

RECOMMANDATION UIT-R F.699-7*

Diagrammes de rayonnement de référence pour antennes de systèmes hertziens fixes à utiliser pour les études de coordination et l'évaluation du brouillage dans la gamme de fréquences comprise entre 100 MHz et environ 70 GHz

(Question UIT-R 110/9)

(1990-1992-1994-1995-1997-2000-2003-2006)

Domaine de compétence

La présente Recommandation fournit des informations sur des antennes de systèmes hertziens fixes (FWS) exploités dans la gamme comprise entre 100 MHz et environ 70 GHz ainsi que les diagrammes de rayonnement de référence correspondants. Ces informations peuvent être utilisées pour des études de coordination et pour l'évaluation des brouillages lorsque des renseignements spécifiques relatifs à l'antenne d'un FWS ne sont pas disponibles.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, pour les études de coordination et pour l'évaluation de brouillages mutuels entre systèmes hertziens fixes (FWS) et entre stations appartenant à de tels systèmes et stations terriennes des services de radiocommunication spatiale partageant la même bande de fréquences, il peut être nécessaire d'utiliser des diagrammes de rayonnement de référence pour les antennes de FWS;
- b) que, pour les études susmentionnées, des diagrammes de rayonnement fondés sur le niveau dépassé par un faible pourcentage des crêtes des lobes latéraux peuvent être appropriés;
- c) que les diagrammes de lobes latéraux d'antenne de tailles différentes sont fortement influencés par le rapport entre le diamètre de l'antenne et la longueur d'onde utilisée;
- d) que des diagrammes de rayonnement de référence sont nécessaires dans le cas où l'on ne connaît pas le diamètre de l'antenne;
- e) que, pour de grands angles, la possibilité de réflexions locales par le sol doit être prise en considération;
- f) que l'utilisation d'antennes ayant les meilleurs diagrammes de rayonnement possibles, compte tenu du Rapport UIT-R F.2059, permettra l'utilisation la plus efficace du spectre radioélectrique,

recommande

1 qu'en l'absence d'informations particulières concernant le diagramme de rayonnement de l'antenne de FWS dont il s'agit (voir la Note 1), le diagramme de rayonnement de référence décrit ci-après soit utilisé pour:

1.1 l'évaluation du brouillage entre FWS;

* La présente Recommandation devrait être portée à l'attention des Commissions d'études 4, 6, 7 et 8 des radiocommunications.

1.2 les études de coordination et l'évaluation du brouillage entre stations de FWS et stations des services de radiocommunication spatiale partageant la même bande de fréquences;

2 que le diagramme de rayonnement de référence suivant soit adopté pour les fréquences comprises entre 100 MHz et environ 70 GHz;

2.1 que, pour les fréquences comprises entre 1 GHz et environ 70 GHz, dans les cas où le rapport entre le diamètre de l'antenne et la longueur d'onde est supérieur à 100, les formules suivantes soient employées (voir les Notes 6 et 7):

$$\begin{aligned}
 G(\varphi) &= G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 && \text{pour } 0^\circ < \varphi < \varphi_m \\
 G(\varphi) &= G_1 && \text{pour } \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r \\
 G(\varphi) &= 32 - 25 \log \varphi && \text{pour } \varphi_r \leq \varphi < 48^\circ \\
 G(\varphi) &= -10 && \text{pour } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ
 \end{aligned}$$

où:

$G(\varphi)$: gain par rapport à une antenne isotrope
 φ : angle hors axe (degrés)
 D : diamètre de l'antenne
 λ : longueur d'onde

} exprimés dans les mêmes unités

G_1 : gain du premier lobe latéral = $2 + 15 \log \frac{D}{\lambda}$

$$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{max} - G_1} \quad \text{degrés}$$

$$\varphi_r = 15,85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} \quad \text{degrés}$$

2.2 que, pour les fréquences comprises entre 1 GHz et environ 70 GHz, dans les cas où le rapport entre le diamètre de l'antenne et la longueur d'onde est inférieur ou égal à 100, les formules suivantes soient employées (voir les Notes 6 et 7):

$$\begin{aligned}
 G(\varphi) &= G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 && \text{pour } 0^\circ < \varphi < \varphi_m \\
 G(\varphi) &= G_1 && \text{pour } \varphi_m \leq \varphi < 100 \frac{\lambda}{D} \\
 G(\varphi) &= 52 - 10 \log \frac{D}{\lambda} - 25 \log \varphi && \text{pour } 100 \frac{\lambda}{D} \leq \varphi < 48^\circ \\
 G(\varphi) &= 10 - 10 \log \frac{D}{\lambda} && \text{pour } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ
 \end{aligned}$$

2.3 que, pour les fréquences allant de 100 MHz à moins de 1 GHz, dans les cas où le rapport entre le diamètre de l'antenne et la longueur d'onde est supérieur à 0,63 (G_{max} est supérieur à 3,7 dBi), les formules suivantes soient employées:

$$G(\varphi) = G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 \quad \text{pour} \quad 0^\circ < \varphi < \varphi_m$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{pour} \quad \varphi_m \leq \varphi < 100 \frac{\lambda}{D}$$

$$G(\varphi) = 52 - 10 \log \frac{D}{\lambda} - 25 \log \varphi \quad \text{pour} \quad 100 \frac{\lambda}{D} \leq \varphi < \varphi_s$$

$$G(\varphi) = -2 - 5 \log \frac{D}{\lambda} \quad \text{pour} \quad \varphi_s \leq \varphi \leq 180^\circ$$

où:

$$\varphi_s = 144,5 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,2}$$

3 que, dans les cas où seul le gain d'antenne maximal est connu, D/λ puisse être évalué à partir de l'expression:

$$20 \log \frac{D}{\lambda} \approx G_{max} - 7,7$$

où G_{max} est le gain d'antenne dans le lobe principal (dBi);

4 que, dans les cas où seules les ouvertures de faisceau sont connues;

4.1 que la valeur du rapport D/λ (D et λ étant exprimés dans les mêmes unités) soit calculée approximativement au moyen de la formule suivante:

$$D/\lambda \approx 70 / \theta$$

où θ est l'ouverture du faisceau à -3 dB (degrés);

4.2 étant donné θ , que la valeur G_{max} puisse être estimée approximativement au moyen de la formule suivante:

$$G_{max} \text{ (dBi)} \approx 44,5 - 20 \log \theta$$

5 que les administrations présentent des diagrammes de rayonnement mesurés ou des spécifications pour que l'on puisse élaborer et proposer des diagrammes de rayonnement de référence améliorés à utiliser dans les études de coordination et dans l'évaluation du brouillage (voir l'Appendice 1 à l'Annexe 1);

6 de se reporter à l'Annexe 1 pour tout renseignement complémentaire relatif aux diagrammes de rayonnement de référence pour les antennes de FWS;

7 que, pour le calcul détaillé des niveaux de brouillage sur les trajets des brouillages, l'on tienne compte de la réponse contrapolaire de l'antenne du système brouillé et de l'antenne du système brouilleur;

7.1 que, pour le calcul visé au point 7 du *recommande*, y compris la composante du signal rayonné par l'antenne d'émission avec la polarité prévue et la réponse contrapolaire de l'antenne de réception brouillée à la composante du signal rayonné par l'antenne d'émission avec la polarité non prévue, l'équation ci-après puisse être utilisée:

$$G_t(\varphi_t) + G_r(\varphi_r) = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{G_{tH}(\varphi_t) + G_{rV}(\varphi_r)}{10}} + 10^{\frac{G_{tV}(\varphi_t) + G_{rH}(\varphi_r)}{10}} \right) \quad (\text{dBi})$$

où les paramètres ci-après se rapportent au gain d'antenne (dBi):

- $G_t(\varphi_t)$: gain effectif de l'antenne d'émission en direction de l'antenne brouillée
- $G_r(\varphi_r)$: gain effectif de l'antenne de réception en direction de l'antenne brouilleuse
- $G_{tH}(\varphi_t)$: composante du gain à polarisation horizontale de l'antenne d'émission
- $G_{rV}(\varphi_r)$: composante du gain à polarisation verticale de l'antenne de réception
- $G_{tV}(\varphi_t)$: composante du gain à polarisation verticale de l'antenne d'émission
- $G_{rH}(\varphi_r)$: composante du gain à polarisation horizontale de l'antenne de réception.

φ_t et φ_r sont les angles formés par la direction du faisceau principal et, respectivement, la direction de l'antenne brouillée et la direction de l'antenne d'émission.

Des informations supplémentaires et des exemples chiffrés illustrant l'application de l'équation ci-dessus sont données dans l'Annexe 2;

8 que les Notes suivantes soient considérées comme faisant partie de la présente Recommandation.

NOTE 1 – Il est essentiel de tout mettre en œuvre pour utiliser le diagramme de rayonnement réel de l'antenne pour les études de coordination et l'évaluation du brouillage.

NOTE 2 – A noter que le diagramme de rayonnement d'une antenne réelle peut être moins bon que le diagramme de rayonnement de référence pour certaines gammes d'angles (voir la Note 3). En conséquence, le diagramme de rayonnement de référence de la présente Recommandation ne doit pas être interprété comme constituant la limite maximale pour les diagrammes de rayonnement d'antenne de FWS existants ou en projet. Il convient également de noter que, pour la certification, les administrations peuvent adopter des normes, généralement fondées sur des mesures statistiques d'antennes réelles, qui peuvent correspondre à des valeurs différentes des niveaux des diagrammes de rayonnement des lobes latéraux.

NOTE 3 – Le diagramme de rayonnement de référence doit être utilisé avec prudence pour des angles dans lesquels le système d'alimentation visé risque de donner lieu à des niveaux relativement élevés dus au débordement de l'illumination.

NOTE 4 – Les diagrammes de référence visés dans le § 2 ne sont applicables qu'à une seule polarisation (horizontale ou verticale). Les diagrammes de référence applicables aux deux polarisations (horizontale et verticale) sont à l'étude.

NOTE 5 – Le diagramme de rayonnement de référence inclus dans la présente Recommandation n'est valable que pour les antennes à symétrie de révolution. Le diagramme de rayonnement de référence pour les antennes à ouverture asymétrique ainsi que pour les antennes sans ouverture des systèmes hertziens fixes exploités dans la gamme comprise entre 100 MHz et 1 GHz appelle un complément d'étude. Pour de telles antennes, les diagrammes de rayonnement susmentionnés peuvent être considérés comme provisoirement valables. Dans ce cas, la valeur du rapport D/λ calculée à partir de la valeur de G_{max} est une valeur équivalente du rapport D/λ , et non la valeur réelle de ce rapport.

NOTE 6 – Des modèles mathématiques de diagrammes de rayonnement moyens à utiliser dans certaines études de coordination et dans l'évaluation du brouillage figurent dans la Recommandation UIT-R F.1245.

NOTE 7 – Les diagrammes de rayonnement de référence des antennes équidirectives et sectorielles des systèmes de type point à multipoint sont indiqués dans la Recommandation UIT-R F.1336.

NOTE 8 – Un complément d'étude est nécessaire si l'on veut que des diagrammes de rayonnement de référence continuent d'être élaborés pour tenir compte des progrès réalisés dans la conception des antennes.

NOTE 9 – Bien qu'il soit généralement applicable, le diagramme de référence indiqué au point 2 du *recommande* ne constitue pas un modèle approprié de certaines antennes du service fixe utilisées dans la pratique et doit être traité avec prudence pour certaines gammes d'angles, entre 5° et 70° (voir aussi les Notes 2 et 3).

Annexe 1

Diagrammes de rayonnement de référence pour antennes de FWS

1 Introduction

Pour étudier les possibilités de partage de fréquences entre des FWS et le SFS ou la possibilité de réutilisation des fréquences dans un réseau de FWS, il est souvent nécessaire d'utiliser un diagramme de référence, parce que le diagramme de rayonnement réel des antennes n'est pas toujours connu avec précision, ou donne trop de détails. Le diagramme de référence doit donc représenter de façon simplifiée l'enveloppe des lobes latéraux.

Cependant, le diagramme de rayonnement de référence que l'on doit choisir peut varier suivant l'utilisation à laquelle il est destiné.

On utilisera en général les diagrammes de rayonnement de référence figurant dans le corps de la présente Recommandation.

2 Utilisation des diagrammes de rayonnement de référence

Les deux principales utilisations des diagrammes de référence sont les suivantes:

2.1 Etudes préliminaires dans la zone de coordination

Lorsque l'on détermine la zone de coordination autour d'une station terrienne, on suppose que les antennes de FWS sont pointées directement vers la station terrienne. Cependant, dans la plupart des cas, il existe une certaine discrimination angulaire. L'utilisation d'un diagramme de rayonnement de référence simple permet d'éliminer de toute considération ultérieure les stations de FWS situées dans la zone de coordination, mais qui ne sont pas susceptibles de produire des brouillages.

Ce diagramme de référence doit nécessairement être affecté d'une marge de sécurité suffisante pour éviter l'élimination des sources de brouillage importantes. Evidemment, le calcul précis du niveau de brouillage nécessite une connaissance plus précise du diagramme des antennes.

2.2 Réutilisation des fréquences dans un réseau hertzien fixe

Dans un réseau hertzien fixe, on est amené à utiliser de nombreuses fois la même fréquence, soit sur des tronçons suffisamment éloignés l'un de l'autre, soit sur des tronçons partant de la même station dans des directions différentes, soit sur le même tronçon en polarisation croisée.

Dans les deux derniers cas, les performances de l'antenne ont une grande importance, et on doit utiliser, pour le projet de réseau, un diagramme de rayonnement de référence assez précis, qui peut être éventuellement moins simple que celui considéré au § 2.1. L'efficacité économique devant être prise en considération, les administrations souhaitent peut-être encourager l'utilisation d'antennes très performantes pour des portions de spectre très utilisées.

3 Résultats des mesures sur les antennes de liaisons hertziennes fixes

Les mesures effectuées sur de nombreuses antennes confirment de façon satisfaisante les calculs des diagrammes de rayonnement de référence présentés dans le corps du texte de la présente Recommandation, tout au moins jusqu'à une valeur de D/λ d'environ 130. Il faut cependant tenir compte des points suivants:

3.1 Certaines antennes, de construction relativement ancienne, ont des performances moins bonnes que des antennes plus récentes. Il faut tenir compte de l'existence de ces antennes aux performances moyennes pour le partage des fréquences.

3.2 Le calcul précédent est fait dans l'hypothèse du fonctionnement des antennes dans les conditions d'espace libre. Or, les caractéristiques des antennes en service effectif peuvent être un peu moins bonnes, par suite des réflexions sur des obstacles voisins ou sur d'autres antennes installées sur le même pylône.

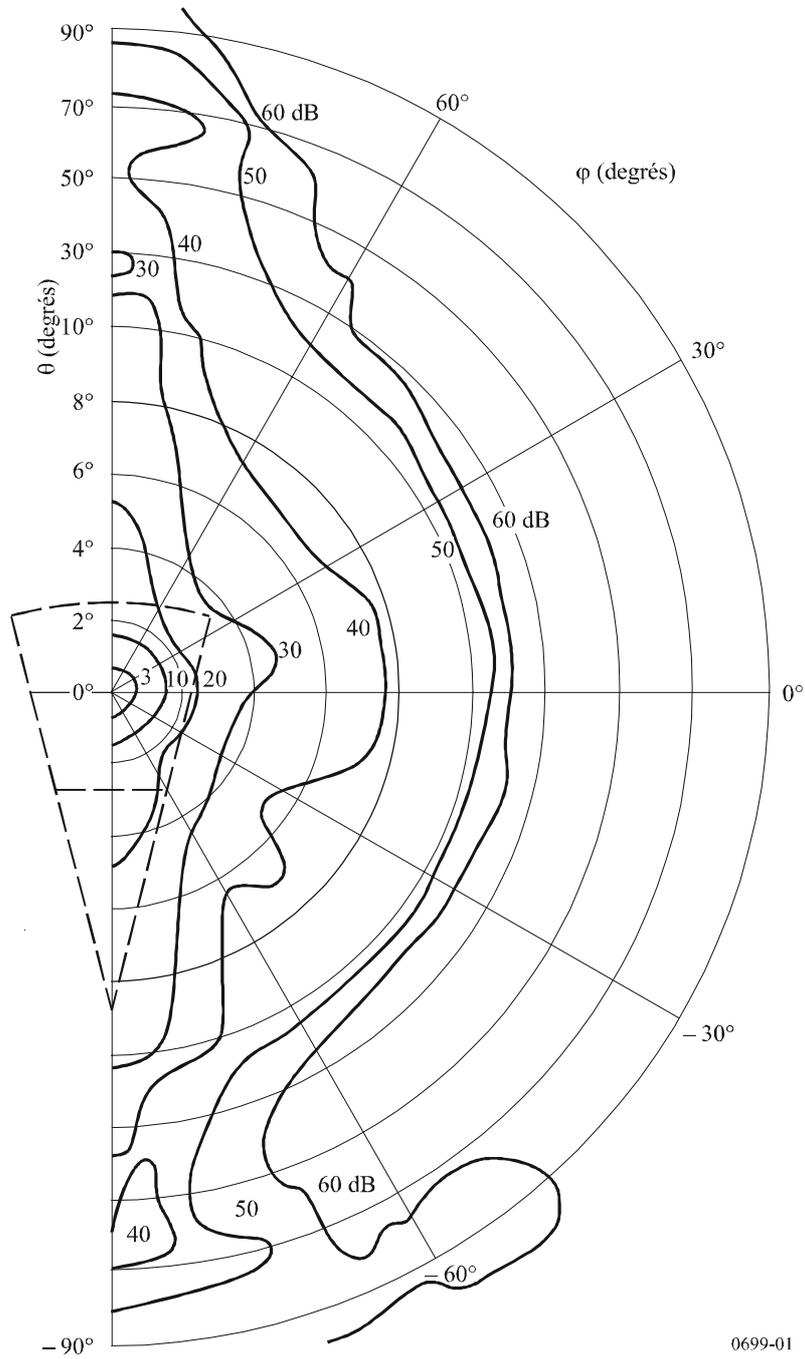
4 Diagrammes de rayonnement des antennes très performantes

Les antennes très performantes augmentent considérablement la capacité des noeuds des FWS. Pour les antennes à cornet réflecteur, qui ont été mises au point essentiellement pour répondre aux besoins des FWS de Terre dans des réseaux de grande densité, le diagramme de référence ci-dessus est valable seulement dans le plan horizontal. Dans des plans s'écartant de l'horizontale, on observe en effet d'importantes variations de sensibilité.

La Fig. 1 représente un exemple de diagramme de rayonnement d'une antenne à cornet réflecteur pyramidal; cette antenne, de type particulier, est très souvent utilisée. Les contours de l'enveloppe de rayonnement sont indiqués (en dB par rapport au faisceau principal) dans un système de coordonnées utilisant les angles φ et θ (le centre de ce système de coordonnées sphériques étant le centre de l'ouverture de l'antenne). L'écart important par rapport à la symétrie de révolution admise dans les diagrammes de rayonnement de référence indiqués au point 2 du *recommande* est dû:

- au lobe de débordement autour de $\varphi = +90^\circ$ et de $60^\circ < \theta < 80^\circ$,
- au lobe du couvercle contre les précipitations atmosphériques autour de $\varphi = -90^\circ$ et de $50^\circ < \theta < 90^\circ$.

FIGURE 1
 Diagramme de rayonnement à trois dimensions pour une antenne
 à cornet-réfecteur pyramidal à polarisation verticale 3,9 GHz
 (noter le changement d'échelle à $\theta = 10^\circ$)

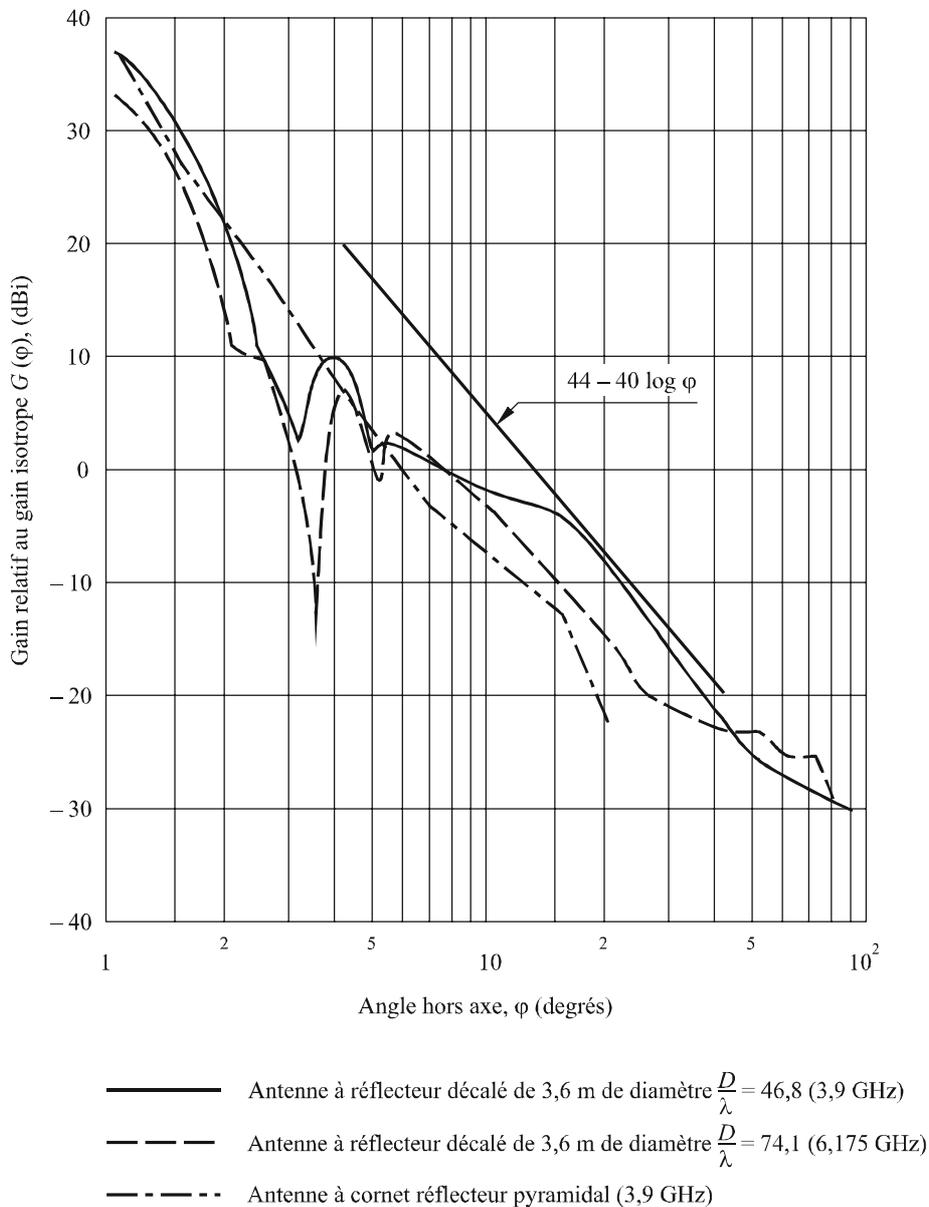


Le lobe de débordement résulte de la diffraction de l'onde au bord supérieur de l'ouverture, diffraction causée par les rayons directs émanant de la section cornet pyramidal. Cet effet n'est prononcé que dans le cas de la polarisation verticale. Le lobe du couvercle contre les précipitations atmosphériques est dû à la réflexion de l'énergie sur le couvercle incliné de protection en matière plastique qui le renvoie sur la surface parabolique, laquelle réfléchit à son tour la plupart de l'énergie vers le bas, au-dessus du bord inférieur de l'ouverture. Ce phénomène est insensible à la polarisation et à la fréquence.

Une antenne à réflecteur décalé présente un grand effet directif, notamment dans le plan horizontal. La Fig. 2 donne des exemples de diagrammes de rayonnement de l'antenne à réflecteur décalé ainsi qu'un exemple pour une antenne à cornet réflecteur pyramidal, déduit de la Fig. 1.

FIGURE 2

Diagramme de rayonnement d'antennes très performantes



Pour les antennes à cornet réflecteur et les antennes à illumination décalée dont l'illumination est très faible en bordure du réflecteur, on peut utiliser provisoirement comme diagramme de rayonnement de référence dans le plan horizontal la formule suivante:

$$G = 88 - 30 \log \frac{D}{\lambda} - 40 \log \varphi \quad (1)$$

Cette formule est valable à l'extérieur du lobe principal pour une valeur du φ pouvant atteindre 90° environ. Toutefois, lorsque l'illumination en bordure du réflecteur n'est pas très faible, le niveau des lobes latéraux dans certaines directions peut être plus élevé que celui indiqué dans l'équation (1).

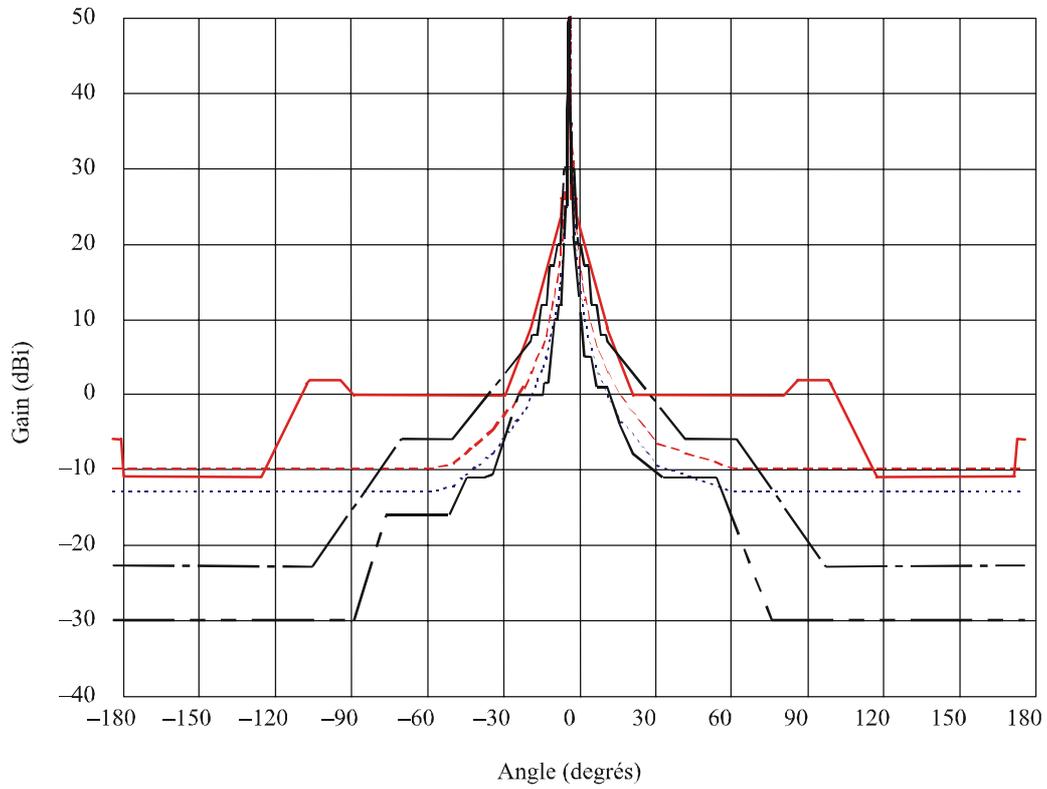
Appendice 1 à l'Annexe 1

Diagrammes mesurés à utiliser dans le cadre de développements futurs de la présente Recommandation

1 Introduction

Les diagrammes de rayonnement de référence contenus dans la présente Recommandation doivent être continuellement revus et actualisés. Les bandes de fréquences utilisées pour les FWS s'étendant au-delà de 70 GHz, il faut élargir le champ d'application de ces diagrammes référence au-delà de 70 GHz. Dans cette optique, le présent Appendice fournit des comparaisons d'enveloppes de diagrammes et de diagrammes de rayonnement d'antennes réels avec les diagrammes de référence correspondants tirés de la présente Recommandation et de la Recommandation UIT-R F.1245.

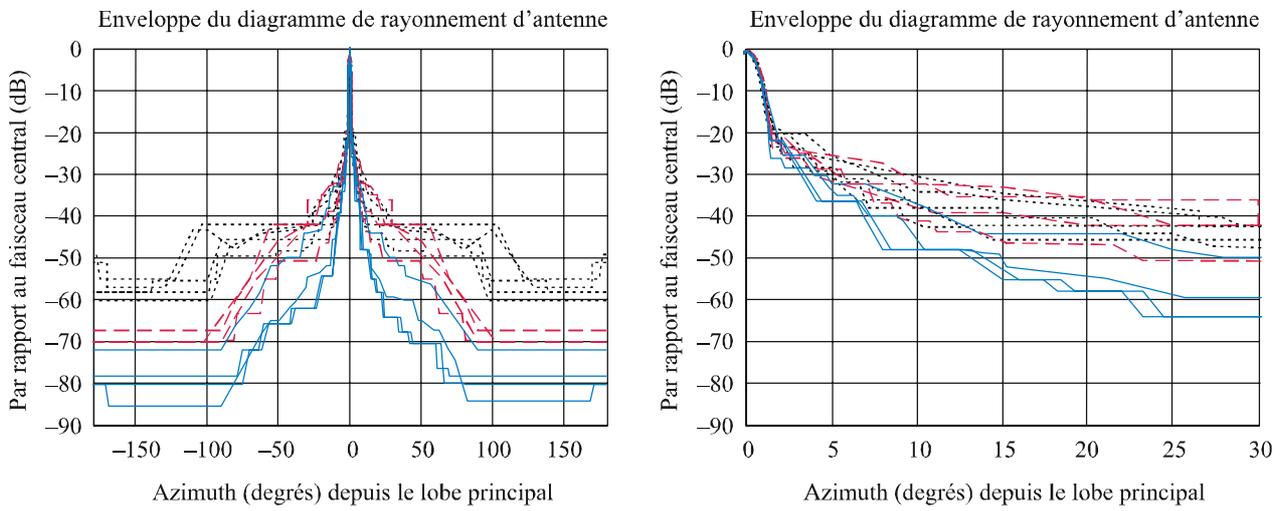
FIGURE 3
 Diagramme de rayonnement pour une antenne point à point de 3 m de diamètre
 utilisée dans la bande de 10,7 GHz ($D/\lambda = 114$; gain = 49,8 dBi)
 (H: polarisation horizontale, V: polarisation verticale)



- Recommandation UIT-R F.699
- Recommandation UIT-R F.1245
- Performance médiocre V
- — Performance moyenne V
- · — Performance élevée V

FIGURE 4

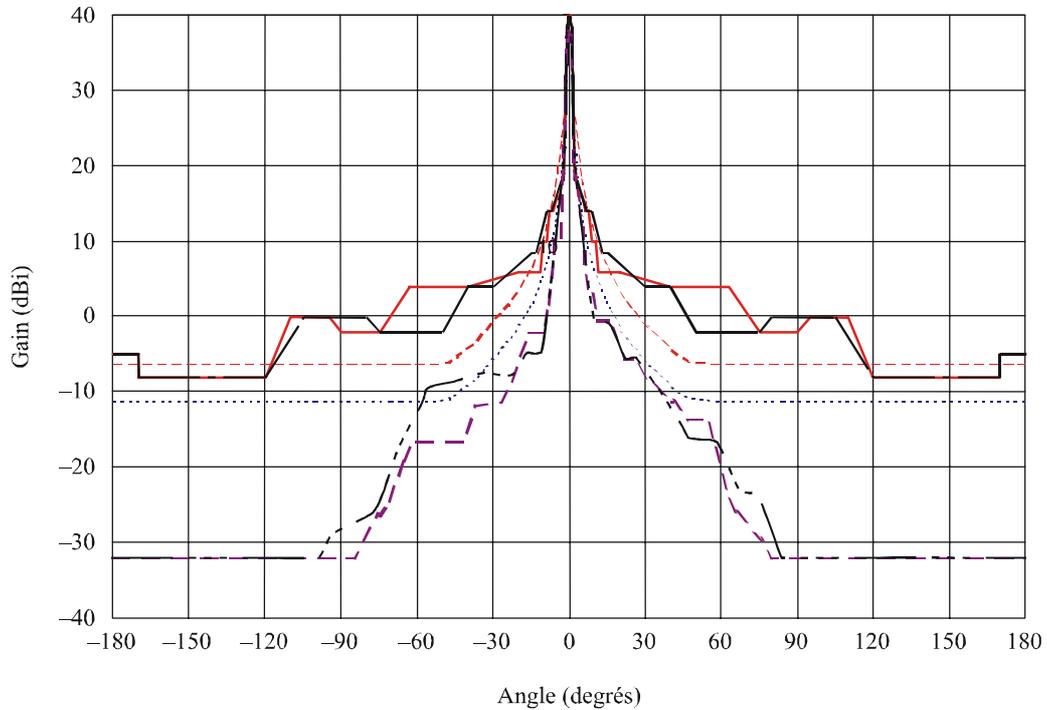
**Diagrammes pour un échantillon d'antennes disponibles sur le marché
(1,8 m de diamètre, polarisation horizontale, 10,7 GHz)**



Légende:

- Performance médiocre
- - - - - Performance moyenne
- Haute performance

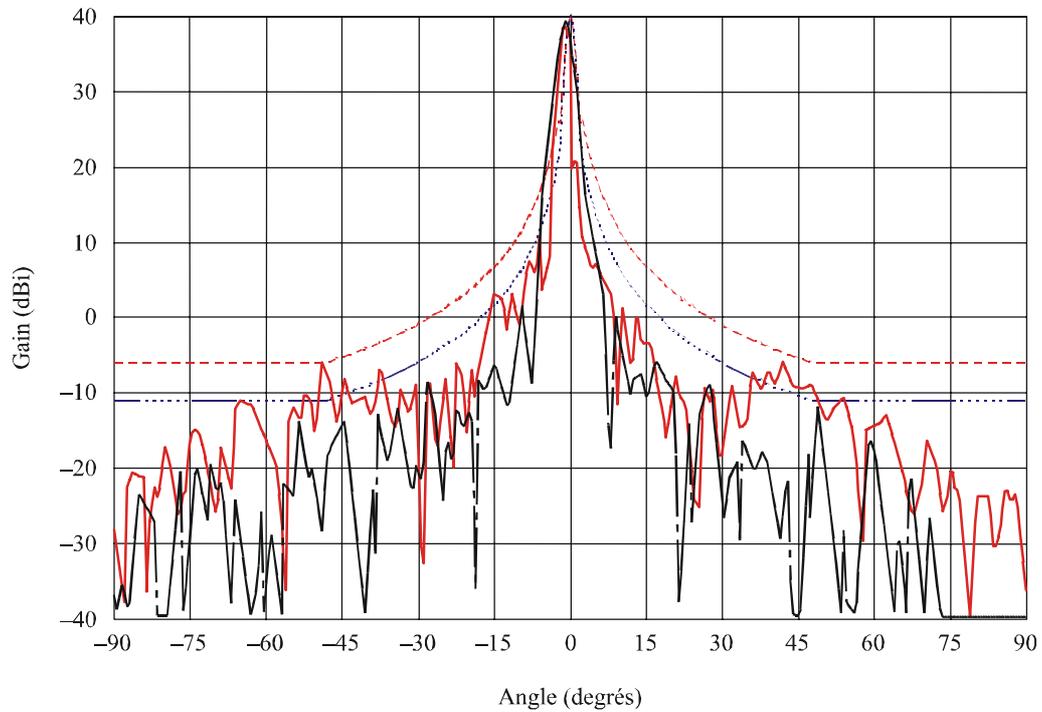
FIGURE 5
**Diagramme de rayonnement pour une antenne point à point de 1,2 m de diamètre
 utilisée dans la bande de 10,5 GHz ($D/\lambda = 43$; gain = 39,9 dBi)
 (H: polarisation horizontale, V: polarisation verticale)**



- Recommandation UIT-R F.699
- Recommandation UIT-R F.1245
- Performance médiocre H
- - - Performance médiocre V
- Performance élevée H
- - - Performance élevée V

FIGURE 6

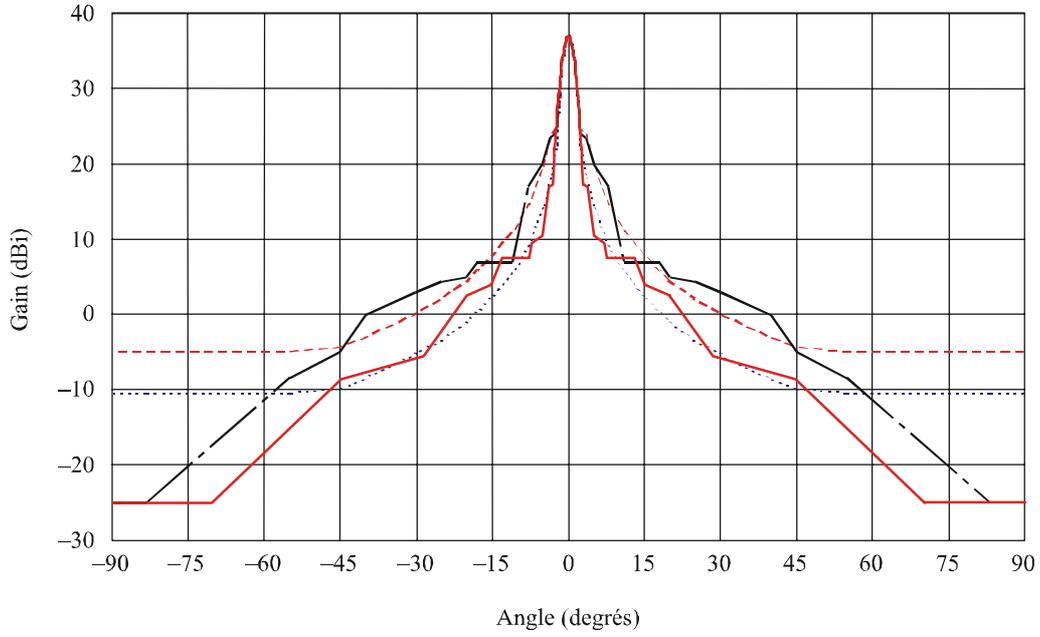
Diagramme de rayonnement pour une antenne point à point, à cornet ou à lentille de 50 cm de diamètre, utilisée dans la bande de 21 GHz ($D/\lambda = 37$; gain = 40 dBi)



- Recommandation UIT-R F.699
- ... Recommandation UIT-R F.1245
- Valeurs mesurées
- Valeurs mesurées

FIGURE 7

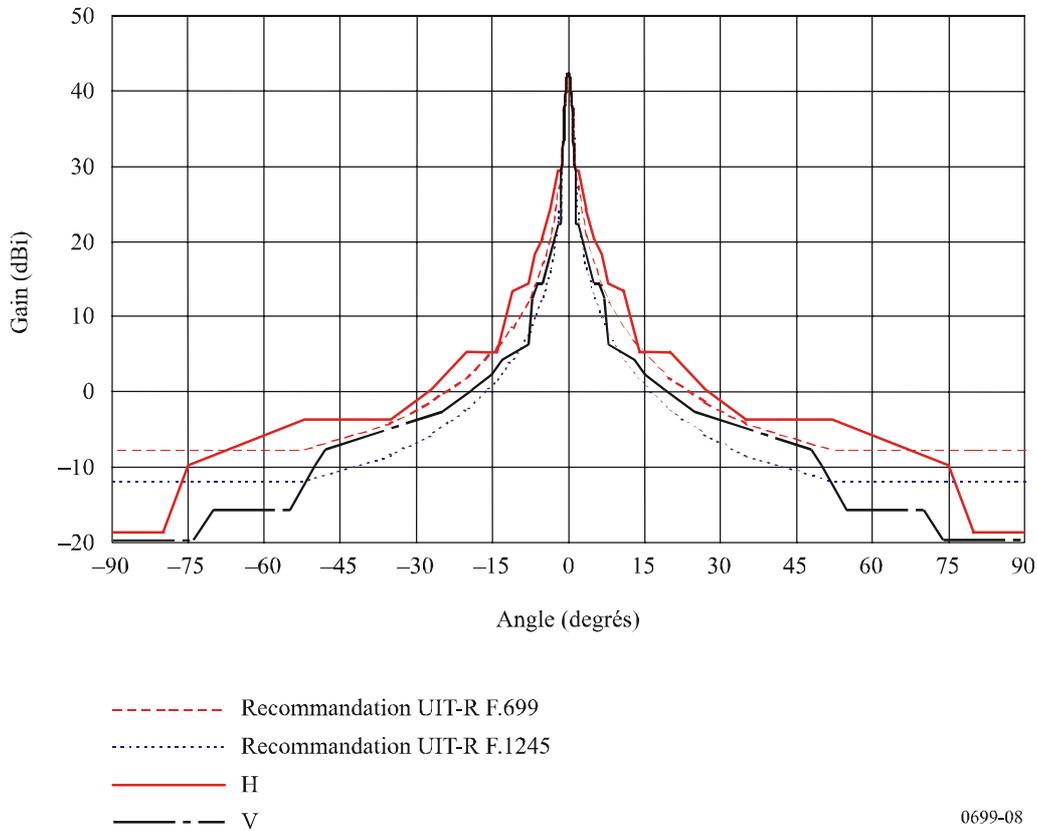
Diagramme de rayonnement pour une antenne de point à point de 0,3 m de diamètre utilisée dans la bande de 31 GHz ($D/\lambda = 32$; gain = 36,9 dBi) (H: polarisation horizontale, V: polarisation verticale)



- Recommendation UIT-R F.699
- Recommendation UIT-R F.1245
- H
- V

FIGURE 8

Diagramme de rayonnement pour une antenne point à point de 0,3 m de diamètre
utilisée dans la bande de 55 GHz ($D/\lambda = 57$; gain = 42,4 dBi)
(H: polarisation horizontale, V: polarisation verticale)



Annexe 2

Informations sur l'application du point 7 du *recommande*

1 Introduction

On trouvera ci-après des Figures et des exemples chiffrés dont l'objet est d'illustrer les paramètres utilisés dans l'équation figurant au point 7.1 du *recommande*.

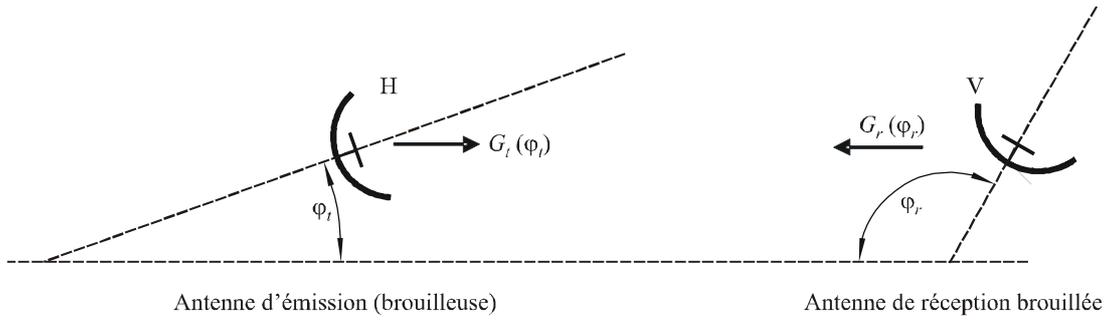
Une variante de cette équation (voir le § 4) peut être utilisée, si des données de gain d'antenne relatif sont disponibles.

Dans le cas du calcul d'un gain mutuel entre des antennes copolaires, il convient d'utiliser la variante de l'équation indiquée au § 5.

2 Situation

FIGURE 9

Exemple générique de situation et d'orientation d'une antenne d'émission et d'une antenne de réception brouillée

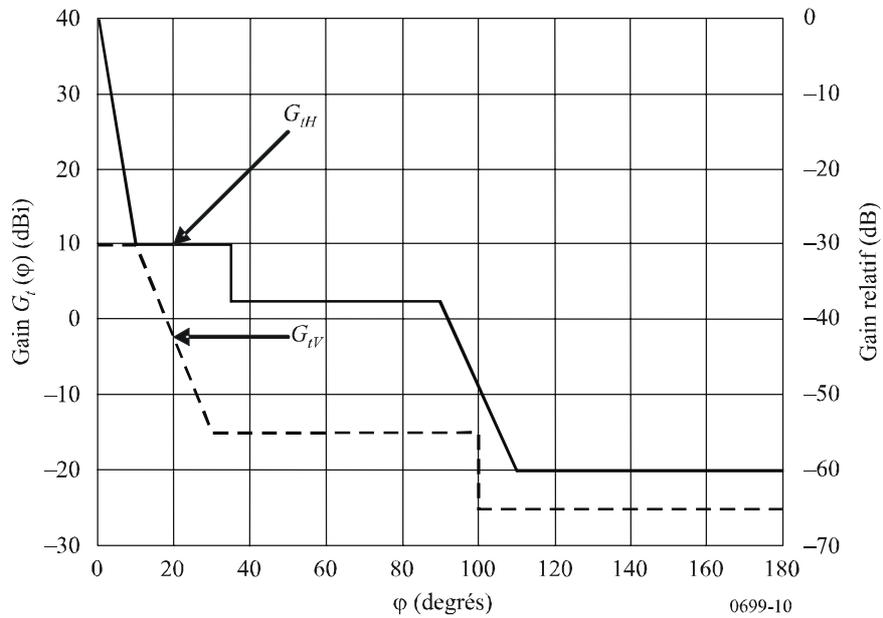


0699-09

3 Exemple chiffré

FIGURE 10

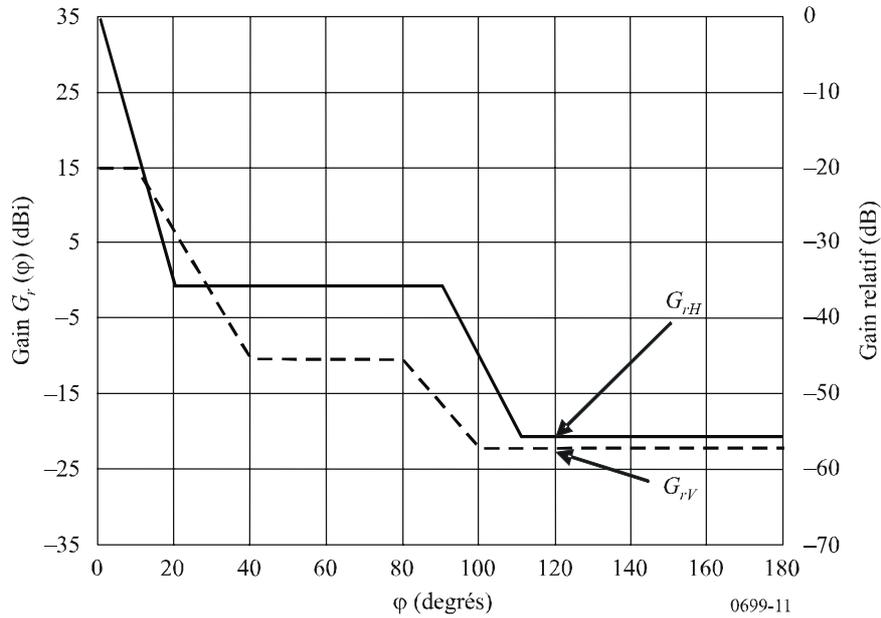
Exemple d'un gabarit d'antenne d'émission pour une copolarisation et une polarisation croisée



0699-10

FIGURE 11

Exemple de gabarit d'antenne de réception pour une copolarisation et une polarisation croisée



L'exemple concernant les antennes à polarisation croisée est donné ci-après.

Sur la base des Fig. 9, 10 et 11, on obtient les valeurs suivantes:

$$\begin{aligned} \varphi_t &= 20^\circ \\ \varphi_r &= 120^\circ \\ G_{tH}(\varphi_t) &= 10 \text{ dBi} \\ G_{rV}(\varphi_r) &= -22 \text{ dBi} \\ G_{tV}(\varphi_t) &= -2 \text{ dBi} \\ G_{rH}(\varphi_r) &= -20 \text{ dBi} \end{aligned}$$

L'utilisation des ces valeurs dans l'équation donne le résultat suivant:

$$G_t(20^\circ) + G_r(120^\circ) = -11,6 \quad \text{dBi}$$

En vertu du théorème de la réciprocité, le résultat du calcul d'un gain mutuel est le même si l'on intervertit l'antenne d'émission et l'antenne de réception.

4 Variante de l'équation à appliquer en cas de polarisation croisée

Dans le cas où les valeurs G_{tmax} , et G_{rmax} ainsi que le gain relatif des lobes latéraux sont disponibles (tels qu'ils sont indiqués sur l'échelle de droite des Fig. 10 et 11), l'équation ci-après est applicable:

$$G_t(\varphi_t) + G_r(\varphi_r) = G_{tmax} + G_{rmax} + 10 \cdot \log \left(10^{\frac{G_{tH}(\varphi_t) + G_{rV}(\varphi_r)}{10}} + 10^{\frac{G_{tV}(\varphi_t) + G_{rH}(\varphi_r)}{10}} \right) \quad \text{dBi}$$

Dans cette équation, les valeurs G_{tmax} et G_{rmax} ainsi que le résultat sont donnés en dBi, mais le gain relatif des lobes latéraux est exprimé en dB.

5 Variante de l'équation en cas de copolarisation

Si les deux antennes sont copolaires, les valeurs devraient être modifiées en conséquence et l'équation sera la suivante:

$$G_t(\varphi_t) + G_r(\varphi_r) = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{G_{tH}(\varphi_t) + G_{rH}(\varphi_r)}{10}} + 10^{\frac{G_{tV}(\varphi_t) + G_{rV}(\varphi_r)}{10}} \right) \quad \text{dBi}$$

Cet exemple chiffré donne, en cas de copolarisation, un gain commun de $-9,8$ dBi avec les mêmes antennes que celles utilisées ci-dessus (Fig. 10 et 11).
