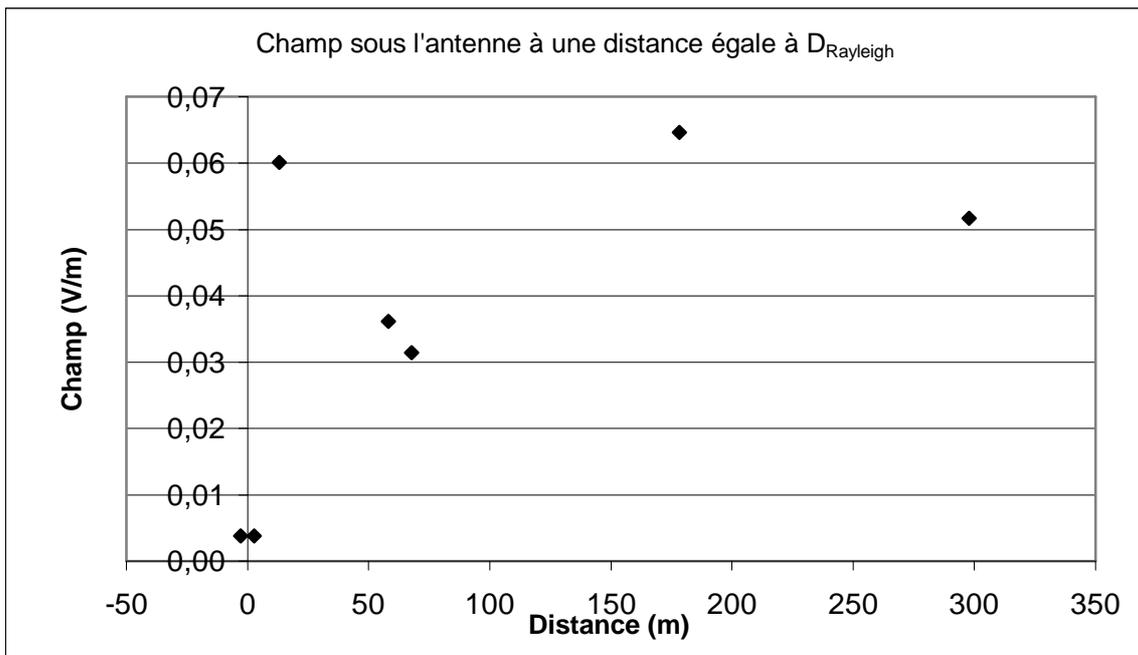
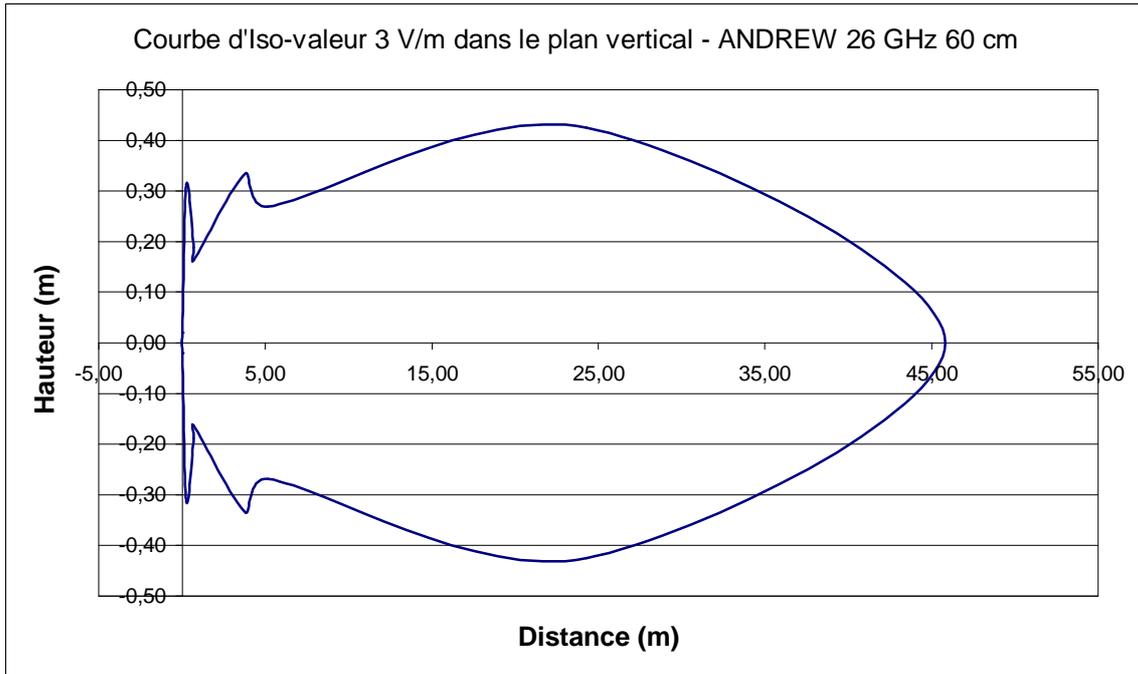
D max 3V/m (m) :	25,5	Densité maximale (W/m²)	2,1
H max 3V/m (m) :	-0,4	Distance de Rayleigh (m) :	3,9



Type : **ANDREW 26 GHz 60 cm**

Puissance (W)	0,05	Gain en dBi (à 0°)	41
Iso-Valeur (V/m) :	3		

D max 3V/m (m) :	45,8	Densité maximale (W/m²)	0,5
H max 3V/m (m) :	-0,4	Distance de Rayleigh (m) :	15,6



ANNEXE B

CONDITIONS DE VALIDITE DES MODELES DE CALCUL

Cette annexe expose les conditions de validité des modèles de calcul du champ électromagnétique dans les différentes zones entourant une antenne. Certaines notions d'électromagnétisme, utiles à la bonne compréhension des méthodes de calcul, sont également rappelées.

B.1. CHAMP ELECTROMAGNETIQUE - ONDE PLANE

Un champ électromagnétique comporte deux composantes qui sont constituées d'un champ électrique et d'un champ magnétique.

Le champ électrique E est un vecteur décrivant, en tout point de l'espace, la force que subirait une charge électrique unitaire qui y serait placée. Son intensité se note couramment E et s'exprime en Volts par mètre (V/m).

Le champ magnétique H décrit la force qui serait exercée, en tout point de l'espace, sur une charge électrique qui serait en mouvement à cet endroit⁸, c'est-à-dire un élément de courant électrique qui y serait placé. Le champ magnétique H est donc également un vecteur dont l'intensité H s'exprime en Ampère par mètre (A/m).

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 B1); ces champs varient sinusoïdalement dans l'espace et dans le temps. 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 :

$$\frac{E}{H} = Z \quad (\text{B1})$$

où :

E : intensité du champ électrique (en V/m)

H : intensité du champ magnétique (en A/m)

Z : impédance caractéristique (en ohm) du milieu où l'onde se propage

L'impédance caractéristique vaut 377Ω dans l'air, d'où :

⁸ Plus précisément, c'est l'induction magnétique qui est définie de cette manière, mais elle est directement proportionnelle au champ magnétique.

$$\frac{E}{H} = 377 \Omega \quad (B2)$$

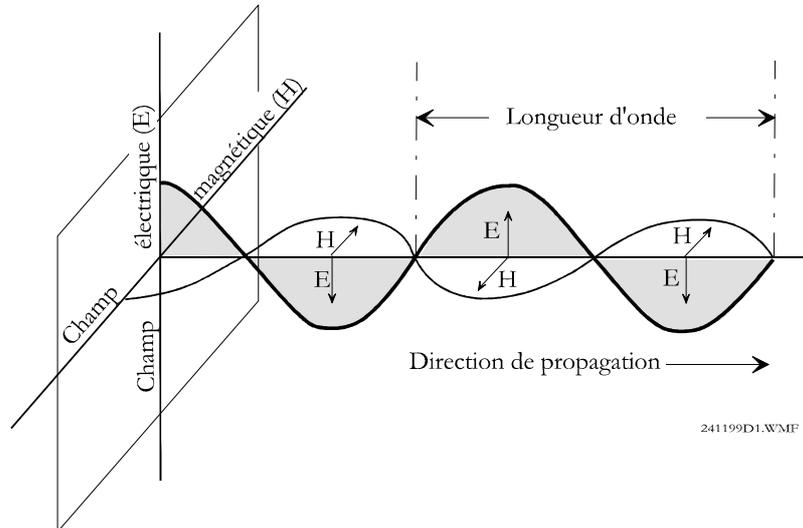


Figure B1 : Onde électromagnétique plane

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 :

$$S = E \cdot H \quad (B3)$$

Compte tenu de la relation (B2), lorsque l'onde se propage dans l'air, on peut écrire que :

$$S = \frac{E^2}{377} = 377 H^2 \quad (B4)$$

Comme la puissance est transportée dans la direction de propagation, on peut représenter le flux de puissance par un vecteur \mathbf{S} pointant dans cette direction : il est appelé vecteur de Poynting.

En principe, les relations (B1), (B2) et (B4) ne sont valables que pour une onde plane, c'est-à-dire lorsqu'on est suffisamment loin de la source d'émission. Dans cette zone, la connaissance d'une des trois grandeurs (E , H ou S) permet, par simple calcul, de déterminer les autres grandeurs.

B.2. CHAMPS REACTIFS ET CHAMPS DE RAYONNEMENT

Lorsqu'on se rapproche d'une antenne, il y a lieu de distinguer les champs réactifs des champs de rayonnement. Des champs électriques ou magnétiques sont dits réactifs lorsque l'énergie électromagnétique circule localement, sans être transportée à grande distance par un mécanisme d'onde; les champs sont dits de rayonnement dans le cas contraire. Comme cas extrême de champs presque purement réactifs, on peut citer le cas d'un transformateur, où l'énergie circule dans le noyau, ou encore celui d'un condensateur où elle circule entre les plaques. A l'opposé, on trouve évidemment l'onde plane dont les champs sont purement de rayonnement.

Une antenne produit des champs électromagnétiques qui comprennent une composante réactive et une composante de rayonnement. La première décroît très rapidement avec la distance par rapport à l'antenne et devient généralement négligeable à des distances de l'ordre de la longueur d'onde.

B.3. ZONES DE CHAMPS REACTIFS, DE CHAMP PROCHE RAYONNE ET DE CHAMP ELOIGNE

L'espace entourant une source de champ électromagnétique est composé des trois zones (figure B2) appelées : zone de champs réactifs, zone de champ proche rayonné et zone de champ éloigné (voir , notamment [3], page 91).

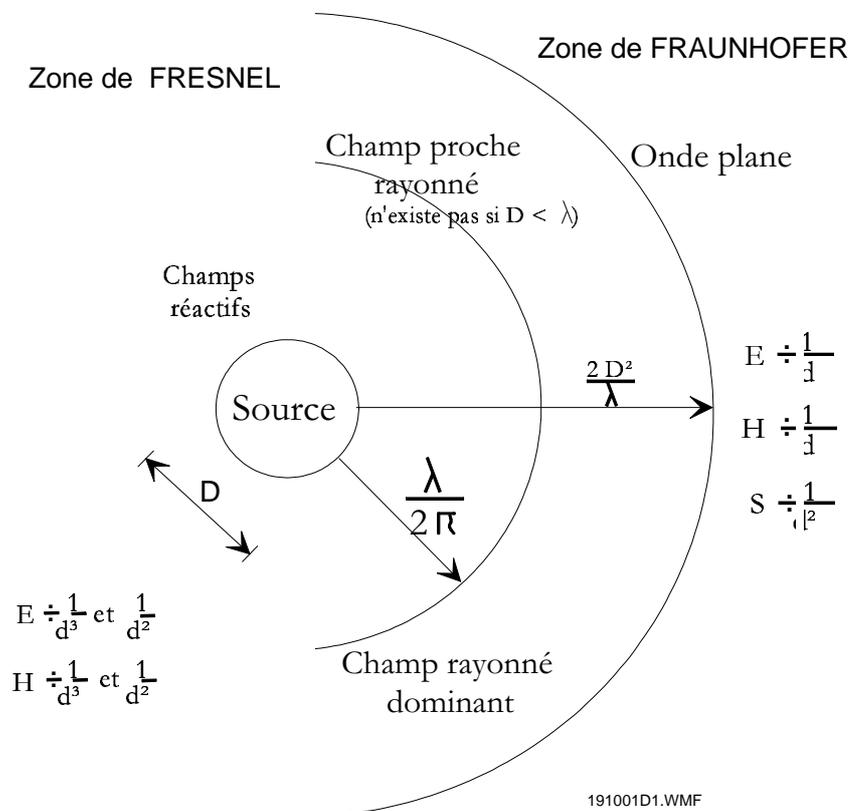


Figure B2 : Zones de champs réactifs, de champ proche rayonné et de champ éloigné

B.3.1. Zone de champs réactifs

A une distance de l'ordre de la longueur d'onde, on se trouve dans la zone dite de champs réactifs et la décroissance des champs électrique et magnétique est fonction de l'inverse du carré et du cube de la distance. L'ampleur de cette zone étant très limitée, elle présente en général peu d'intérêt du point de vue de la sécurité, lorsque la fréquence dépasse quelques dizaines de MHz ($\lambda = 30 \text{ m}$ à 10 MHz). En ce qui concerne les antennes monopole ou dipôle, il peut être démontré (voir [1]; page 93) que le champ proche rayonné est supérieur aux champs réactifs au-delà d'une distance égale à $\lambda/2\pi$.

B.3.2. Zone de champ éloigné

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

$$d_{FR} = \frac{2 D^2}{\lambda} \quad (B5)$$

où :

D : plus grande dimension de l' antenne dans la direction perpendiculaire à la direction du rayonnement⁹ (en m)

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

$$\lambda = \frac{300}{f} \quad (B6)$$

où :

f : fréquence (en MHz)

A une distance de l' antenne d' émission supérieure à d_{FR} , on dit que l' on se trouve en **champ éloigné**. Les champs électrique et magnétique y sont inversement proportionnels à la distance et sont respectivement donnés par les relations (B7) et (B8), généralement appelées « formules du champ éloigné ».

$$E = \frac{(30 P \cdot G)^{1/2}}{A(\phi, \theta) \cdot d} \quad (B7)$$

⁹ Le fait qu'il a lieu de considérer la plus grande dimension de l'antenne dans la direction perpendiculaire à la direction de propagation est expliqué par un exemple repris au § A4.

$$H = \frac{(0,08 P \cdot G)^{1/2}}{A(\phi, \theta) \cdot d} \quad (B8)$$

avec :

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

θ et φ sont généralement mesurés par rapport à la direction où l'intensité du rayonnement est maximale (axe du faisceau).

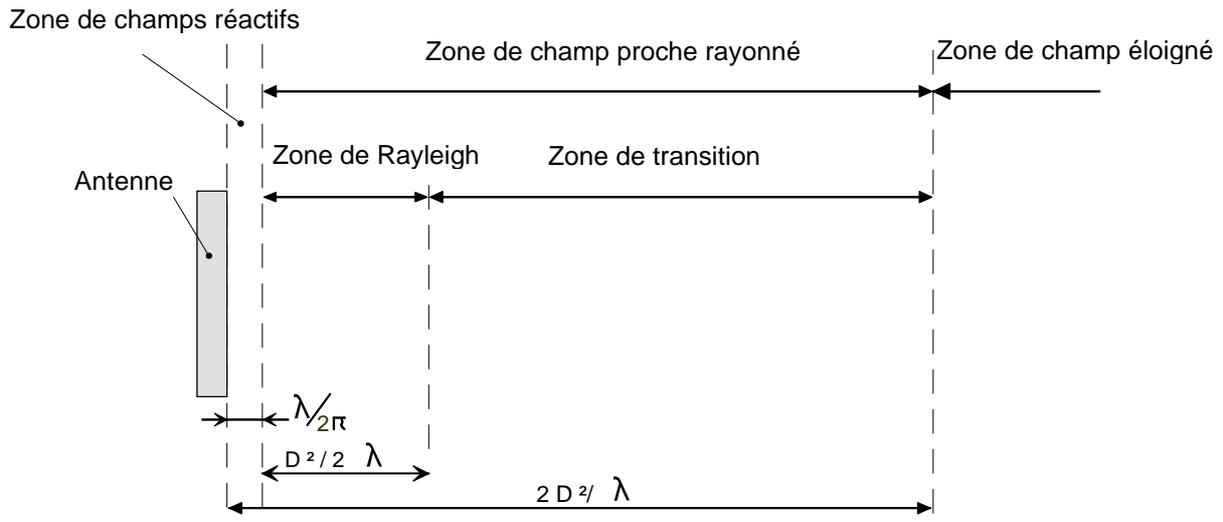
B.3.3. Zone de champ proche rayonné

Entre la zone des champs réactifs et la zone de champ éloigné se trouve la zone des champs proches rayonnés (également appelée « zone de Fresnel »); le champ y présente des variations importantes en fonction de la distance. Pour le calcul, cette zone peut être décomposée en deux parties; cette décomposition fait intervenir la distance de Rayleigh qui est donnée par :

$$d_R = \frac{D^2}{2\lambda} \quad (B9)$$

où λ et D ont la même signification que dans la relation (B5). La distance de Rayleigh vaut le quart de la distance de Fraunhofer.

La première partie s'étend depuis la fin de la zone de champs réactifs jusqu'à la distance de Rayleigh; elle est généralement appelée zone de Rayleigh. La seconde partie est comprise entre la distance de Rayleigh et la distance de Fraunhofer (figures B2 et B3); elle est appelée zone de transition.



140501D1.JPG

Figure B3 : Zones de champs réactifs, de champ proche rayonné et de champ éloigné

Dans la zone de transition, il est couramment admis que les relations (B7) et (B8), normalement applicables en champ éloigné, fournissent une précision qui est tout à fait suffisante.

La distance de Rayleigh doit être considérée comme la distance au-delà de laquelle les formules du champ éloigné fournissent une précision acceptable. Il faut toutefois préciser que dans la relation (B9) (ainsi que pour la relation (B5) en ce qui concerne la distance de Fraunhofer), D représente la plus grande dimension *dans la direction perpendiculaire à la direction de propagation*.

REFERENCES

- [1] MACNAMARA Theresa - Handbook of Antennas for EMC - Artech House - 1995
- [2] VAN BLAKE Lamont - Radar Range-Performance Analysis - Lexington Books - 1980
- [3] KITCHEN Ronald - Radiation Safety Handbook - Butterworth - Heinemann Ltd - 1995
- [4] COMBES Paul F. - Ondes Métriques et Centimétriques - Lignes, circuits passifs, antennes - Dunod Université - 1980
- [5] STOCKBROECKX Benoît, VANDER VORST André - Courbes d'Iso-valeur du Champ Electrique Rayonné par Quelques Installations Typiques de Faisceau Hertzien - Université Catholique de Louvain - Juillet 2000 - Rapport établi pour la Région de Bruxelles-Capitale.