

RECOMMANDATION UIT-R S.1555

**Niveaux de brouillage cumulatif entre réseaux du service fixe par satellite
à satellite géostationnaire faiblement espacés utilisant une
polarisation circulaire double et rectiligne double
et fonctionnant dans les bandes des 6/4 GHz**

(Questions UIT-R 230/4 et 42/4)

(2002)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que dans les bandes des 6/4 GHz, différents réseaux opérationnels du service fixe par satellite (SFS) à satellite géostationnaire utilisent aussi bien la polarisation circulaire double que la polarisation rectiligne double et que cette situation va vraisemblablement se poursuivre compte tenu de l'infrastructure existante dans ces réseaux;
- b) que ces bandes étant beaucoup utilisées, des réseaux fonctionnant sur la même fréquence et assurant la même couverture doivent être exploités avec un espacement orbital relativement faible;
- c) que les Recommandations de l'UIT-R en vigueur et l'Appendice 8 du Règlement des radiocommunications (RR) ne concernent que les brouillages monosource entre réseaux à satellite adjacents et traitent séparément le signal brouilleur pour chaque type de polarisation;
- d) qu'il importe pendant la coordination de pouvoir déterminer l'incidence globale des brouillages imputables aux satellites adjacents en raison de l'utilisation simultanée des deux polarisations orthogonales dans chacun de ces réseaux, que les deux réseaux utilisent le même type de polarisation (polarisation circulaire tous les deux ou polarisation rectiligne tous les deux) ou différents types de polarisation (un réseau utilise la polarisation circulaire et l'autre la polarisation rectiligne);
- e) que les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouillé et/ou du réseau brouilleur peuvent être égales ou non,

recommande

1 que, compte tenu des informations techniques figurant dans les Annexes 1, 2 et 3, le brouillage cumulatif entre réseaux à satellite adjacents faiblement espacés (espacement orbital inférieur à 6°) fonctionnant dans les bandes des 6/4 GHz utilisant différents types de polarisation (polarisation circulaire dans un réseau et polarisation rectiligne dans l'autre) soit considéré comme identique à celui que l'on observerait si les deux réseaux utilisaient les mêmes types de polarisation (c'est-à-dire tous les deux la polarisation rectiligne ou tous les deux la polarisation circulaire), dans les cas suivants:

- lorsque ces réseaux utilisent simultanément les deux polarisations orthogonales en fonctionnant sur la même fréquence et en assurant la même couverture et que les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouillé et du réseau brouilleur sont égales; ou
- lorsque les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouillé sont inégales et que les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouilleur sont égales;

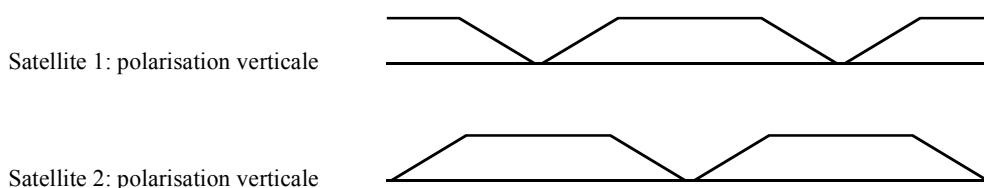
2 que, compte tenu des informations techniques figurant dans l'Annexe 3, lorsque les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouilleur sont inégales, le brouillage cumulatif entre réseaux à satellite adjacents faiblement espacés (espacement orbital jusqu'à 6°) fonctionnant dans les bandes des 6/4 GHz utilisant différents types de polarisation (polarisation circulaire dans un réseau et polarisation rectiligne dans l'autre) soit considéré comme identique à celui que l'on observerait si les deux réseaux utilisaient les mêmes types de polarisation (c'est-à-dire tous les deux la polarisation rectiligne ou tous les deux la polarisation circulaire), dans les cas suivants:

- lorsque ces réseaux utilisent simultanément les deux polarisations orthogonales en fonctionnant sur la même fréquence et en assurant la même couverture;
- lorsque l'on procède à une réduction supplémentaire de l'intensité des deux signaux à polarisation orthogonale en liaison descendante du réseau utilisant la polarisation circulaire ou à une réduction supplémentaire de l'intensité du signal en liaison descendante ayant la plus forte intensité du réseau utilisant la polarisation circulaire;

3 d'utiliser les informations techniques figurant dans l'Annexe 1 pour déterminer la réduction supplémentaire à appliquer à l'intensité des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau utilisant la polarisation circulaire lorsque ces réseaux utilisent simultanément les deux polarisations orthogonales tout en fonctionnant sur la même fréquence et en assurant la même couverture et que les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouilleur sont inégales.

NOTE 1 – Lorsque le réseau utile utilise des polarisations rectilignes doubles avec des intensités égales pour les deux signaux à polarisation orthogonale et que le réseau adjacent utilise des polarisations doubles avec un écart important entre les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale (c'est-à-dire de plus de 10 dB) l'environnement de brouillage diffèrera selon que le satellite adjacent utilise la polarisation circulaire ou la polarisation rectiligne. Lorsque la polarisation rectiligne est utilisée, le brouillage causé au réseau utile affectera essentiellement une polarisation (verticale ou horizontale). Lorsque la polarisation circulaire est utilisée, le brouillage causé au réseau utile affectera les deux polarisations mais à un degré moindre par rapport au cas précédent.

NOTE 2 – Lorsque le réseau utile et le réseau brouilleur utilisent des plans de répartition des canaux décalés entre eux et leur densité spectrale à l'émission est particulièrement forte dans la partie centrale de la largeur de bande occupée du répéteur (TV/MF analogique), on a avantage à avoir des satellites adjacents qui utilisent la même polarisation (rectiligne double ou circulaire double). Dans ces conditions, l'énergie du signal au centre du canal se trouve dans la bande de garde du canal du réseau adjacent ayant la même polarisation. La Figure ci-après illustre des plans de répartition des canaux pour une des polarisations dans chaque satellite adjacent. L'espacement angulaire des satellites ainsi que l'espacement en fréquence des porteuses permettent de réduire le brouillage causé par le satellite adjacent grâce au filtrage des canaux à même polarisation des satellites adjacents.



ANNEXE 1

Brouillage entre réseaux à satellite faiblement espacés utilisant une polarisation circulaire double et rectiligne double et fonctionnant dans les bandes des 6/4 GHz**Résumé**

La présente Annexe traite du problème du brouillage cumulatif entre réseaux à satellite faiblement espacés (espacement orbital jusqu'à 6°) fonctionnant dans les bandes des 6/4 GHz lorsque ces réseaux utilisent des types de polarisation différents (c'est-à-dire polarisation circulaire dans un réseau et polarisation rectiligne dans l'autre) et simultanément deux polarisations orthogonales tout en fonctionnant sur une même fréquence et en assurant la même couverture. Elle donne l'expression générale des équations qui ont été utilisées pour effectuer les analyses.

Elle donne également les principaux résultats d'une analyse de l'incidence sur les niveaux de brouillage cumulatif de satellites adjacents lorsque des satellites voisins fonctionnant dans les bandes des 6/4 GHz utilisent des types de polarisation différents (rectiligne/circulaire), et que les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouilleur et du réseau brouillé sont égales. On suppose en outre que le réseau brouilleur et le réseau brouillé exploitent le même type de porteuses sur la même fréquence. On compare les niveaux de brouillage observés dans ces situations et ceux observés lorsque les réseaux à satellite utilisent le même type de polarisation, c'est-à-dire lorsque tous les deux utilisent une polarisation rectiligne double ou une polarisation circulaire double. La conclusion est que, dans ce cas, pour des valeurs concrètes du découplage par polarisations croisées (XPD, *cross-polar discrimination*) pour la station de satellite et la station terrienne, le brouillage supplémentaire en valeur absolue pour le cas le plus défavorable par rapport au cas optimal où les deux réseaux utiliseraient le même type de polarisation et seraient parfaitement alignés, est inférieur à 0,5 dB approximativement en liaison descendante et à 1,5 dB approximativement en liaison montante. Le brouillage s'explique essentiellement par les diagrammes copolaire et contrapolaire hors axe de l'antenne de la station terrienne. L'analyse correspond au cas le plus défavorable et utilise des gabarits d'enveloppe simples pour représenter les caractéristiques d'antenne de la station terrienne. Dans la pratique, il est très peu probable d'observer simultanément les conditions correspondant au cas le plus défavorable dans le domaine copolaire et contrapolaire de chacun des deux signaux polarisés transmis par l'antenne de la station terrienne.

1 Introduction

Les satellites exploités dans les bandes des 6/4 GHz fonctionnent sur une même fréquence et assurent la même zone de couverture le long de l'arc géostationnaire pour un espacement orbital entre satellites adjacents faible, en général compris entre 2° et 6°. Pour effectuer la coordination entre ces réseaux on suppose souvent qu'ils utilisent la même polarisation, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de découplage de polarisation, par exemple lorsque les deux réseaux utilisent une polarisation rectiligne orthogonale double ou circulaire orthogonale double.

Il y a des cas où l'on observe un certain découplage de polarisation entre les réseaux adjacents, par exemple lorsqu'ils utilisent une polarisation de même type mais de sens opposé (polarisation verticale et polarisation horizontale ou polarisation dextrogyre et polarisation lévogyre). Avec un XPD de l'antenne du satellite de l'ordre de 30 dB, le gain contrapolaire hors axe de l'antenne de la station terrienne sera, dans ce cas, l'effet contrapolaire dominant et c'est de cet effet que dépend essentiellement le brouillage contrapolaire entre deux réseaux à satellite adjacents qu'ils fonctionnent avec une polarisation rectiligne ou circulaire.

Une autre situation peut se produire, celle dans laquelle des réseaux à satellite adjacents utilisent des types de polarisation différents (polarisation circulaire dans un réseau et polarisation rectiligne dans l'autre). C'est une situation fréquente avec les réseaux fonctionnant dans les bandes des 6/4 GHz, bandes dans lesquelles les choix de polarisation faits il y a des décennies (polarisation circulaire/polarisation rectiligne) sont encore maintenus dans les réseaux opérationnels d'aujourd'hui et elle va vraisemblablement se poursuivre compte tenu des investissements d'infrastructure considérables qui ont été faits dans ces réseaux. Le découplage de polarisation hors axe entre ces réseaux dans ces cas a été étudié mais il a été tenu compte d'une seule polarisation à la fois¹. Le § 2.2.3 de l'Appendice 8 du RR donne des indications aux administrations en ce qui concerne le découplage de polarisation entre un signal brouilleur à polarisation circulaire et un signal utile à polarisation rectiligne (ou vice versa) et recommande un facteur de discrimination de polarisation (rapport numérique) de 1,4 (soit 1,46 dB) pour le cas le plus défavorable comme valeur d'enveloppe pour toutes les gammes d'espacements orbitaux.

La situation qui n'a pas été suffisamment étudiée et qui fait l'objet de la présente Recommandation est celle dans laquelle le réseau brouilleur utilise les deux sens de polarisation (polarisation circulaire ou polarisation rectiligne) et où le réseau utile utilise l'autre type de polarisation (polarisation rectiligne ou polarisation circulaire, respectivement). Dans ce cas, il importe pendant la coordination de calculer le brouillage cumulatif résultant de l'effet conjugué des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouilleur. C'est en fait le cas que l'on observe concrètement dans la plupart des situations avec les réseaux à satellite actuellement opérationnels où les deux utilisent une polarisation orthogonale double pour des raisons d'efficacité spectrale.

2 Equations vectorielles génériques

La présente section récapitule les formules générales des équations à utiliser pour évaluer le couplage des deux composantes de polarisation du réseau brouilleur avec une composante de polarisation du réseau brouillé. Les équations sont données pour chaque cas de brouillage possible (polarisation circulaire/polarisation rectiligne, polarisation rectiligne/polarisation circulaire, polarisation rectiligne/polarisation rectiligne).

2.1 Brouillage causé par un système d'antenne à polarisation circulaire à un système d'antenne à polarisation rectiligne

Dans le présent paragraphe on calcule tout d'abord les expressions générales pour le couplage des deux sens de polarisation circulaire avec une antenne à polarisation rectiligne. On considère ensuite les deux cas particuliers suivants:

- Un satellite à polarisation circulaire double illumine une station terrienne à polarisation rectiligne.
- Une station terrienne à polarisation circulaire double illumine un satellite à polarisation rectiligne.

Le champ incident mesuré à l'emplacement de l'antenne de réception est, pour chaque sens de polarisation de l'antenne d'émission, à polarisation circulaire:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_R &= e_R \left[\frac{\mathbf{h} - j\mathbf{v}}{\sqrt{2}} \right] + e_{RX} \left[\frac{\mathbf{h} + j\mathbf{v}}{\sqrt{2}} \right] e^{j\delta_R} \\ \mathbf{e}_L &= e_L \left[\frac{\mathbf{h} + j\mathbf{v}}{\sqrt{2}} \right] + e_{LX} \left[\frac{\mathbf{h} - j\mathbf{v}}{\sqrt{2}} \right] e^{j\delta_L} \end{aligned} \quad (1)$$

¹ Voir les Rapports 555 et 1141 de l'ex-CCIR ainsi que la Recommandation UIT-R S.736.

où:

- $\mathbf{e}_R, \mathbf{e}_L$: vecteurs champ électrique incident pour les signaux à polarisation circulaire dextrogyre et à polarisation circulaire lévogyre
- e_R, e_{RX} : amplitudes du champ copolaire et du champ contrapolaire du signal à polarisation circulaire dextrogyre
- e_L, e_{LX} : amplitudes du champ copolaire et du champ contrapolaire du signal à polarisation circulaire lévogyre
- $\mathbf{h}, \mathbf{v}$: vecteurs unité horizontal et vertical à l'emplacement de l'antenne de réception
- δ_R, δ_L : phases inconnues du champ contrapolaire par rapport au champ copolaire pour les signaux à polarisation circulaire dextrogyre et lévogyre².

Chaque borne de l'antenne de réception du signal à polarisation rectiligne peut être caractérisée par une longueur équivalente³, c'est-à-dire pour les bornes de polarisation horizontale et verticale:

$$\begin{aligned}\mathbf{h}_h &= \sqrt{g} \mathbf{h} + \sqrt{g_x} \mathbf{v} e^{j\delta} \\ \mathbf{h}_v &= \sqrt{g} \mathbf{v} + \sqrt{g_x} \mathbf{h} e^{j\delta}\end{aligned}\quad (2)$$

où:

- g, g_x : proportionnels au gain copolaire et au gain contrapolaire de l'antenne de réception
- $\mathbf{h}, \mathbf{v}$: vecteurs unité horizontal et vertical à l'emplacement de l'antenne de réception
- δ : phase inconnue de la tension contrapolaire par rapport à la tension copolaire mesurée à une borne de réception de l'antenne à polarisation rectiligne.

Les valeurs effectives de g , g_x et δ seront, en général, différentes pour les deux bornes de l'antenne de réception même si le brouillage pour le cas le plus défavorable (en utilisant les gabarits de gain et la valeur appropriée pour δ) est le même pour les deux bornes de l'antenne. On analyse ici le brouillage cumulatif pour une seule borne de l'antenne de réception à chaque fois. Les tensions reçues pour les deux signaux incidents (équation (1)) mesurées à la borne de réception du signal à polarisation horizontale sont donc les suivantes:

$$\begin{aligned}v_{Rh} &= \mathbf{h}_h \cdot \mathbf{e}_R \\ &= \sqrt{\frac{g}{2}} e_R + \sqrt{\frac{g}{2}} e_{RX} e^{j\delta_R} - j\sqrt{\frac{g_x}{2}} e_R e^{j\delta} + j\sqrt{\frac{g_x}{2}} e_{RX} e^{j(\delta + \delta_R)}\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}v_{Lh} &= \mathbf{h}_h \cdot \mathbf{e}_L \\ &= \sqrt{\frac{g}{2}} e_L + \sqrt{\frac{g}{2}} e_{LX} e^{j\delta_L} + j\sqrt{\frac{g_x}{2}} e_L e^{j\delta} - j\sqrt{\frac{g_x}{2}} e_{LX} e^{j(\delta + \delta_L)}\end{aligned}\quad (4)$$

² Comme dans la plupart des analyses d'antenne on suppose des porteuses simples avec un facteur temps $e^{j\omega t}$. On suppose qu'il n'y a pas de corrélation entre la porteuse et le signal dans un sens de la polarisation et la porteuse et le signal dans l'autre sens de polarisation.

³ Le concept de longueur équivalente s'appliquait à l'origine à des antennes doublets et à la polarisation rectiligne. Au fil des ans, son application a été élargie à tous les types de polarisation et à des antennes d'utilisation plus répandue. La longueur équivalente d'une antenne peut être définie comme un vecteur complexe de telle sorte que la tension reçue en circuit ouvert est le produit scalaire du vecteur longueur équivalente $\mathbf{h}$ et du vecteur champ électrique incident $\mathbf{e}$, c'est-à-dire $v_{oc} = \mathbf{h} \cdot \mathbf{e}$.

La puissance mesurée à la borne de réception d'un signal à polarisation horizontale est proportionnelle à la somme des carrés des tensions, les deux signaux n'étant, par hypothèse, pas corrélés. Le dernier terme de droite des équations (3) et (4) est le produit de la polarisation croisée des deux antennes et aura donc la plus petite valeur pour des valeurs réelles des caractéristiques de polarisation croisée. Par conséquent, certains des termes résultant de l'élévation au carré des équations (3) et (4) ont une valeur si petite qu'ils peuvent être ignorés; il s'agit des termes qui font intervenir le produit du dernier terme et de l'un des autres termes à l'exception du premier. En simplifiant de la sorte, la puissance mesurée à la borne de réception du signal à polarisation horizontale est proportionnelle à:

$$\begin{aligned} |v_{Rh}|^2 + |v_{Lh}|^2 = & \frac{g}{2} (e_R^2 + e_L^2 + e_{RX}^2 + e_{LX}^2) + \frac{g_x}{2} (e_R^2 + e_L^2) + \\ & g(e_R e_{RX} \cos \delta_R + e_L e_{LX} \cos \delta_L) + \sqrt{gg_x} (e_R^2 - e_L^2) \sin \delta - \\ & 2\sqrt{gg_x} (e_R e_{RX} \sin \delta_R - e_L e_{LX} \sin \delta_L) \cos \delta \end{aligned} \quad (5)$$

De même, la puissance mesurée à la borne de réception du signal à polarisation verticale est proportionnelle à:

$$\begin{aligned} |v_{Rv}|^2 + |v_{Lv}|^2 = & \frac{g}{2} (e_R^2 + e_L^2 + e_{RX}^2 + e_{LX}^2) + \frac{g_x}{2} (e_R^2 + e_L^2) - \\ & g(e_R e_{RX} \cos \delta_R + e_L e_{LX} \cos \delta_L) - \sqrt{gg_x} (e_R^2 - e_L^2) \sin \delta - \\ & 2\sqrt{gg_x} (e_R e_{RX} \sin \delta_R - e_L e_{LX} \sin \delta_L) \cos \delta \end{aligned} \quad (6)$$

2.2 Brouillage causé par un système d'antenne à polarisation rectiligne à un système d'antenne à polarisation circulaire

Le scénario opposé est examiné dans le présent paragraphe. On calcule les expressions générales pour le couplage des deux polarisations rectilignes orthogonales avec une antenne à polarisation circulaire et on considère les deux cas particuliers suivants:

- Un satellite à polarisation rectiligne double illumine une station terrienne à polarisation circulaire.
- Une station terrienne à polarisation rectiligne double illumine un satellite à polarisation circulaire.

Le champ incident mesuré à l'emplacement de la station de réception est pour chaque sens de polarisation de l'antenne d'émission à polarisation rectiligne:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_H &= e_H \mathbf{h} + e_{HX} \mathbf{v} e^{j\delta_H} \\ \mathbf{e}_V &= e_V \mathbf{v} + e_{VX} \mathbf{h} e^{j\delta_V} \end{aligned} \quad (7)$$

où:

- $\mathbf{e}_H, \mathbf{e}_V$: vecteurs champ électrique incident pour les signaux à polarisation horizontale et à polarisation verticale
- e_H, e_{HX} : amplitudes du champ copolaire et du champ contrapolaire du signal à polarisation horizontale
- e_V, e_{VX} : amplitudes du champ copolaire et du champ contrapolaire du signal à polarisation verticale
- $\mathbf{h}, \mathbf{v}$: vecteurs unité horizontal et vertical à l'emplacement de l'antenne de réception
- δ_H, δ_V : phases inconnues du champ contrapolaire par rapport au champ copolaire pour les signaux à polarisation verticale et à polarisation horizontale.

Les bornes de réception du signal à polarisation circulaire dextrogyre et lévogyre sont caractérisées par les longueurs équivalentes suivantes:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_r &= \sqrt{g} \frac{\mathbf{h} + j \mathbf{v}}{\sqrt{2}} + \sqrt{g_x} \frac{\mathbf{h} - j \mathbf{v}}{\sqrt{2}} e^{j\delta} \\ \mathbf{h}_l &= \sqrt{g} \frac{\mathbf{h} - j \mathbf{v}}{\sqrt{2}} + \sqrt{g_x} \frac{\mathbf{h} + j \mathbf{v}}{\sqrt{2}} e^{j\delta} \end{aligned} \quad (8)$$

où:

- g, g_x : proportionnels au gain copolaire et au gain contrapolaire de l'antenne de réception
- $\mathbf{h}, \mathbf{v}$: vecteurs unité horizontal et vertical à l'emplacement de l'antenne de réception
- δ : phase inconnue de la tension contrapolaire par rapport à la tension copolaire mesurée à une borne de réception de l'antenne à polarisation circulaire.

Les tensions mesurées à la borne de réception des deux signaux incidents (équation (7)) à polarisation circulaire dextrogyre sont les suivantes:

$$\begin{aligned} v_{Hr} &= \mathbf{h}_r \cdot \mathbf{e}_H \\ &= \sqrt{\frac{g}{2}} e_H + j \sqrt{\frac{g}{2}} e_{HX} e^{j\delta_H} + \sqrt{\frac{g_x}{2}} e_H e^{j\delta} - j \sqrt{\frac{g_x}{2}} e_{HX} e^{j(\delta + \delta_H)} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} v_{Vr} &= \mathbf{h}_r \cdot \mathbf{e}_V \\ &= j \sqrt{\frac{g}{2}} e_V + \sqrt{\frac{g}{2}} e_{VX} e^{j\delta_V} - j \sqrt{\frac{g_x}{2}} e_V e^{j\delta} + \sqrt{\frac{g_x}{2}} e_{VX} e^{j(\delta + \delta_V)} \end{aligned} \quad (10)$$

La puissance mesurée à la borne de réception du signal à polarisation circulaire dextrogyre est proportionnelle à la somme des carrés des tensions (en négligeant les termes de polarisation croisée d'ordre supérieur à deux):

$$\begin{aligned} |v_{Hr}|^2 + |v_{Vr}|^2 &= \frac{g}{2} (e_H^2 + e_V^2 + e_{HX}^2 + e_{VX}^2) + \frac{g_x}{2} (e_H^2 + e_V^2) - \\ &\quad g(e_H e_{HX} \sin \delta_H - e_V e_{VX} \sin \delta_V) + \sqrt{gg_x} (e_H^2 - e_V^2) \cos \delta + \\ &\quad 2\sqrt{gg_x} (e_H e_{HX} \cos \delta_H + e_V e_{VX} \cos \delta_V) \sin \delta \end{aligned} \quad (11)$$

De même la puissance mesurée à la borne de réception d'un signal à polarisation circulaire lévogyre est proportionnelle à:

$$\begin{aligned} |v_{Hl}|^2 + |v_{Vl}|^2 &= \frac{g}{2} (e_H^2 + e_V^2 + e_{HX}^2 + e_{VX}^2) + \frac{g_x}{2} (e_H^2 + e_V^2) + \\ &\quad g(e_H e_{HX} \sin \delta_H - e_V e_{VX} \sin \delta_V) + \sqrt{gg_x} (e_H^2 - e_V^2) \cos \delta - \\ &\quad 2\sqrt{gg_x} (e_H e_{HX} \cos \delta_H + e_V e_{VX} \cos \delta_V) \sin \delta \end{aligned} \quad (12)$$

2.3 Brouillage causé par un système d'antenne à polarisation rectiligne à un système d'antenne à polarisation rectiligne

On examine dans le présent paragraphe le brouillage entre deux systèmes à polarisation rectiligne double qui peuvent avoir des angles d'alignement de polarisation différents⁴. On calcule les expressions pour les cas suivants:

- Un satellite à polarisation rectiligne double qui illumine une station terrienne à polarisation rectiligne.
- Une station terrienne à polarisation rectiligne double qui illumine un satellite à polarisation rectiligne.

Le champ incident mesuré à l'emplacement de la station de réception est pour chaque sens de polarisation de l'antenne d'émission à polarisation rectiligne:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_H &= e_H (\cos \psi \mathbf{h} + \sin \psi \mathbf{v}) + e_{HX} (-\sin \psi \mathbf{h} + \cos \psi \mathbf{v}) e^{j\delta_H} \\ \mathbf{e}_V &= e_V (-\sin \psi \mathbf{h} + \cos \psi \mathbf{v}) + e_{VX} (\cos \psi \mathbf{h} + \sin \psi \mathbf{v}) e^{j\delta_V} \end{aligned} \quad (13)$$

où:

- $\mathbf{e}_H, \mathbf{e}_V$: vecteurs champ électrique incident pour les signaux à polarisation horizontale et à polarisation verticale
- e_H, e_{HX} : amplitudes du champ copolaire et du champ contrapolaire du signal à polarisation horizontale
- e_V, e_{VX} : amplitudes du champ copolaire et du champ contrapolaire du signal à polarisation verticale
- $\mathbf{h}, \mathbf{v}$: vecteurs unité horizontal et vertical à l'emplacement de l'antenne de réception
- ψ : différence angulaire de polarisation entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception
- δ_H, δ_V : phases inconnues du champ contrapolaire par rapport au champ copolaire pour les signaux à polarisation horizontale et à polarisation verticale.

L'équation (2) donne les propriétés des bornes de réception des signaux à polarisation verticale et à polarisation horizontale. Les tensions mesurées à la borne de réception des deux signaux incidents (équation (13)) à polarisation horizontale sont les suivantes:

$$\begin{aligned} v_{Hh} &= \mathbf{h}_h \cdot \mathbf{e}_H \\ &= \sqrt{g} e_H \cos \psi - \sqrt{g} e_{HX} \sin \psi e^{j\delta_H} + \sqrt{g_x} e_H \sin \psi e^{j\delta} + \sqrt{g_x} e_{HX} \cos \psi e^{j(\delta + \delta_H)} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} v_{Vh} &= \mathbf{h}_h \cdot \mathbf{e}_V \\ &= -\sqrt{g} e_V \sin \psi + \sqrt{g} e_{VX} \cos \psi e^{j\delta_V} + \sqrt{g_x} e_V \cos \psi e^{j\delta} + \sqrt{g_x} e_{VX} \sin \psi e^{j(\delta + \delta_V)} \end{aligned} \quad (15)$$

La puissance mesurée à la borne de réception du signal à polarisation horizontale est proportionnelle à la somme des carrés des tensions (en négligeant les produits de polarisation croisée d'ordre supérieur à deux),

⁴ Des satellites ayant le même alignement de polarisation, par exemple défini par le plan équatorial mais fonctionnant depuis des positions différentes le long de l'arc géostationnaire paraîtront avoir, pour une station terrienne, des orientations de polarisation légèrement différentes. Pour les portions de l'arc géostationnaire de moins de $\pm 6^\circ$ environ, la différence d'alignement de polarisation par rapport au satellite central sera inférieure à environ 1° .

$$\begin{aligned}
|v_{Hh}|^2 + |v_{Vh}|^2 = & g(e_H^2 \cos^2 \psi + e_V^2 \sin^2 \psi + e_{HX}^2 \sin^2 \psi + e_{VX}^2 \cos^2 \psi) + g_x(e_H^2 \sin^2 \psi + e_V^2 \cos^2 \psi) - \\
& g \sin 2\psi(e_H e_{HX} \cos \delta_H + e_V e_{VX} \cos \delta_V) + \sqrt{gg_x} \sin 2\psi(e_H^2 - e_V^2) \cos \delta + \\
& 2\sqrt{gg_x} \cos^2 \psi(e_H e_{HX} \cos(\delta + \delta_H) + e_V e_{VX} \cos(\delta - \delta_V)) - \\
& 2\sqrt{gg_x} \sin^2 \psi(e_H e_{HX} \cos(\delta - \delta_H) + e_V e_{VX} \cos(\delta + \delta_V))
\end{aligned} \tag{16}$$

De même, la puissance mesurée à la borne de réception d'un signal à polarisation verticale est proportionnelle à:

$$\begin{aligned}
|v_{Hh}|^2 + |v_{Vh}|^2 = & g(e_H^2 \sin^2 \psi + e_V^2 \cos^2 \psi + e_{HX}^2 \cos^2 \psi + e_{VX}^2 \sin^2 \psi) + g_x(e_H^2 \cos^2 \psi + e_V^2 \sin^2 \psi) - \\
& g \sin 2\psi(e_H e_{HX} \cos \delta_H + e_V e_{VX} \cos \delta_V) + \sqrt{gg_x} \sin 2\psi(e_H^2 - e_V^2) \cos \delta + \\
& 2\sqrt{gg_x} \sin^2 \psi(e_H e_{HX} \cos(\delta + \delta_H) + e_V e_{VX} \cos(\delta - \delta_V)) - \\
& 2\sqrt{gg_x} \cos^2 \psi(e_H e_{HX} \cos(\delta - \delta_H) + e_V e_{VX} \cos(\delta + \delta_V))
\end{aligned} \tag{17}$$

3 Résumé de l'analyse en liaison descendante et en liaison montante pour des signaux brouilleurs à polarisation double d'égale intensité

L'analyse décrite dans la présente Annexe est basée sur un traitement rigoureux du champ aux bornes de sortie d'une antenne de réception de signaux à polarisation double (polarisation rectiligne ou polarisation circulaire) avec une représentation complète des deux composantes à polarisation orthogonale du signal incident (polarisation circulaire ou polarisation rectiligne). Cette analyse s'applique aussi bien au trajet de transmission en liaison montante qu'au trajet de transmission en liaison descendante. Dans la présente Annexe, on suppose que les intensités des deux signaux brouilleurs à polarisation orthogonale sont égales.

On utilise dans cette analyse les équations vectorielles génériques données au § 2 et les versions pour la liaison montante et la liaison descendante sont des versions simplifiées. On a utilisé différentes combinaisons des angles de phase inconnus, δ_R , δ_L , δ_H , δ_V et δ pour calculer les résultats correspondant au cas le plus défavorable, au cas moyen et au cas optimal. Des analyses succinctes distinctes sont données pour les configurations suivantes (liaison montante et liaison descendante):

- un réseau à polarisation circulaire double brouille un réseau à polarisation rectiligne;
- un réseau à polarisation rectiligne double brouille un réseau à polarisation circulaire;
- un réseau à polarisation rectiligne double brouille un réseau à polarisation rectiligne.

Après avoir traité le cas d'un réseau à polarisation circulaire brouillant un réseau à polarisation rectiligne, on passe au cas inverse, c'est-à-dire celui d'un réseau à polarisation rectiligne brouillant un réseau à polarisation circulaire.

Un objectif important de l'analyse est de bien comprendre l'incidence relative de l'utilisation de types de polarisation différents dans des satellites adjacents (polarisation circulaire dans un réseau et rectiligne dans l'autre) par rapport au cas où les deux réseaux utilisent le même type de polarisation (polarisation circulaire dans les deux réseaux ou polarisation rectiligne dans les deux réseaux). Les résultats sont donc présentés sous forme d'un différentiel Δ comparé au cas où les deux réseaux utilisent la même polarisation. Pour obtenir une véritable comparaison, on utilise le même type d'analyse pour déterminer la situation de référence dans laquelle les réseaux adjacents utilisent tous les deux la polarisation rectiligne.

Les résultats de la comparaison sont présentés dans le § 5 de la présente Annexe. Ils indiquent les niveaux de brouillage pour le cas le plus défavorable qui résultent de combinaisons particulières des angles de phase relatifs inconnus δ_R , δ_L , δ_H , δ_V et δ . Ces niveaux de brouillage sont rapportés au cas fréquent où les signaux copolaire et contrapolaire ne sont pas, par hypothèse, corrélés, et sont donc additionnés en puissance pour obtenir le niveau de brouillage cumulatif (ou niveau moyen). Il

en résulte une différence comprise entre 0,05 dB et 0,47 dB entre l'analyse rigoureuse du brouillage pour le cas le plus défavorable entre réseaux adjacents utilisant une polarisation rectiligne et la méthode simpliste de sommation des puissances. Il convient d'en tenir compte lorsqu'on évalue l'incidence globale du brouillage causé par des réseaux utilisant la polarisation circulaire à des réseaux adjacents utilisant la polarisation rectiligne (et vice versa). La méthode simple de sommation des puissances permettra d'obtenir un niveau de brouillage moyen, lequel est indépendant du type de polarisation utilisée par les réseaux. L'écart maximal possible du niveau de brouillage entre le cas le plus défavorable et le cas moyen est légèrement plus important lorsque les deux réseaux adjacents utilisent des types de polarisation différents que lorsqu'ils utilisent le même type de polarisation.

Il ressort de cette analyse que, lorsque les intensités des deux signaux brouilleurs à polarisation orthogonale sont supposées être égales, le brouillage cumulatif en liaison descendante pour le cas le plus défavorable causé à un système à polarisation rectiligne par un système adjacent à polarisation circulaire est comparable à celui causé par un système adjacent à polarisation rectiligne étant donné que les contributions au brouillage en polarisation croisée imputable à l'antenne de la station terrienne s'annulent aux bornes de réception de cette antenne. Le brouillage cumulatif en liaison montante pour le cas le plus défavorable causé au système à polarisation rectiligne par le système adjacent à polarisation circulaire est plus élevé que celui causé par le système adjacent à polarisation rectiligne. Le niveau de brouillage dépend de la relation de phase entre les composantes copolaire et contrapolaire pour l'antenne de la station terrienne et l'antenne du satellite. Si le niveau de brouillage à l'une des bornes de réception de l'antenne du satellite augmente, le niveau de brouillage mesuré à la borne de réception orthogonale de l'antenne de satellite de la même station terrienne diminuera de la même quantité. Si on améliore les caractéristiques de fonctionnement hors axe de la station terrienne, on améliorera également le niveau de brouillage cumulatif pour le cas le plus défavorable. Le niveau de brouillage moyen causé à des systèmes à polarisation rectiligne double par des systèmes à polarisation circulaire double (ou vice versa) est identique au niveau de brouillage moyen entre systèmes adjacents à polarisation rectiligne double ou entre systèmes adjacents à polarisation circulaire double.

Le brouillage cumulatif en liaison descendante et en liaison montante causé à un système à polarisation circulaire par un système adjacent à polarisation rectiligne est identique au brouillage causé à un système à polarisation rectiligne par un système adjacent à polarisation circulaire.

3.1 Brouillage causé par un satellite à polarisation circulaire à une station terrienne à polarisation rectiligne

On suppose que:

- a) L'intensité du signal pour chaque polarisation est la même, c'est-à-dire $e_R = e_L = e^*$.
- b) La polarisation croisée du satellite est définie par le paramètre découplage de polarisation croisée, c'est-à-dire $e_{RX} = e_{LX} = e/\sqrt{xpd}$ **. XPD représente la différence entre les valeurs du gain copolaire et du gain contrapolaire d'une antenne. Il est exprimé en général en dB bien que dans les équations xpd en minuscules indique un rapport de puissance linéaire.

* Une différence de niveau de copolarisation dans le signal émis par le satellite n'est pas nécessairement souhaitable car elle peut provoquer un brouillage (voir le quatrième terme des équations (5) et (6)). Toutefois, le premier terme dominant sera petit dans le cas d'une différence compte tenu du facteur 1/2 qui le précède. L'annulation de la contribution dominante de polarisation croisée de la station terrienne semble être la seule solution dans le cas d'un brouillage en liaison descendante. Il y a annulation si les deux signaux de polarisation sont émis par un seul et même satellite ou par des satellites occupant la même position orbitale. Sinon, cette contribution serait une contribution importante en liaison descendante pour $\delta = \pm 90^\circ$.

** C'est une hypothèse très pessimiste que de supposer que les crêtes de polarisation croisée s'observent au même endroit et sur la même fréquence pour les deux sens de polarisation circulaire du satellite. Ce point est examiné plus avant dans le § 5 de cette Annexe.

- c) Le gain copolaire et le gain contrapolaire de l'antenne de la station terrienne sont définis par les enveloppes de gain G et G_x . Les valeurs types pour l'enveloppe de gain G_x seraient $19 - 25 \log(\theta)$, soit 10 dB de moins que les valeurs types pour l'enveloppe de gain G typique $29 - 25 \log(\theta)$. Les lettres minuscules g et g_x indiquent les valeurs numériques correspondantes.

Le XPD du satellite est généralement de l'ordre de 27-30 dB alors que le XPD hors axe de la station terrienne à proximité du faisceau principal peut être supposé égal à 10 dB. Si l'on s'éloigne du faisceau principal, la valeur sera plus faible. On peut donc penser que la contribution, par polarisation croisée, de la station terrienne au brouillage global du satellite adjacent sera supérieure à la contribution par polarisation croisée de l'autre satellite.

En appliquant cette hypothèse aux équations (5) et (6), on obtient l'expression de la puissance mesurée aux deux bornes de réception de l'antenne de la station terrienne en fonction des différences de phase δ_R , δ_L et δ . Ces différences de phase inconnues ne sont généralement pas prises en considération dans la conception des antennes. Elles sont toutefois significatives pour le brouillage cumulatif. On ne considère ici que le brouillage dû à d'éventuelles différences de phase et on obtient ainsi le brouillage pour le cas le plus défavorable et le brouillage pour le cas optimal:

$$|v_R|^2 + |v_L|^2_{worst/best\ case} = (g + g_x)e^2 \pm 2\sqrt{\frac{g(g + 4g_x)}{xpd}} e^2 + \frac{g}{xpd} e^2 \quad (18)$$

Le signe + devant le radical correspond au cas le plus défavorable et le signe – au cas optimal. Le brouillage moyen est la somme des premier et troisième termes de l'équation (18). Pour la borne de réception de signaux à polarisation horizontale, le brouillage pour le cas le plus défavorable correspond à des angles de phase δ , δ_R et δ_L voisins de 0 et le brouillage pour le cas optimal à des angles de phase δ , δ_R et δ_L proches de 180°, et inversement pour la borne de réception de signaux à polarisation verticale. Il est important de noter que:

- en moyenne, il n'y a pas de dégradation par rapport aux systèmes à polarisation rectiligne;
- si la qualité de fonctionnement de l'une des bornes de réception est dégradée, la qualité de fonctionnement de l'autre borne sera meilleure que dans le cas moyen.

3.2 Brouillage causé par une station terrienne à polarisation circulaire à un satellite à polarisation rectiligne

On suppose que:

- L'intensité du signal pour chaque polarisation est la même, c'est-à-dire: $e_R = e_L = e$.
- La polarisation croisée du satellite est définie par le paramètre XPD. Si le gain copolaire de l'antenne de satellite est g_{sat} , le gain contrapolaire est $g_{sat,x} = g_{sat}/xpd$.
- Le gain copolaire et le gain contrapolaire de l'antenne de la station terrienne sont définis par les enveloppes de gain G et G_x . La polarisation croisée de la station terrienne est alors $e_{RX} = e_{LX} = e\sqrt{g_x/g}$.

Le brouillage pour le cas le plus défavorable et le brouillage pour le cas optimal en liaison montante sont les suivants:

$$|v_R|^2 + |v_L|^2_{worst/best\ case} = (g + g_x)e^2 \pm 2\sqrt{\frac{g g_x (xpd + 4)}{xpd}} e^2 + \frac{g}{xpd} e^2 \quad (19)$$

Le brouillage pour le cas le plus défavorable s'observe à la borne de réception de signaux à polarisation horizontale pour δ , δ_L et δ_R voisins de 0 comme dans le cas de la liaison descendante. Etant donné que le XPD du satellite sera en général important, la dégradation pour le cas le plus défavorable sera plus importante en liaison descendante qu'en liaison montante.

3.3 Brouillage causé par un satellite à polarisation rectiligne à une station terrienne à polarisation circulaire

On suppose que:

- a) L'intensité du signal pour chaque polarisation est la même, c'est-à-dire: $e_H = e_V = e$.
- b) La polarisation croisée du satellite est définie par le paramètre XPD c'est-à-dire $e_{HX} = e_{VX} = e/\sqrt{xpd}$.
- c) Le gain copolaire et le gain contrapolaire de l'antenne de la station terrienne sont définis par les enveloppes de gain G et G_x .

En appliquant ces hypothèses aux équations (11) et (12), on obtient des résultats analogues à ceux observés dans le cas d'un brouillage causé par un satellite à polarisation circulaire à une station terrienne à polarisation rectiligne. Le brouillage pour le cas le plus défavorable (pour le cas moyen et pour le cas optimal) est identique au brouillage pour le cas le plus défavorable (pour le cas moyen et pour le cas optimal) causé par un satellite à polarisation circulaire à une station terrienne à polarisation rectiligne (voir l'équation (18)). La principale différence est que le brouillage pour le cas le plus défavorable pour la borne de polarisation circulaire dextrogyre (et brouillage pour le cas «optimal» pour la borne de polarisation circulaire lévogyre) correspond à $\delta = 90^\circ$ et $\delta_V = -\delta_H \approx 90^\circ$. Si l'on change les signes des angles de phase, on inverse les caractéristiques des signaux aux bornes de l'antenne de réception. Manifestement, les angles de phase pour le cas le plus défavorable sont ceux qui maximisent le transfert de puissance des champs incidents rayonnés par le satellite adjacent (équations (1) et (7)) vers les bornes d'antenne de réception caractérisées par les équations (2) et (8).

3.4 Brouillage causé par une station terrienne à polarisation rectiligne à un satellite à polarisation circulaire

On suppose que:

- a) L'intensité du signal pour chaque polarisation est la même, c'est-à-dire: $e_H = e_V = e$.
- b) La polarisation croisée du satellite est définie par le paramètre, XPD. Si le gain copolaire de l'antenne de satellite est g_{sat} , le gain contrapolaire est $g_{sat,x} = g_{sat}/xpd$.
- c) Le gain copolaire et le gain contrapolaire de l'antenne de la station terrienne sont définis par les enveloppes de gain G et G_x . Le XPD de la station terrienne est alors $e_{HX} = e_{VX} = e\sqrt{g_x/g}$.

Là aussi, le brouillage est identique au brouillage analogue causé par un système à polarisation circulaire à un système à polarisation rectiligne. Par conséquent, le brouillage pour le cas le plus défavorable (et pour le cas optimal) causé par une station terrienne à polarisation rectiligne double à un satellite à polarisation circulaire est donné par l'équation (19) et la dépendance vis-à-vis des angles de phase est la même que dans le cas du brouillage en liaison descendante.

3.5 Brouillage causé par un satellite à polarisation rectiligne à une station terrienne à polarisation rectiligne

On suppose que:

- a) L'intensité du signal pour chaque polarisation est la même, c'est-à-dire: $e_H = e_V = e$.
- b) La polarisation croisée du satellite est définie par le paramètre XPD, c'est-à-dire $e_{HX} = e_{VX} = e/\sqrt{xpd}$.
- c) Le gain copolaire et le gain contrapolaire de l'antenne de la station terrienne sont définis par les enveloppes de gain G et G_x .

En appliquant ces hypothèses aux équations (16) et (17) il apparaît que la puissance reçue par une station terrienne à polarisation rectiligne en provenance d'un satellite à polarisation rectiligne double est proportionnelle à:

$$|v_H|^2 + |v_V|^2 = (g + g_x) e^2 \mp \frac{g}{\sqrt{xpd}} \sin 2\psi (\cos \delta_H + \cos \delta_V) e^2 + 2\sqrt{\frac{g g_x}{xpd}} (\cos 2\psi (\cos \delta_H + \cos \delta_V) \cos \delta \mp (\sin \delta_H - \sin \delta_V) \sin \delta) e^2 + \frac{g}{xpd} e^2 \quad (20)$$

Le signe – devant le radical s'applique à la borne de polarisation horizontale et le signe + à la borne de polarisation verticale. Le deuxième terme, qui représente la contribution par polarisation croisée de l'antenne de satellite du plus faible ordre disparaît en cas d'alignement parfait de polarisation croisée $\psi = 0$. Sinon le terme correspondant au brouillage par polarisation croisée dépend de 2ψ , deux fois l'erreur angulaire d'alignement de polarisation. Le brouillage pour le cas le plus défavorable (et pour le cas optimal) donné par l'équation (24) est pour $\psi = 0$

$$|v_H|^2 + |v_V|^2_{\text{worst/best case, } \psi=0} = (g + g_x) e^2 \pm 4\sqrt{\frac{g g_x}{xpd}} e^2 + \frac{g}{xpd} e^2 \quad (21)$$

Le brouillage pour le cas le plus défavorable se produit sur la borne de polarisation horizontale pour $\delta_V = -\delta_H = \delta$. L'équation (21) s'applique également au brouillage causé par un satellite à polarisation circulaire à une station terrienne à polarisation circulaire. Pour $\psi = 45^\circ$ le brouillage est identique à celui causé par un système à polarisation circulaire double à un système à polarisation rectiligne.

3.6 Brouillage causé par une station terrienne à polarisation rectiligne à un satellite à polarisation rectiligne

On suppose:

- a) L'intensité du signal pour chaque polarisation est la même, c'est-à-dire: $e_H = e_V = e$.
- b) Le gain copolaire de l'antenne de satellite est g_{sat} et le gain contrapolaire est $g_{sat,x} = g_{sat}/xpd$.
- c) La polarisation croisée de l'antenne de la station terrienne est $e_{HX} = e_{VX} = e\sqrt{g_x/g}$.

En appliquant ces hypothèses aux équations (16) et (17), il apparaît que la puissance reçue par un satellite à polarisation rectiligne en provenance d'une station terrienne à polarisation rectiligne double est proportionnelle à:

$$|v_H|^2 + |v_V|^2 = (g + g_x) e^2 \mp \sqrt{g g_x} \sin 2\psi (\cos \delta_H + \cos \delta_V) e^2 + 2\sqrt{\frac{g g_x}{xpd}} (\cos 2\psi (\cos \delta_H + \cos \delta_V) \cos \delta \mp (\sin \delta_H - \sin \delta_V) \sin \delta) e^2 + \frac{g}{xpd} e^2 \quad (22)$$

Le signe – devant le radical s'applique à la borne de polarisation horizontale et le signe + à la borne de polarisation verticale. Le deuxième terme qui représente la contribution par polarisation croisée de l'antenne de la station terrienne du plus faible ordre disparaît en cas d'alignement parfait de polarisation, $\psi = 0$. Les autres termes sont identiques à ceux de l'équation (20). Par conséquent, pour un alignement de polarisation parfait, $\psi = 0$, les caractéristiques de fonctionnement en liaison descendante pour le cas le plus défavorable sont données par l'équation (21). L'incidence d'une erreur angulaire d'alignement de polarisation de 1° fera augmenter le brouillage pour le cas le plus défavorable d'environ 0,1 dB.

4 Analyse des résultats

4.1 Brouillage causé par un système à polarisation circulaire à un système à polarisation rectiligne

Le Tableau 1 récapitule les différentes valeurs, en liaison descendante et en liaison montante, pour le cas le plus défavorable du brouillage causé par un système adjacent à polarisation circulaire à un système à polarisation rectiligne, par rapport à celui causé par un système à polarisation rectiligne à un autre système à polarisation rectiligne, en fonction du XPD de l'antenne de satellite et de la polarisation croisée hors axe de la station terrienne.

TABLEAU 1

Différentes valeurs en dB, en liaison descendante et en liaison montante pour le cas le plus défavorable du brouillage causé à un système à polarisation rectiligne par un système adjacent à polarisation circulaire (ou vice versa) par rapport à celui causé par un système adjacent à polarisation rectiligne, en fonction du XPD de l'antenne de satellite et de la polarisation croisée hors axe de la station terrienne $G_x, \psi = 0$

G_x	$G - 10$ dB			$G - 15$ dB			$G - 20$ dB		
XPD (dB)	20	25	30	20	25	30	20	25	30
Liaison descendante	0,31	0,19	0,11	0,52	0,31	0,18	0,62	0,38	0,22
Liaison montante	1,50	1,70	1,81	1,01	1,12	1,19	0,62	0,70	0,74

Avec un XPD à l'antenne de satellite de l'ordre de 30 dB, le gain contrapolaire hors axe de l'antenne de la station terrienne sera dans ces cas l'élément de polarisation croisée dominant. Il s'agit de la principale composante du brouillage par polarisation croisée entre deux réseaux à satellites adjacents, qu'ils fonctionnent en polarisation rectiligne ou en polarisation circulaire.

Les différentes valeurs du brouillage en liaison descendante pour le cas le plus défavorable sont pour la plupart négligeables pour de faibles niveaux de polarisation croisée du satellite. Par ailleurs, dans le cas d'un brouillage entre deux systèmes à polarisation rectiligne il n'a été tenu compte d'aucune dégradation supplémentaire due à une erreur d'alignement de polarisation, aux effets de lacet de l'antenne ou la rotation de Faraday, etc.

Les différentes valeurs du brouillage en liaison montante pour le cas le plus défavorable sont plus élevées et augmentent en raison de la polarisation croisée hors axe de l'antenne de la station terrienne, par hypothèse, médiocre. Même lorsque la polarisation croisée du satellite et celle de la station terrienne sont faibles, les valeurs du brouillage en liaison montante pour le cas le plus défavorable ne seront pas nécessairement négligeables mais le brouillage moyen sera faible.

Le cas le plus défavorable correspond au cas où les signaux contrapolaires sont en phase avec les signaux copolaires (et où il y a simultanément des crêtes) pour les deux polarisations de la station terrienne simultanément. Dans ces conditions, les tensions des signaux brouilleurs copolaires et des signaux brouilleurs contrapolaires s'ajouteront en phase à la borne polarisation de l'antenne du satellite, ce qui est considéré comme un phénomène extrêmement rare. Dans d'autres cas, le brouillage peut être inférieur à celui observé entre systèmes à polarisation rectiligne. Par ailleurs, le brouillage moyen causé par un système à polarisation circulaire à un système à polarisation rectiligne est égal au brouillage moyen entre systèmes à polarisation rectiligne. Par conception, l'antenne peut naturellement limiter la relation de phase entre les signaux contrapolaires et les signaux copolaires de la station terrienne. Par exemple, les signaux subiront un effet de diffraction par les bords du réflecteur; ces signaux seront généralement en quadrature de phase avec les

signaux de même polarisation. D'où la disparition de certains termes pour des contributions avec $\delta_R = \delta_L = \pm 90^\circ$. Les effets du polariseur, de l'alimentation, du masquage par réflecteur secondaire et des contributions des supports d'appui sur la relation de phase entre les composantes copolaire et contrapolaire peuvent aussi jouer un rôle, lequel doit être étudié plus avant (voir l'Annexe 2). Par ailleurs, il est peu vraisemblable qu'il y ait simultanée de lieu entre les crêtes de polarisation croisée et les crêtes de copolarisation (voir l'Appendice 1) étant donné que les crêtes de polarisation croisée dues à la diffraction par les bords du réflecteur sont situées dans les zéros de copolarisation.

4.2 Brouillage causé par un système à polarisation rectiligne à un système à polarisation circulaire

Le brouillage causé par un système à polarisation rectiligne à un système à polarisation circulaire est identique à celui causé par un système à polarisation circulaire à un système à polarisation rectiligne. Seule diffère la dépendance vis-à-vis des différences de phase entre les signaux copolaires et les signaux contrapolaires de l'antenne de la station terrienne et de l'antenne du satellite.

5 Conclusions

Il ressort de cette analyse que, lorsque les intensités des deux signaux brouilleurs à polarisation orthogonale sont prises, par hypothèse, égales, le brouillage cumulatif en liaison descendante pour le cas le plus défavorable causé à un système à polarisation rectiligne par un système adjacent à polarisation circulaire est comparable à celui causé par un système adjacent à polarisation rectiligne étant donné que les contributions au brouillage par polarisation croisée de l'antenne de la station terrienne s'annulent aux bornes de polarisation de l'antenne de la station terrienne. Cette conclusion est valable quels que soient les angles de phase relatifs δ_R , δ_L et δ .

Le brouillage cumulatif en liaison montante pour le cas le plus défavorable causé au système à polarisation rectiligne par le système adjacent à polarisation circulaire est légèrement supérieur à celui causé par le système adjacent à polarisation rectiligne. Le niveau de brouillage dépend de la relation de phase entre la composante copolaire et la composante contrapolaire pour l'antenne de la station terrienne et celle du satellite. Le brouillage en liaison montante pour le cas le plus défavorable se produit lorsque la composante du signal contrapolaire est en phase avec la composante du signal copolaire et qu'il y a simultanée des crêtes de gain d'antenne contrapolaire et copolaire, avec simultanée de transmission des deux signaux utiles. Il est statistiquement très improbable que soient réunies un si grand nombre de conditions. Il convient de noter que:

- Si le brouillage à l'une des bornes de polarisation de l'antenne de satellite augmente, le brouillage à l'autre borne de l'antenne de satellite de la même station terrienne diminuera de la même quantité.
- Dans la pratique, les caractéristiques de fonctionnement hors axe de la station terrienne seront vraisemblablement meilleures que celles données dans les Recommandations de l'UIT-R, de sorte que le niveau de brouillage cumulatif pour le cas le plus défavorable sera plus faible.
- Par conception, l'antenne limitera naturellement la relation de phase entre les signaux contrapolaires et les signaux copolaires de la station terrienne, ce qui tend à ramener aux résultats obtenus pour le brouillage moyen.
- Il est peu vraisemblable qu'il y ait identité d'angle hors axe entre les crêtes de gain contrapolaire et les crêtes de gain copolaire, en particulier pour les deux polarisations simultanément.

En résumé, si pour des raisons pratiques on utilise des antennes réalistes, le brouillage cumulatif causé à des systèmes à polarisation rectiligne double par des systèmes à polarisation circulaire double faiblement espacés (ou vice versa) est identique au brouillage cumulatif entre systèmes adjacents à polarisation rectiligne double ou entre systèmes adjacents à polarisation circulaire double.

APPENDICE 1

À L'ANNEXE 1

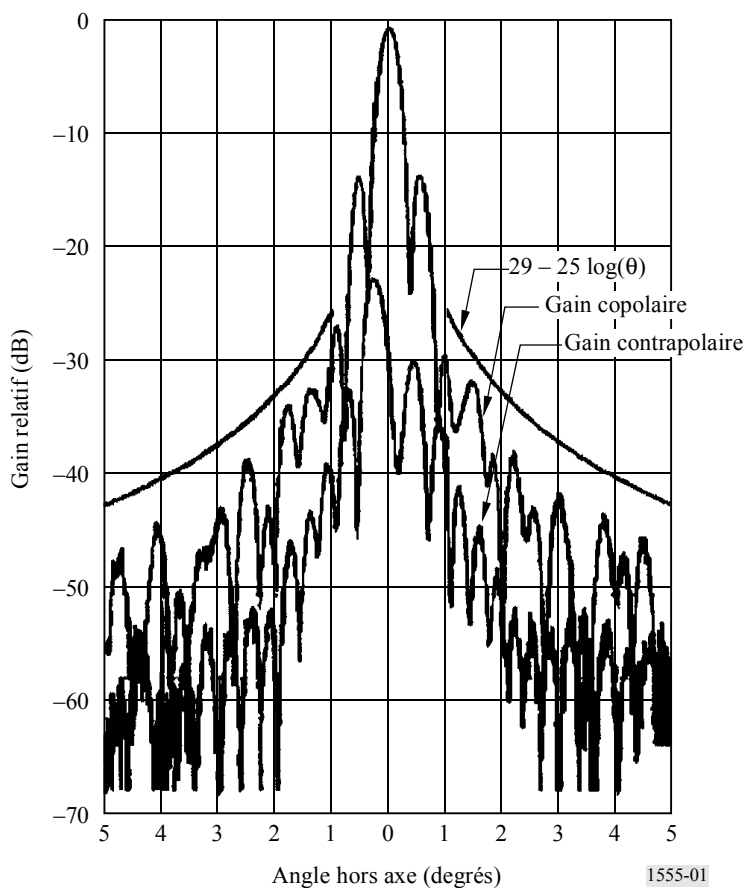
Exemple de données de mesure de la discrimination contrapolaire d'antennes de station terrienne en direction de satellites adjacents faiblement espacés

1 Antenne N° 1

La Fig. 1 donne les valeurs mesurées du gain copolaire et du gain contrapolaire pour une antenne d'émission de station terrienne de 8,1 m fonctionnant à 6,4 GHz en polarisation circulaire. Le gabarit $29 - 25 \log(\theta)$ est également indiqué pour des angles hors axe de plus de 1° . On notera que le XPD est supérieur à 15 dB environ (par rapport à $29 - 25 \log(\theta)$) pour des angles hors axe compris entre 1 et 2° et supérieur à 18 dB environ pour des angles hors axe compris entre 2 et 3° . Le plafond de bruit des mesures ne permet pas d'obtenir des données fiables dans ce cas pour des angles de plus de 3° , bien que le XPD semble bien être supérieur à 10 dB pour des angles hors axe allant jusqu'à 5° .

FIGURE 1

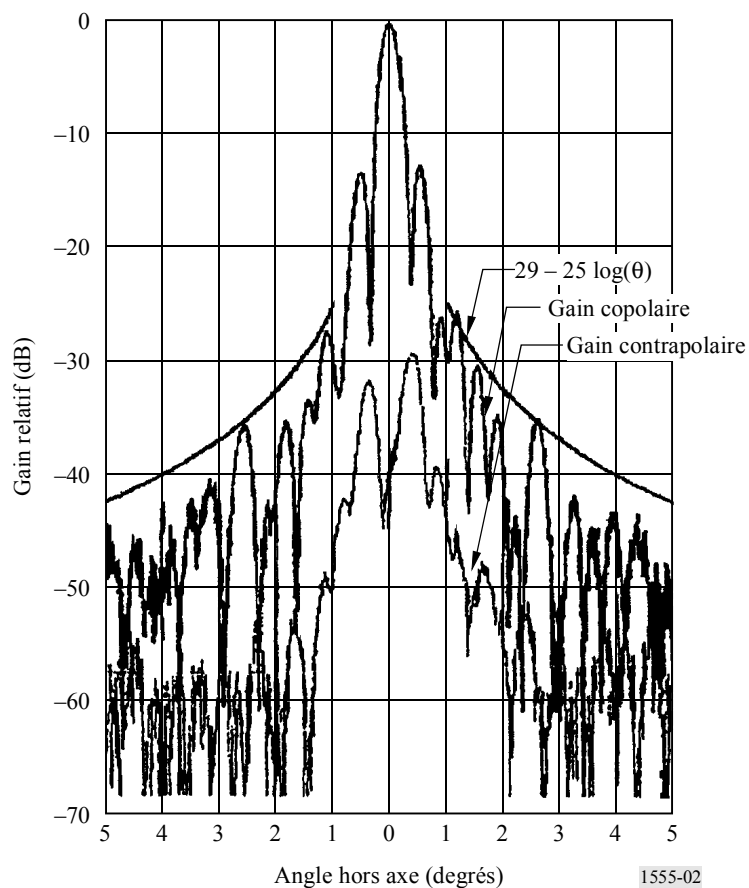
Valeurs mesurées du gain copolaire et du gain contrapolaire pour une antenne d'émission de station terrienne de 8,1 m fonctionnant à 6,4 GHz (polarisation circulaire)



2 Antenne N° 2

La Fig. 2 donne les valeurs mesurées du gain copolaire et du gain contrapolaire pour une antenne d'émission de station terrienne de 9,3 m fonctionnant à 6,4 GHz en polarisation circulaire. Le gabarit $29 - 25 \log(\theta)$ est également indiqué pour des angles hors axe de plus de 1° . On notera que le XPD est supérieur à 20 dB environ (par rapport à $29 - 25 \log(\theta)$) pour des angles hors axe compris entre 1 et 5° .

FIGURE 2
Valeurs mesurées du gain copolaire et du gain contrapolaire pour une antenne d'émission de station terrienne de 9,3 m fonctionnant à 6,4 GHz (polarisation circulaire)



1555-02

ANNEXE 2

**Polarisation croisée hors axe d'antennes de stations terriennes
fonctionnant dans les bandes de fréquences des 6/4 GHz****1 Introduction**

On examine plus en détail dans la présente Annexe le diagramme de rayonnement d'une antenne de station terrienne ainsi que les éléments qui contribuent à la polarisation croisée. Il est établi que la diffusion par les supports de fixation du réflecteur auxiliaire peut être une source dominante de polarisation croisée dans un angle compris entre 2° et 10° par rapport à l'axe de visée. Cette diffusion n'est importante que dans des parties limitées de l'espace. On démontre que lorsque ce phénomène se produit, la dégradation affecte essentiellement les lobes latéraux copolaires dans le cas d'une antenne à polarisation rectiligne et essentiellement les lobes latéraux contrapolaires dans le cas d'une antenne à polarisation circulaire.

On démontre par ailleurs que pour les antennes de station terrienne actuellement disponibles, à quatre supports situés à proximité des plans à $\pm 45^\circ$ de l'antenne de la station terrienne, la diffusion par les supports des signaux copolaires et des signaux contrapolaires est insignifiante lorsque l'on s'éloigne de ces plans. En fait, la polarisation croisée par les supports de fixation s'annule complètement dans le plan à 0° (et à 90°) qui normalement serait aligné avec l'arc géostationnaire. Dans ce cas il n'y a pas de différence entre le brouillage causé par un système adjacent à polarisation circulaire double à un système à polarisation rectiligne et celui causé par un système adjacent à polarisation rectiligne double présentant le même alignement. Dans les cas particuliers où la diffusion par les supports de fixation affecte considérablement les caractéristiques copolaire et contrapolaire de la station, le brouillage causé par un système à polarisation circulaire double à un système à polarisation rectiligne ne sera pas plus important que celui causé par un système à polarisation rectiligne double à un système à polarisation rectiligne.

2 Résumé de l'analyse**2.1 Mesure de la relation de phase entre la composante copolaire et la composante contrapolaire**

La relation de phase entre, d'une part, la composante copolaire et la composante contrapolaire et, d'autre part, la polarisation croisée hors axe de l'antenne de la station terrienne pourrait jouer un rôle dans la différence que l'on observe entre le niveau de brouillage causé par un système adjacent à polarisation circulaire à un système à polarisation rectiligne et celui causé par un système à polarisation rectiligne parfaitement aligné.

De l'avis de certains, les mesures viendraient conforter la conclusion selon laquelle le brouillage cumulatif entre les réseaux devrait être supposé identique à celui que l'on observerait si les deux réseaux utilisaient le même type de polarisation (c'est-à-dire tous les deux une polarisation rectiligne ou tous les deux une polarisation circulaire). La possibilité de mesurer la relation de phase entre la composante copolaire et la composante contrapolaire a été analysée. Ces analyses permettent de conclure que ces mesures seraient difficiles, voire impossibles à réaliser. En raison de la petite longueur d'onde et des dimensions importantes des antennes de stations terriennes utilisées dans les bandes des 6/4 GHz il faudrait que ces mesures soient faites à plusieurs kilomètres de l'emplacement de l'antenne. Ces mesures seraient alors faussées par des phénomènes extérieurs importants (réflexion au sol par exemple). Le niveau du signal contrapolaire est faible. Les mesures

seraient très peu précises, ce qui nuirait beaucoup à l'exactitude recherchée. Pour ces raisons, les études supplémentaires ont été axées sur la méthode analytique qui donne des résultats précis, plus généraux et fiables.

2.2 Définition d'un modèle de diagramme de rayonnement d'antenne de station terrienne

Pour analyser davantage le rôle important que joue la polarisation croisée hors axe de l'antenne de la station terrienne on a étudié en détail le diagramme de rayonnement de la station terrienne. Un modèle de diagramme de rayonnement est proposé pour des systèmes d'antenne à double réflecteur, à alimentation centrale et à grande efficacité qui sont généralement utilisés comme stations terriennes de télécommunications par satellite. Ce modèle est présenté dans l'Appendice 1 à l'Annexe 2.

2.3 Incidence des supports de la station terrienne

On a établi que les supports du réflecteur auxiliaire peuvent être une source dominante de polarisation croisée dans un angle compris entre 2° et 10° par rapport à l'axe de visée. Dans la bande des 6/4 GHz, la section transversale des supports est de l'ordre de quelques longueurs d'onde et une étude particulière a été faite. Un modèle de diffusion par les supports a été élaboré. Il fait l'objet de l'Appendice 1 à l'Annexe 2.

On a établi que la diffusion par les supports du réflecteur auxiliaire est une source dominante de polarisation croisée dans un angle compris entre 2° et 10° par rapport à l'axe de visée. Avec les antennes de station terrienne actuellement disponibles on utilise des supports à quatre pieds situés dans les plans à $\pm 45^\circ$ de l'antenne de la station terrienne afin d'éloigner de l'arc géostationnaire la diffusion par les supports des signaux copolaires. Cette configuration permet d'annuler les signaux contrapolaires dans les plans du diagramme principal de l'antenne de la station terrienne pour une polarisation rectiligne et une polarisation circulaire. Ainsi, l'éventuelle augmentation du brouillage en liaison montante causé par un réseau à polarisation circulaire à un réseau à polarisation rectiligne ne se produira pas dans les conditions d'exploitation classiques où aucun support n'est perpendiculaire à l'arc géostationnaire.

Par ailleurs, dans le cas où une antenne de station terrienne serait exploitée avec un support perpendiculaire à l'arc géostationnaire, le brouillage causé par un réseau à polarisation circulaire à un réseau à polarisation rectiligne ne sera pas plus important que celui causé par un réseau à polarisation rectiligne à un réseau à polarisation rectiligne.

2.4 Simulation et résultats

Des simulations ont été effectuées et des résultats numériques ont été obtenus. Ils sont illustrés dans les Fig. 3 à 7.

2.5 Antenne à réflecteur à alimentation décalée

Le cas des antennes à réflecteur à alimentation décalée, couramment utilisées pour les micro-stations, a été examiné. Ces antennes ont l'avantage de ne pas masquer une partie du faisceau et présentent une polarisation croisée très faible lorsqu'elles fonctionnent en polarisation circulaire. Aucune analyse supplémentaire n'est donc nécessaire pour montrer que les scénarios en polarisation rectiligne et en polarisation circulaire sont identiques.

FIGURE 3
Amplitude (gauche) et phase (droite) en champ lointain pour un réflecteur principal et un réflecteur auxiliaire
($D = 9,5$ m, $d = 1,22$ m, $6,425$ GHz)

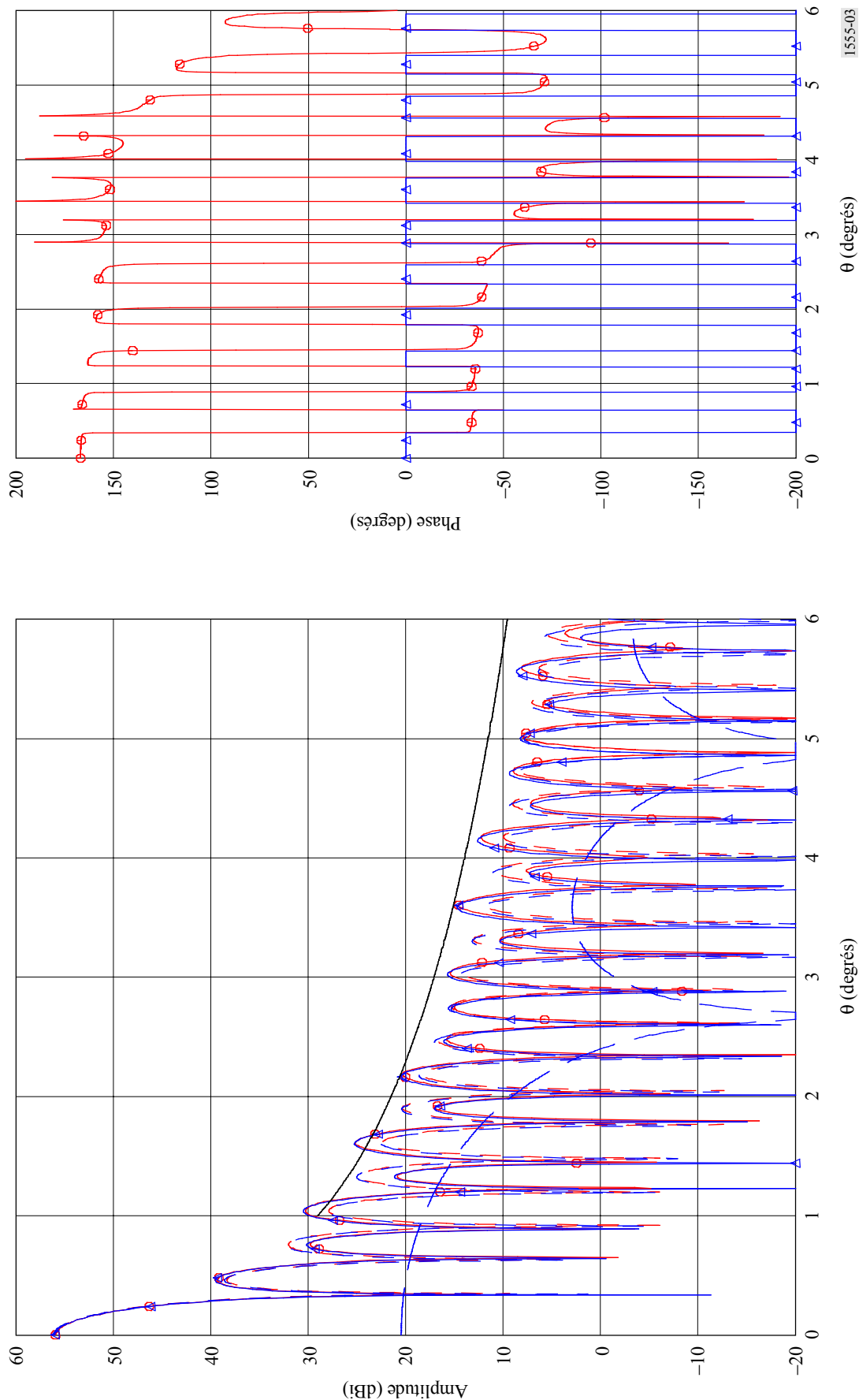


FIGURE 4

**Diagramme associé aux tolérances pour les imperfections de surface
pour une valeur quadratique moyenne de 0,5 mm et une longueur
de corrélation $D/2$ à 6,425 GHz et à 14,5 GHz**
 $D = 9,5$ m, $d = 1,22$ m

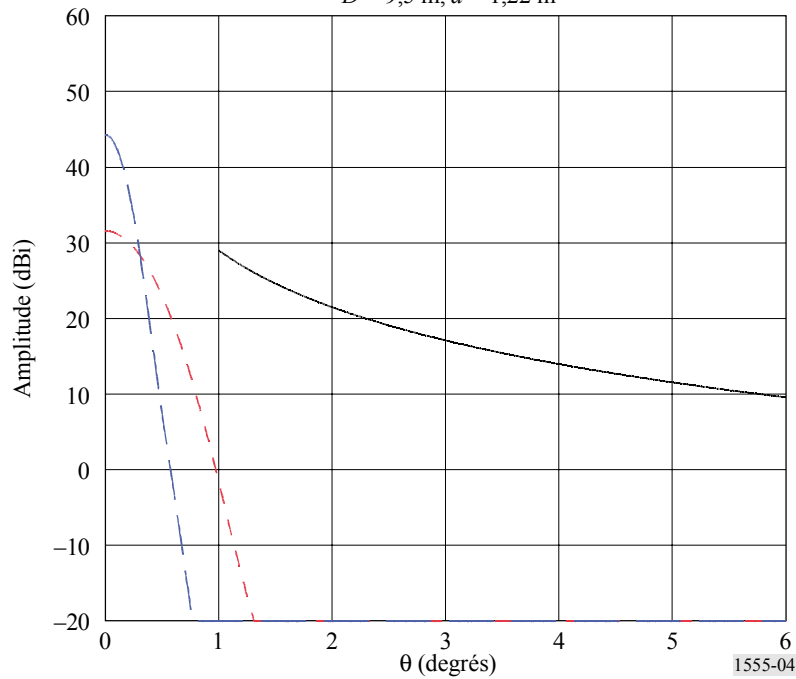
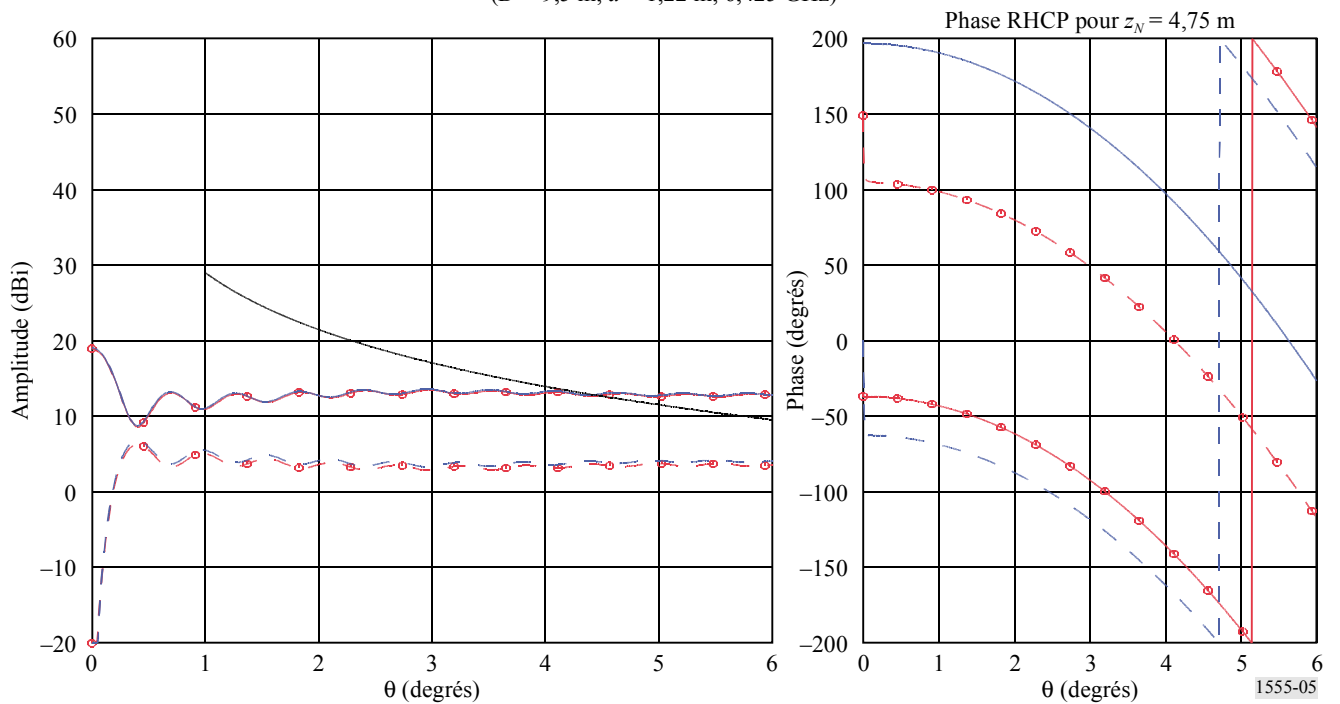


FIGURE 5

**Composantes copolaire et contrapolaire dans le cas de supports circulaires de 6 cm de diamètre dans le plan $\phi = 0^\circ$.
L'angle des supports avec le plan de l'ouverture est $\alpha = 0^\circ$. Comparaison entre le modèle simple
et le logiciel général d'antennes à réflecteur (cercles)**
 $(D = 9,5$ m, $d = 1,22$ m, 6,425 GHz)



RHCP: polarisation circulaire droite (*right-hand cicular polarization*)

FIGURE 6

Les courbes en traits pleins côté gauche de la Figure comparent le champ total copolaire obtenu à l'aide du modèle simple et à l'aide du logiciel général d'antennes à réflecteur (cercles) dans le cas de supports circulaires de 6 cm de diamètre dans le plan $\phi = 0^\circ$. Les courbes en pointillés/tirées indiquent le champ du réflecteur principal, le champ du réflecteur auxiliaire ainsi que les composantes copolaire et contrapolaire des supports obtenus à l'aide du modèle simple. La Figure côté droit montre la phase du champ total copolaire et celle du champ contrapolaire obtenues à l'aide du logiciel général d'antennes à réflecteur. L'angle des supports avec le plan de l'ouverture est $\alpha = 45^\circ$

($D = 9,5$ m, $d = 1,22$ m, 6,425 GHz)

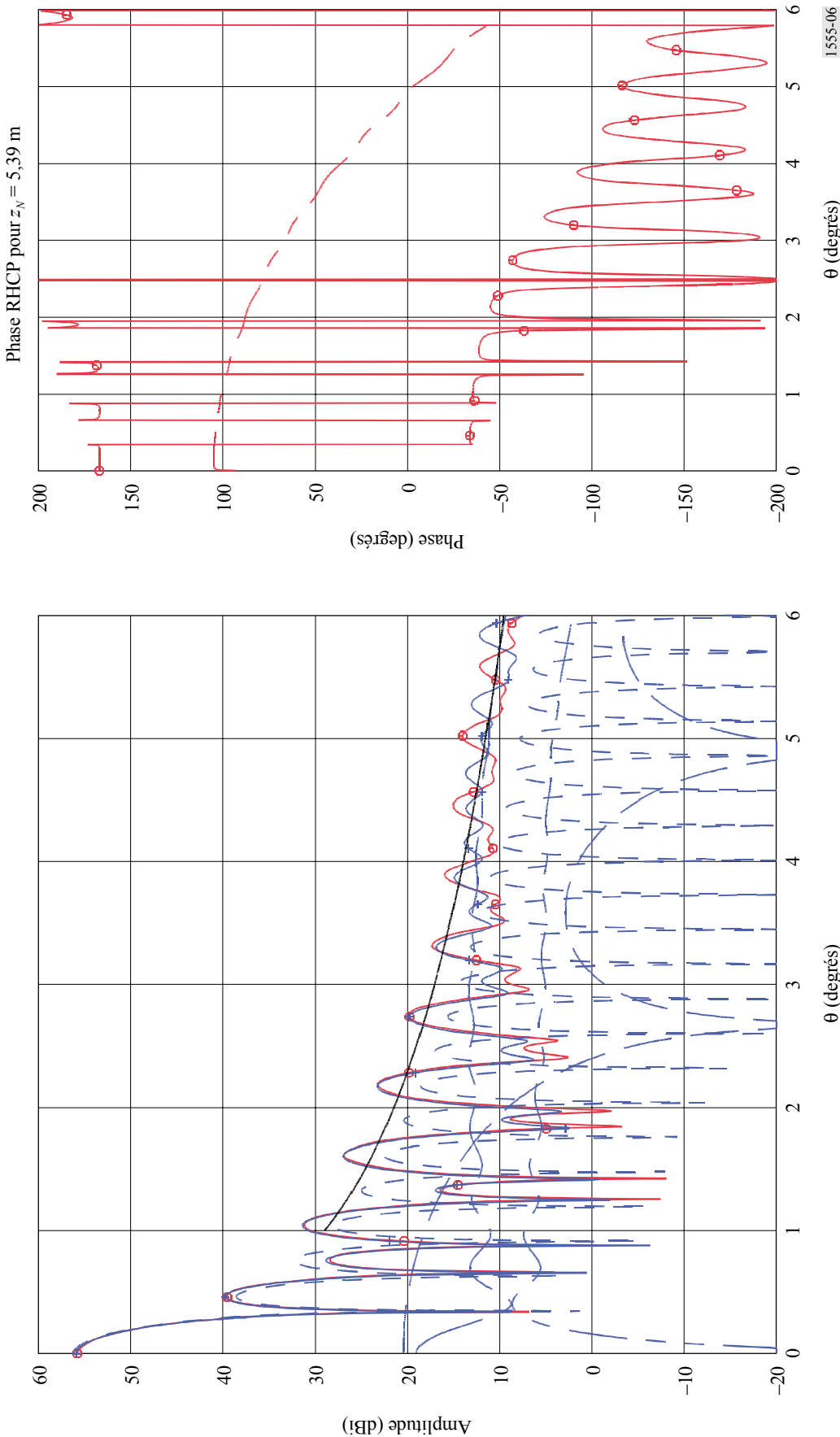
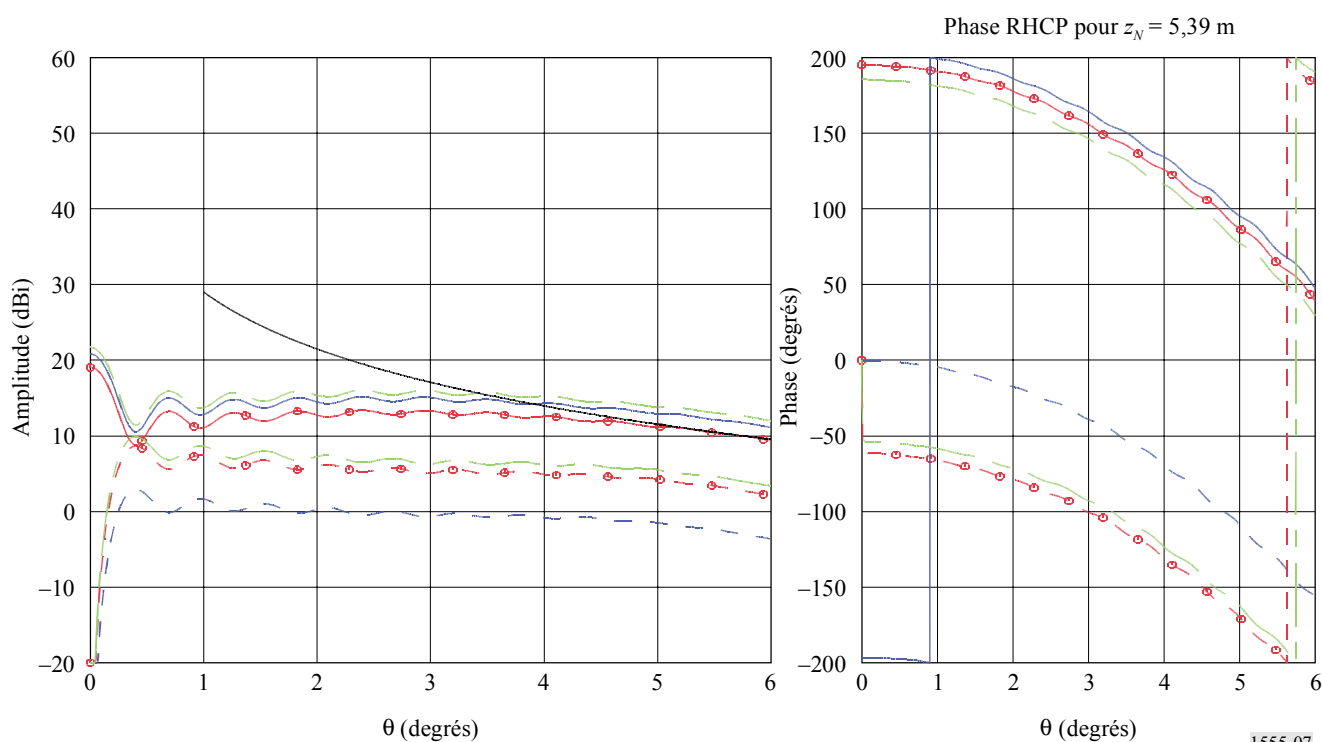


FIGURE 7

Composantes copolaire et contrapolaire dans le cas de supports circulaires de 6 cm de diamètre, de supports carrés de 6 cm et de supports rectangulaires de 6 cm sur 12 cm dans le plan $\phi = 0^\circ$.

L'angle des supports avec le plan de l'ouverture est $\alpha = 45^\circ$

($D = 9,5$ m, $d = 1,22$ m, 6,425 GHz)



1555-07

3 Conclusions

Il ressort de l'Appendice 1 à l'Annexe 1 que les caractéristiques contrapolaires de l'antenne de station terrienne en liaison montante pourraient faire légèrement augmenter le niveau de brouillage causé par un système adjacent à polarisation circulaire double à un système à polarisation rectiligne par rapport à celui causé par un système adjacent à polarisation rectiligne double présentant le même alignement. La polarisation croisée hors axe de l'antenne de la station terrienne serait un élément dominant dans cette éventuelle différence.

On a analysé s'il était possible de mesurer la relation de phase entre la composante copolaire et la composante contrapolaire, autre élément qui intervient dans cette éventuelle différence. Ces analyses ont permis de conclure que ces mesures seraient difficiles, voire impossibles à réaliser. Les erreurs nuiraient beaucoup à l'exactitude recherchée. Pour ces raisons, les études supplémentaires ont été axées sur la méthode analytique.

Dans ces études, on a examiné plus en détail le diagramme de rayonnement d'une antenne de station terrienne. On a établi en particulier que la diffusion par les supports du réflecteur auxiliaire est une source dominante de polarisation croisée dans un angle compris entre 2° et 10° par rapport à l'axe de visée. Un modèle simple permettant d'évaluer la diffusion des signaux copolaires et des signaux contrapolaires par les supports du réflecteur auxiliaire – y compris les propriétés de phase – a été élaboré et validé. Il est mis en oeuvre comme un programme de simulation autonome. Des simulations ont été effectuées avec ce modèle.

Le cas d'une antenne à réflecteur à alimentation décalée a lui aussi été examiné. En polarisation circulaire ces antennes présentent une polarisation croisée très faible. Il n'y a donc pas de différence entre le niveau de brouillage causé par un système adjacent à polarisation circulaire double à un système à polarisation rectiligne et celui causé par un système à polarisation rectiligne double présentant le même alignement.

Des études approfondies ont été effectuées sur le diagramme de rayonnement d'une antenne de station terrienne et sur les éléments qui pourraient nuire aux caractéristiques de fonctionnement en polarisation croisée. Pour les antennes de station terrienne actuellement disponibles, ces caractéristiques sont suffisamment bonnes pour négliger les effets de la relation de phase entre la composante copolaire et la composante contrapolaire. On montre par ailleurs qu'il n'est pas possible de mesurer cette relation de phase, ce qui est un aspect du problème. Un autre facteur tout aussi important est que la même antenne de station terrienne fonctionnant en polarisation rectiligne peut avoir des lobes latéraux contrapolaires plus importants que lorsqu'elle fonctionne en polarisation circulaire. L'éventuelle augmentation des lobes latéraux copolaires en polarisation rectiligne et l'éventuelle augmentation de la polarisation croisée hors axe en polarisation circulaire sont des manifestations différentes du même phénomène de diffusion par les supports. Le brouillage cumulatif en liaison montante ne sera pas plus important dans le cas d'une polarisation circulaire que dans le cas d'une polarisation rectiligne. Toutes les études nécessaires sur cette question ont été effectuées et les résultats sont concluants.

Les études permettent de conclure que pour des réseaux à satellite adjacents faiblement espacés (espacement orbital jusqu'à 6°) fonctionnant dans les bandes de fréquences des 6/4 GHz et utilisant des types de polarisation différents (polarisation rectiligne dans un réseau et polarisation circulaire dans l'autre), lorsque les deux réseaux utilisent simultanément la polarisation orthogonale tout en fonctionnant sur la même fréquence et en assurant la même couverture, le brouillage cumulatif en liaison montante entre les réseaux peut être supposé identique à celui que l'on observerait si les deux réseaux utilisaient le même type de polarisation (tous les deux la polarisation rectiligne ou tous les deux la polarisation circulaire).

APPENDICE 1

À L'ANNEXE 2

1 Modèle de diagramme de rayonnement d'antenne de station terrienne

Un modèle simple a été élaboré pour les systèmes d'antenne à réflecteur double à alimentation décalée et à grande efficacité couramment utilisés comme stations terriennes de télécommunications par satellite⁵. Ce modèle permet d'identifier et de caractériser les différentes contributions. Il inclut une analyse de diffraction précise des phénomènes de masquage par les supports et de toutes les coupes du diagramme. Cela est important dans la bande des 6/4 GHz où les dimensions des sections transversales des supports sont de l'ordre de plusieurs longueurs d'onde. Il y aura donc d'autres contributions à la polarisation croisée mais elles seront, en général, de 20 à 30 dB, voire plus, aux contributions copolaires correspondantes et seront donc négligées. Des comparaisons sont faites avec des analyses plus précises effectuées à l'aide d'un logiciel général d'analyse d'antennes à réflecteur.

⁵ Ce modèle est analogue aux modèles précédents basés sur la théorie du champ avec une ouverture normalisée mais il est assorti d'une analyse plus précise des supports du réflecteur auxiliaire utilisant le rapport dit du champ induit (IFR, *induced field ratio*). L'analyse des supports est simplifiée pour obtenir des résultats sous forme réduite qui soient valides pas trop loin de l'axe de visée de l'antenne de la station terrienne. Les résultats sont extrapolés pour obtenir des informations sur le diagramme de phase et étendus aux sections transversales des supports couramment utilisés. Les sections transversales des supports complexes, par exemple des structures à armature spatiale essentiellement utilisées par les très grandes antennes de station spatiale, ne relèvent pas de l'étude.

1.1 Réflecteur principal et réflecteur auxiliaire

Dans le présent Appendice, on prend pour hypothèse un système d'antenne à réflecteur à grande efficacité dans lequel le réflecteur auxiliaire et le réflecteur principal sont conçus de façon à offrir une illumination du champ avec une ouverture uniforme. Le diamètre du réflecteur principal et celui du réflecteur auxiliaire sont respectivement D et d .

On calcule la contribution du réflecteur auxiliaire en utilisant l'approximation normalisée dans le cadre de laquelle le réflecteur auxiliaire masque la partie centrale de l'ouverture du réflecteur principal. Dans cette approximation, la partie masquée de l'ouverture du réflecteur principal représente une perte de puissance. Dans les modèles concrets d'antenne de station terrienne, le réflecteur secondaire est souvent conçu de façon à diriger cette puissance vers les parties non masquées du réflecteur principal à la fois pour améliorer l'efficacité et pour réduire la désadaptation d'alimentation. La Fig. 3 illustre l'amplitude et la phase calculées à l'aide de ces approximations normalisées: côté gauche, les diagrammes d'amplitude en champ lointain de l'ouverture du réflecteur principal non masqué sont en pointillé, le diagramme avec masquage par un gros réflecteur secondaire est en tirets et le champ combiné est en traits pleins. L'objectif nominal des lobes latéraux de l'antenne de la station terrienne, $G(\theta) = 29 - 25 \log(\theta)$ dBi, est indiqué sur un diagramme superposé. Côté droit, les lobes inférieurs indiquent la phase du diagramme combiné 0° ou 180° . Les lobes supérieurs correspondent à la phase du diagramme combiné calculée à l'aide du logiciel général d'antennes à réflecteur. L'analyse plus précise intègre un décalage de phase fixe imputable à la longueur du trajet depuis l'alimentation du réflecteur principal ainsi qu'une variation de phase en fonction de l'angle due à la profondeur du réflecteur principal. Dans le modèle simple, on suppose un centre de phase parfait situé à l'ouverture du réflecteur principal. En règle générale, le diagramme de phase de la station terrienne est sans intérêt et n'est jamais mesuré. Les diagrammes d'amplitude du réflecteur principal non masqué et du champ combiné calculés à l'aide du logiciel général d'antennes à réflecteur sont également indiqués dans la partie gauche de la Figure mais il est très difficile de faire la distinction entre les deux ensembles de diagrammes d'amplitude.

1.2 Tolérance pour les imperfections de surface du réflecteur principal

Les imperfections de surface du réflecteur peuvent contribuer à la dégradation des lobes latéraux copolaires mais pas, en règle générale, à la polarisation croisée. Pour les réflecteurs, il semble y avoir une corrélation entre les imperfections de surface et les éléments structurels tels que les panneaux, les structures de soutien et les supports. Avec les panneaux diédriques couramment utilisés, la longueur de corrélation est comparable au diamètre du réflecteur. Selon la théorie classique de la tolérance pour les imperfections de surface du réflecteur, la réduction du diagramme de gain nominal $g(\theta, \phi)$ est fonction de la valeur quadratique moyenne de l'imperfection de surface ϵ en longueurs d'onde et le diagramme de gain des imperfections de surface est fonction de cette valeur quadratique moyenne et de la longueur de corrélation c . Dans la Fig. 4 on compare l'ordre de grandeur de ce diagramme de rayonnement correspondant aux imperfections de surface pour une valeur quadratique moyenne de 0,5 mm et une longueur de corrélation égale à la moitié du diamètre du réflecteur principal D à 6,425 GHz (ligne en pointillés) et à 14,5 GHz (ligne tiretée) avec l'enveloppe recommandée pour les lobes latéraux. Les pertes de gain dans l'axe correspondantes sont de 0,08 dB et de 0,4 dB. Une valeur quadratique moyenne de 0,5 mm représente une grande précision pour un diamètre de réflecteur de près de 10 m. Il n'y aura pas de problèmes importants en ce qui concerne les lobes latéraux dans la bande des 6/4 GHz, même dans le cas où les imperfections de surface en azimuth dues au grand nombre de panneaux radiaux présentent une petite longueur de corrélation et où le diagramme correspondant aux imperfections de surface est décalé par rapport à l'axe de visée. On a tendance à améliorer la précision de surface afin de ne pas avoir à reprendre la surface du réflecteur sur le site (du moins dans la bande des 6/4 GHz).

2 Diffusion par les supports

Dans le présent Appendice on suppose qu'un support à quatre pieds maintient le réflecteur auxiliaire. Il ne s'agit pas d'une structure symétrique circulaire et elle diffusera le champ de manière complexe. Dans certaines régions du champ lointain la diffusion par les supports est la composante dominante du champ et peut être à l'origine d'une polarisation croisée importante. Dans la bande des 6/4 GHz où la section transversale des supports peut être de l'ordre de quelques longueurs d'onde on ne peut pas utiliser l'approximation habituelle des champs nuls. En pareil cas, on utilise la méthode de l'IFR. On estime les courants sur un support approximativement comme les courants qui se déplaceraient sur un cylindre infini ayant la même section transversale que le support et illuminé par une onde plane infinie ayant la même polarisation et la même direction d'incidence que le rayon incident sur le support. La méthode IFR modifie les propriétés de la diffusion vers l'avant des supports et intègre les effets de polarisation. On considère que cette méthode est une excellente approximation jusqu'à au moins 15° à 20° de l'axe de visée de l'antenne.

Dans cette région pas trop éloignée de l'axe de visée de l'antenne, la diffusion vers l'avant par les supports peut être exprimée, essentiellement sous forme réduite, à l'aide d'un diagramme simple de diffusion vers l'avant pour chaque support, avec des termes distincts pour la composante copolaire et la composante contrapolaire de diffusion par les supports. Dans le cas d'une polarisation rectiligne avec un angle d'alignement de polarisation φ_p la composante copolaire et la composante contrapolaire de la diffusion par N supports situés aux angles φ_n sont:

$$f_{sN}^{LP,co}(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N f_s(\theta, \varphi - \varphi_n) \exp(j\Phi(\theta, \varphi - \varphi_n)) \left[IFR_M + IFR_D \cos(2(\varphi_n - \varphi_p)) \right] \quad (23)$$

et

$$f_{sN}^{LP,cross}(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N f_s(\theta, \varphi - \varphi_n) \exp(j\Phi(\theta, \varphi - \varphi_n)) IFR_D \sin(2(\varphi_n - \varphi_p)) \quad (24)$$

où:

$$f_s(\theta, \varphi') = \frac{4w}{\pi D} \frac{\sin(k(D-d)(\sin \theta \cos \varphi' + (1 - \cos \theta) \operatorname{tg} \alpha)/4)}{\sin \theta \cos \varphi' + (1 - \cos \theta) \operatorname{tg} \alpha}, \quad (25)$$

$$\Phi(\theta, \varphi') = k \frac{D+d}{4} (\sin \theta \cos \varphi' + (1 - \cos \theta) \operatorname{tg} \alpha) - k(1 - \cos \theta) \left(z_N + \frac{d \operatorname{tg} \alpha}{2} \right), \quad (26)$$

$$IFR_M = \frac{IFR_E + IFR_H}{2} \quad (27)$$

et

$$IFR_D = \frac{IFR_E - IFR_H}{2} \quad (28)$$

et D est le diamètre du réflecteur principal, d le diamètre du réflecteur auxiliaire, w la largeur des supports et $k = 2\pi/\lambda$ le nombre d'ondes. La composante copolaire et la composante contrapolaire dans le cas d'une polarisation circulaire sont:

$$f_{sN}^{CP,co}(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N f_s(\theta, \varphi - \varphi_n) \exp(j\Phi(\theta, \varphi - \varphi_n)) IFR_M \quad (29)$$

$$f_{sN}^{CP,cross}(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N f_s(\theta, \varphi - \varphi_n) \exp(j\Phi(\theta, \varphi - \varphi_n)) IFR_D \exp(\mp j2\varphi_n), \quad (30)$$

où le signe $-$ s'applique à la polarisation circulaire dextrogyre et le signe $+$ à la polarisation circulaire lévogyre. Les expressions sont légèrement plus simples pour la polarisation circulaire que pour la polarisation rectiligne, équation (23) et équation (24), et les différences sont examinées dans les sections suivantes. Le diagramme correspondant aux éléments des supports équation (25) est déterminé par une intégrale sur la projection du support sur le plan de l'ouverture du réflecteur principal. Le diagramme tient compte de l'angle α que les supports forment avec le plan de l'ouverture de sorte que les maxima des champs rayonnés par les supports se produisent sur des cônes de diffraction, à raison d'un cône par support.

L'axe du cône de diffraction d'un support est le long du support et le demi-angle est égal à α . A proximité de l'axe de visée de l'antenne, le cône peut être représenté approximativement par le plan traversant la perpendiculaire de l'axe de visée à la projection du support et la diffusion provenant de deux supports opposés s'ajoute. La largeur des supports w est supposée être petite de sorte que le rayonnement provenant du support est équidirectif dans le plan perpendiculaire qui n'est pas trop éloigné de l'axe de visée. Le diagramme de diffusion par les supports est très étroit dans le plan d'un support, $\varphi = \varphi_n$, où l'espace angulaire entre premiers zéros n'est que de quelques degrés.

Le premier terme de la phase du diagramme correspondant aux éléments des supports, équation (26) peut varier très rapidement mais sa variation ralentira à proximité des maxima de diffusion par les supports et sera égale à zéro aux maxima. Le paramètre z_n dans le deuxième terme de la phase est la hauteur de la fixation du support au bord du réflecteur auxiliaire mesurée depuis le plan contenant l'ouverture du réflecteur principal. L'IFR moyen et l'IFR différentiel, équation (27) et équation (28), remplacent dans les expressions du champ en polarisation rectiligne et en polarisation circulaire le rapport du champ induit IFR_E pour le vecteur champ électrique parallèle à l'axe du support et le rapport du champ induit IFR_H pour le vecteur champ magnétique parallèle à l'axe du support. Des solutions exactes pour les IFR existent pour les cylindres circulaires. Sinon, les équations intégrales à deux dimensions doivent être résolues.

3 Examen de la diffusion par les supports

Dans certains modèles d'antennes de station terrienne, les supports sont fixés au réflecteur principal, bien à l'intérieur de celui-ci. Par conséquent, l'intégration sur les projections des supports sur l'ouverture du réflecteur principal supposée dans l'équation (25) ne devrait pas être étendue jusqu'au bord du réflecteur principal. Par ailleurs, le masquage par les supports du champ du réflecteur auxiliaire illuminant le réflecteur principal doit être ajouté. Il est plus complexe d'analyser précisément ce masquage dit par ondes sphériques. La contribution dominante à cette diffusion est analogue à la diffusion par les supports en ondes planes calculée par les équations (23) à (30), avec des modifications qui dépendent des paramètres géométriques de l'antenne. Pour éviter cette complication, l'intégration jusqu'au bord du réflecteur principal dans l'équation (25) a été retenue et on a combiné les contributions de diffusion par les supports en ondes planes et en ondes sphériques. Une comparaison des équations (23) et (24) en polarisation rectiligne et des équations (29) et (30) en polarisation circulaire fait apparaître une différence importante entre polarisation rectiligne et polarisation circulaire. Si l'on néglige l'influence du diagramme correspondant aux éléments des

supports, la copolarisation en polarisation rectiligne, (équation (23)) présente une variation en azimuth, fonction de la différence du rapport du champ induit IFR_D entre les deux polarisations rectilignes alors que la copolarisation en polarisation circulaire, (équation (29)) n'est fonction que du rapport du champ induit moyen, IFR_M , des deux polarisations rectilignes. En polarisation circulaire, le terme polarisation rectiligne avec une variation en azimuth de copolarisation fait partie de la polarisation croisée, (équation (30)). Ainsi, l'additivité des champs des contributions au brouillage, qui est supprimée en polarisation circulaire si les angles de phase δ_R et δ_L de l'Annexe 1 sont égaux à $\pm 90^\circ$, est une propriété inhérente de la copolarisation en polarisation rectiligne dans l'équation (23).

Dans les modèles d'antennes de station terrienne actuellement disponibles, les supports sont alignés sur les plans à $\pm 45^\circ$ où les diagrammes correspondant aux éléments des supports adjacents dans une configuration à quatre pieds sont identiques, et le terme en cosinus de l'équation (23) ainsi que la polarisation croisée en polarisation rectiligne, (équation (24)) et en polarisation circulaire, (équation (30)) s'annulent. Sinon, dans le cas d'une polarisation rectiligne, avec une polarisation parallèle ou perpendiculaire à la projection des supports, les plans à $\pm 45^\circ$ seraient les plans des maxima de polarisation croisée par les supports. Dans des conditions de fonctionnement normal, l'arc géostationnaire devrait être aligné sur le plan 0° du diagramme, ce qui favorise la configuration des supports à quatre pieds par rapport à celle à trois pieds dans laquelle un support serait perpendiculaire à l'arc géostationnaire.

Le modèle décrit a été établi à partir des champs projetés sur le réflecteur principal. Il prévoit de lentes variations de phase des contributions importantes associées au diagramme à proximité de l'axe de visée de l'antenne, ce qui indique que les performances de l'antenne principale ne seront pas très sensibles aux tolérances dimensionnelles qui risquent d'être imprévisibles compte tenu des très grandes structures d'antenne en terme de longueur d'onde que l'on utilise habituellement.

4 Exemples types avec diffusion par les supports en bande des 6/4 GHz

La Fig. 5 illustre le phénomène de diffusion par quatre supports dans le plan contenant l'une des paires de supports. Les dimensions des réflecteurs sont les suivantes: diamètre du réflecteur principal $D = 9,5$ m, rapport $f/D = 0,5$ et diamètre du réflecteur auxiliaire $d = 1,22$ m. Le diamètre des supports circulaires est de 6 cm, la polarisation est circulaire et la fréquence est de 6,425 GHz. On suppose que les supports sont situés dans un plan de l'ouverture passant par le foyer principal. Dans la réalité, le diamètre des supports d'antenne de station terrienne peut être de plus de 6 cm⁶. La Figure, côté gauche, montre l'amplitude de la diffusion copolaire et contrapolaire par les supports, calculée à l'aide des équations (29) et (30) et à l'aide d'un logiciel général d'antennes à réflecteur. Ce logiciel utilise également l'approximation IFR mais calcule plus précisément le champ incident sur les supports et intègre numériquement les courants le long de chaque support. Les petits cercles correspondent aux résultats obtenus avec le logiciel général. Il n'y a pas de différence significative entre les deux ensembles de champs copolaires représentés en traits pleins et de champs contrapolaires représentés en pointillés. L'enveloppe recommandée pour les lobes latéraux est donnée pour référence. La diffusion copolaire par les supports coupe cette enveloppe à environ $\theta = 4^\circ$. Il ne faut pas oublier qu'en dehors du plan de la Fig. 5, la diffusion par les supports diminuera et atteindra des niveaux bien inférieurs situés dans une fourchette de moins de 1° . Toutefois, il ressort de la Fig. 5 que, même dans le cas où les sections transversales des supports sont petites, il y a des parties de l'espace à proximité du faisceau principal où la propagation du champ est dominée par la diffusion due aux supports. Dans ces parties limitées de l'espace, il n'est

⁶ Les grosses antennes de station terrienne peuvent avoir de très gros supports: une antenne Cassegrain de 34 m peut avoir trois supports de 10 cm sur 76 cm, un bonnet triangulaire et une plaque en dents de scie pour diffuser le rayonnement par les supports à grand angle. Une antenne Cassegrain de 36,6 m avec un réflecteur auxiliaire de 2,8 m a quatre supports de 12,7 cm sur 53,3 cm.

pas nécessairement possible de respecter l'enveloppe recommandée pour les lobes latéraux et, comme on le montrera dans le paragraphe suivant, les systèmes à polarisation rectiligne double seront plus touchés que les systèmes à polarisation circulaire double. La courbe de droite illustre les phases du diagramme correspondantes. Comme dans la Fig. 3, il y a un décalage de phase fixe, car le modèle simple ne tient pas compte de la longueur du trajet kf depuis la source d'alimentation jusqu'à l'ouverture du réflecteur principal. Pour le modèle simple et pour le logiciel général, la diffusion contrapolaire par les supports précède d'environ 130° la diffusion copolaire alors que des valeurs de $\pm 90^\circ$ auraient été préférables.

La Fig. 6 est la même que la Fig. 5 sauf que les supports forment maintenant des angles α de 45° avec l'ouverture du réflecteur principal et sont fixés au bord du réflecteur auxiliaire à l'emplacement du foyer principal. Les supports coupent et traversent la surface du réflecteur principal afin de tenir compte de la diffusion par les supports des ondes sphériques. Les résultats sont très semblables à ceux de la Fig. 5 et viennent étayer les observations faites à la fin du § 3 selon lesquelles le modèle n'est pas très sensible à la précision de position des supports. L'angle d'inclinaison des supports provoque une scission de la diffusion due à la paire des supports perpendiculaire en deux cônes distincts de sorte que la diffusion par les supports croît lentement avec θ et reste en dessous de l'enveloppe des lobes latéraux. La variation de phase est légèrement plus lente que dans la Fig. 3 et l'avance de phase de 130° est conservée.

La Fig. 6 côté gauche montre le champ total calculé à l'aide du modèle (traits pleins) et à l'aide du logiciel général d'antennes à réflecteur (traits pleins avec de petits cercles). Pour le logiciel général les supports ont été légèrement déplacés vers l'avant afin qu'ils ne coupent pas la surface du réflecteur principal. Le champ du réflecteur principal, le diagramme avec masquage par le réflecteur auxiliaire ainsi que la copolarisation et la polarisation croisée due aux supports sont indiqués par diverses lignes en pointillés ou tiretées. Il y a compatibilité entre les deux champs totaux représentés en traits pleins jusqu'à environ $\theta = 4^\circ$, cas dans lequel l'hypothèse d'un réflecteur principal plat prise dans le modèle de l'ouverture n'est plus valable. Pour des angles θ plus grands, le rayonnement par le réflecteur principal semble provenir du bord qui est situé à environ 1,2 m au-dessus de l'ouverture du réflecteur principal. La courbe de droite compare la phase du champ total calculé et la polarisation croisée due aux supports calculée à l'aide du logiciel général d'antennes à réflecteur. Au-delà de $\theta = 4^\circ$, les maxima de rayonnement du réflecteur principal et le rayonnement copolaire par les supports sont comparables en amplitude et en quadrature de phase de sorte que les zéros du diagramme sont complètement remplis. De tels diagrammes sont typiques de réflecteurs dont les supports dans le plan (E-) sont perpendiculaires à un support. La solution préférée consiste à utiliser l'antenne de station terrienne sans support perpendiculaire à l'arc géostationnaire. On évite alors totalement le problème. La Fig. 7 compare la copolarisation et la polarisation croisée par les supports dans le plan le plus défavorable dans une configuration à quatre pieds avec trois sections transversales différentes des supports:

- supports circulaires de 6 cm de diamètre (traits pleins et pointillés avec petits cercles),
- supports carrés de 6 cm de côté (traits pleins et pointillés avec petits cercles), et
- supports rectangulaires de 6 cm sur 12 cm dont le petit côté fait face au réflecteur principal (ligne tiretée et ligne tiretée pointillée).

La diffusion par des supports carrés ou rectangulaires est plus importante que la diffusion par des supports circulaires. Toutefois, il aurait été plus juste de faire une comparaison entre supports ayant la même section transversale. La polarisation croisée est la plus faible pour les supports carrés mais la phase est moins intéressante. Plus la hauteur des supports rectangulaires augmente, plus le niveau de polarisation croisée augmente. Certains éléments donnent à penser que les supports triangulaires,

en particulier ceux dont la base pointe vers le réflecteur principal, peuvent avoir d'excellentes propriétés en matière de radiofréquence RF pour ce qui est de la polarisation croisée et de la température d'antenne.

4.1 Comparaison pour le cas le plus défavorable entre brouillage par les supports en liaison montante causé par un système à polarisation rectiligne double et par un système à polarisation circulaire double

On considère une configuration des supports à quatre pieds, l'alignement avec l'arc géostationnaire étant le plus défavorable possible. Par hypothèse, les supports sont circulaires, d'un diamètre de 6 cm, la fréquence est de 6,4 GHz et la diffusion par les supports (paire verticale des supports) est la contribution dominante. Les valeurs approximatives des rapports du champ induit sont $IFR_E = -1,22 + j 0,22$ et $IFR_H = -0,78 - j 0,22$.

Dans le cas d'une polarisation rectiligne double, le vecteur champ électrique incident, par hypothèse, est aligné avec les supports et les champs de diffusion sont proportionnels à IFR_H et IFR_E , c'est-à-dire $E_{HH} \propto IFR_H$, $E_{HV} = 0$, $E_{VV} \propto IFR_E$ et $E_{VH} = 0$. La diffusion par les supports de la station terrienne aux bornes de polarisation horizontale et verticale de l'antenne du satellite est alors proportionnelle à $|E_{HH}|^2 + |E_{VH}|^2 \propto |IFR_H|^2 = 0,66$ et $|E_{VV}|^2 + |E_{HV}|^2 \propto |IFR_E|^2 = 1,54$.

Dans le cas d'une polarisation circulaire double, les champs correspondants diffusés par les supports sont proportionnels à $E_{RH} \propto 1/\sqrt{2} IFR_H$, $E_{RV} = -j/\sqrt{2} IFR_V$, $E_{LH} \propto 1/\sqrt{2} IFR_H$ et $E_{LV} = j/\sqrt{2} IFR_H$. La diffusion par les supports de la station terrienne aux bornes de polarisation horizontale et verticale de l'antenne du satellite est alors proportionnelle à $|E_{RH}|^2 + |E_{LH}|^2 = |E_{RH}|^2 + |E_{LV}|^2 \propto 1/2 |IFR_H|^2 + 1/2 |IFR_E|^2 = 1,10$.

La diffusion par les supports de la station terrienne en polarisation circulaire double donne un brouillage identique aux deux bornes de l'antenne du satellite en polarisation rectiligne. Dans le cas d'une diffusion par les supports de la station terrienne en polarisation rectiligne double, on observe qu'à la borne de réception de l'antenne du satellite, l'une correspond au cas le plus défavorable et l'autre au cas optimal. Le brouillage moyen par les supports est égal au brouillage causé par le système adjacent à polarisation circulaire double. La dégradation de la borne correspondant au cas le plus défavorable causée par un système adjacent à polarisation rectiligne double est de 1,46 dB par rapport au brouillage moyen. Le problème du système adjacent à polarisation rectiligne double se pose car la diffusion par les supports, dans le cas considéré, n'affecte que les champs copolaires et a un effet additif au niveau des champs et non au niveau des puissances. Pour les cas considérés dans l'Annexe 1, l'addition des champs n'intervient que pour des combinaisons défavorables et des diagrammes de phase d'antenne copolaire et contrapolaire.

5 Possibilité de mesurer la relation de phase entre les composantes copolaire et contrapolaire

Les niveaux de polarisation croisée qui devraient être mesurés sont faibles par rapport aux maxima copolaires de l'antenne. L'antenne est grande en dimensions et en longueurs d'onde. Il faudrait une distance de mesure importante, au moins $2D^2/\lambda$ soit environ 3,5 km, pour une antenne de 9 m à 6,4 GHz. Les erreurs de mesure, notamment celles dues aux réflexions sur le sol nuiraient beaucoup à l'exactitude recherchée notamment pour les mesures de phase. On ne dispose pas facilement d'une fourchette de valeurs en champ proche pour les dimensions de l'antenne spécifiées. Il ne semble pas commode d'utiliser un satellite pour effectuer des mesures du diagramme de phase. Il faudrait mettre au point de nouvelles techniques précises de mesure du diagramme de phase pour de grands systèmes d'antenne. Pour ces raisons, la méthode analytique retenue a été préférée car elle devrait permettre d'avoir une meilleure interprétation physique de l'effet considéré.

On considère qu'un programme de mesure autonome poserait plus de problèmes qu'il n'apporterait de solutions. Les résultats obtenus pourraient ne concerner que les antennes mesurées et ne pas avoir de validité générale.

6 Autres types d'antennes de station terrienne (antennes à réflecteur à alimentation décalée)

Les grandes stations terriennes de satellite sont généralement des systèmes d'antenne à réflecteur double à alimentation décalée. Les microstations utilisent des systèmes d'antenne à réflecteur à alimentation décalée plus petits. Ces systèmes d'antenne offrent l'avantage de ne pas masquer le faisceau et n'ont pas les éventuels problèmes indiqués ci-dessus. Dans le cas d'une polarisation rectiligne, le fait que l'alimentation soit décalée nuit au XPD. Il n'y a pas de dégradation dans le cas d'une polarisation circulaire mais le faisceau est dévié vers la droite pour une polarisation circulaire dextrogyre et vers la gauche pour une polarisation circulaire lévogyre.

Pour des antennes à réflecteur à alimentation centrale avec des supports étroits ou des antennes à réflecteur à alimentation décalée on observe, en quelque sorte, l'inverse en ce qui concerne la polarisation rectiligne et la polarisation circulaire:

- il n'y a pas de dégradation de polarisation croisée dans le cas d'un réflecteur à alimentation centrale pour une polarisation rectiligne perpendiculaire ou parallèle aux supports mais les performances copolaires sont moins bonnes lorsque la polarisation est parallèle à un support. En polarisation circulaire comme en polarisation rectiligne lorsque le vecteur polarisation forme un angle oblique avec un support, les performances copolaires et contrapolaires sont moins bonnes;
- il n'y a pas de dégradation de polarisation croisée dans le cas d'un réflecteur à alimentation décalée pour une polarisation circulaire mais le faisceau copolaire est dévié dans des directions opposées pour les deux sens de polarisation circulaire. Pour la polarisation rectiligne, les performances contrapolaires sont moins bonnes.

En polarisation circulaire, ces antennes présentent une très faible polarisation croisée. Il ne peut donc pas y avoir d'augmentation du niveau du brouillage cumulatif causé par un système adjacent à polarisation circulaire à un système à polarisation rectiligne par rapport au brouillage causé par un système à polarisation rectiligne parfaitement aligné.

ANNEXE 3

Brouillage entre réseaux à satellite à polarisation double faiblement espacés fonctionnant dans les bandes des 6/4 GHz lorsque les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouillé et/ou des réseaux brouilleurs ne sont pas égales (cas asymétrique)

1 Objet

La présente Annexe expose en détail les résultats de simulations effectuées pour évaluer la différence entre les niveaux de brouillage causé à un réseau à polarisation rectiligne double par un réseau adjacent à polarisation rectiligne double et un réseau adjacent à polarisation circulaire double lorsque les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouillé et/ou des réseaux brouilleurs ne sont pas égales (cas asymétrique). Ce cas peut se produire concrètement lorsque le réseau brouillé et/ou le réseau brouilleur émettent avec des porteuses à forte densité de puissance dans un sens de polarisation et des porteuses à faible densité de puissance dans l'autre sens de polarisation.

2 Analyse

Les équations vectorielles génériques définies dans l'Annexe 1 de la présente Recommandation ont été utilisées pour évaluer le niveau des vecteurs champ électrique incidents aux bornes de sortie de l'antenne en liaison montante et en liaison descendante. Différents cas de différence d'intensité des signaux du réseau brouillé et/ou des réseaux brouilleurs ont été examinés. Les hypothèses utilisées dans ces simulations correspondant aux valeurs types des stations terriennes et des satellites fonctionnant dans les bandes des 6/4 GHz sont résumées dans le Tableau 2.

TABLEAU 2

Paramètres de l'analyse

Espacement orbital des engins spatiaux ⁽¹⁾ (degrés)	2
Fréquence centrale en liaison montante (GHz)	6,175
Fréquence centrale en liaison descendante (GHz)	3,950
Diamètre de l'antenne de la station au sol (m)	4,5
Gain d'antenne de la station au sol (dB)	$[20 \log_{10}(\pi D/\lambda)] - 1,5$
XPD (Total antenne d'émission et antenne de réception) (dB)	28
Diagramme des lobes latéraux copolaires de l'antenne de la station au sol (dBi)	$29 - 25 \log \theta$
Diagramme des lobes latéraux contrapolaires de l'antenne de la station au sol (dBi)	$19 - 25 \log \theta$

⁽¹⁾ L'espacement orbital topocentrique effectif entre les stations spatiales vu depuis la station au sol a été pris égal à 2,2°.

Deux cas ont été examinés:

- Premièrement, le cas où les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouillé et du réseau brouilleur ne sont pas égales.
- Deuxièmement, le cas où uniquement les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouillé ne sont pas égales.

Dans les deux cas, la polarisation du réseau brouillé est supposée rectiligne et les niveaux de brouillage ont été calculés pour un réseau brouilleur à polarisation rectiligne double et pour un réseau brouilleur à polarisation circulaire double. Le niveau de brouillage a été évalué par rapport au signal de plus faible intensité du réseau brouillé. Lorsque les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouillé et du réseau brouilleur ont été prises, par hypothèse, égales et qu'on a considéré que la polarisation des deux réseaux était rectiligne, on a supposé que le signal de plus faible intensité avait la même polarisation dans les deux réseaux. Le niveau de brouillage a été calculé séparément pour la liaison montante et pour la liaison descendante.

3 Résultats

Les résultats des simulations sont illustrés dans les Fig. 8 à 11.

FIGURE 8

Rapports totaux porteuse/brouillage (C/I) en liaison montante dans le cas d'un brouillage causé à un réseau à polarisation rectiligne double par un réseau adjacent à polarisation rectiligne double et un réseau adjacent à polarisation circulaire double lorsque les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouillé et du réseau brouilleur ne sont pas égales

(Asymétrie entre le réseau utile et le réseau brouilleur en liaison montante)

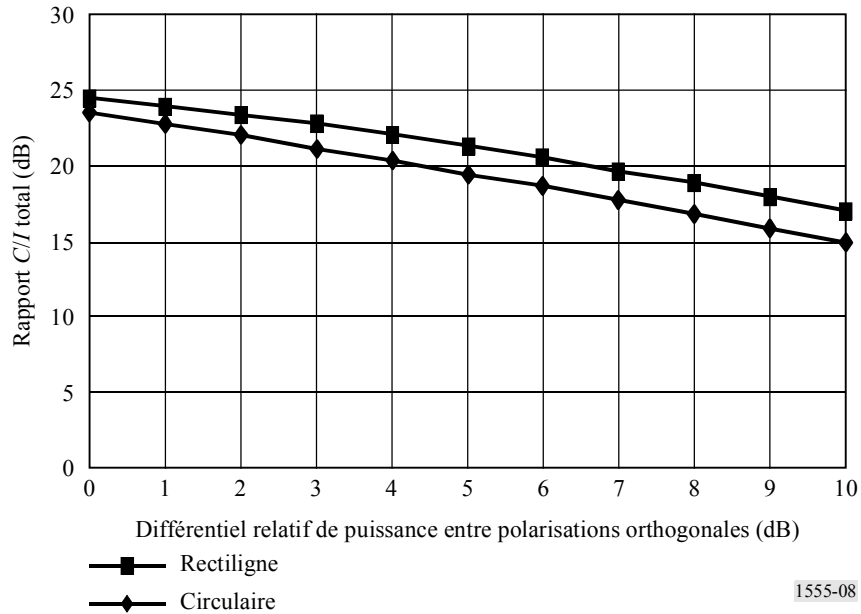


FIGURE 9

Rapports totaux C/I en liaison descendante dans le cas d'un brouillage causé à un réseau à polarisation rectiligne double par un réseau adjacent à polarisation rectiligne double et un réseau adjacent à polarisation circulaire double lorsque les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouilleur et du réseau brouillé ne sont pas égales

(Asymétrie entre le réseau utile et le réseau brouilleur en liaison descendante)

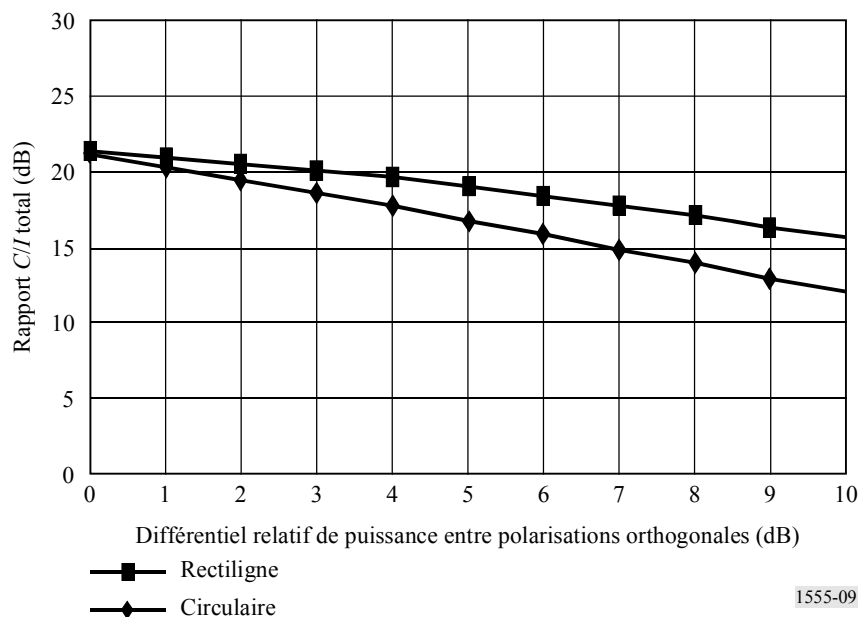


FIGURE 10

Rapports totaux C/I en liaison montante dans le cas d'un brouillage causé à un réseau à polarisation rectiligne double par un réseau adjacent à polarisation rectiligne double et un réseau adjacent à polarisation circulaire double lorsque les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouilleur sont égales et les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouillé ne sont pas égales
(Niveaux utiles uniquement en liaison montante (cas asymétrique))

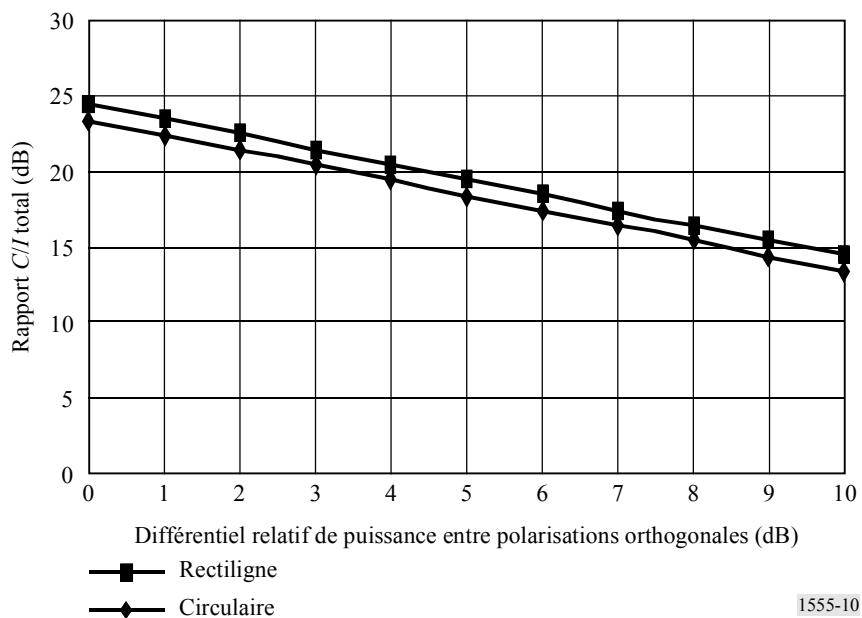
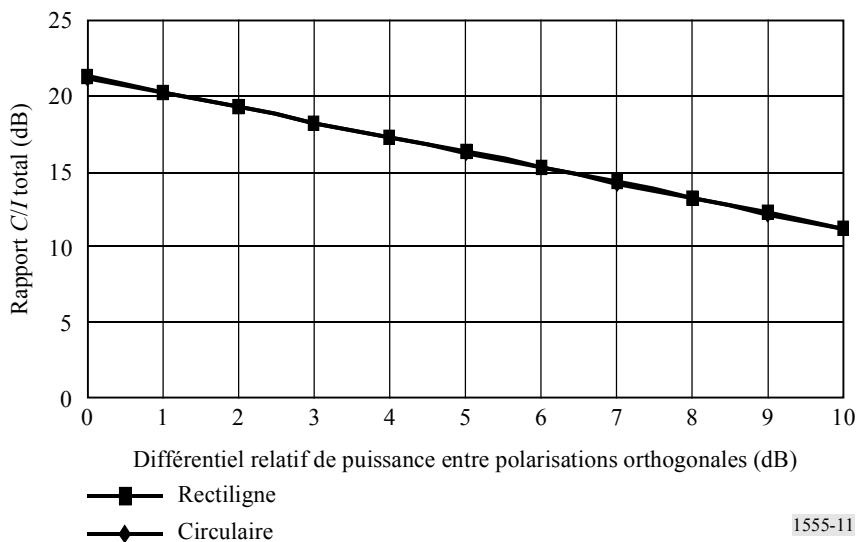


FIGURE 11

Rapports totaux C/I en liaison descendante dans le cas d'un brouillage causé à un réseau à polarisation rectiligne double par un réseau adjacent à polarisation rectiligne double et un réseau adjacent à polarisation circulaire double lorsque les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouilleur sont égales et les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouillé ne sont pas égales
(Niveaux utiles uniquement en liaison descendante (cas asymétrique))



Il ressort de l'analyse des résultats que:

- Pour la liaison montante, il n'y a pas de différence significative entre les niveaux de brouillage cumulatif causé à un réseau à polarisation rectiligne par un réseau adjacent à polarisation rectiligne ou un réseau adjacent à polarisation circulaire dans tous les cas considérés.
- Pour la liaison descendante, il n'y a pas de différence significative entre les niveaux de brouillage cumulatif causé à un réseau à polarisation rectiligne par un réseau adjacent à polarisation rectiligne ou un réseau adjacent à polarisation circulaire lorsque les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouilleur sont égales. Cela est indépendant des intensités relatives des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouillé.
- Pour la liaison descendante, il y a une différence entre les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouilleur et du réseau brouillé, il y a une différence entre le niveau de brouillage cumulatif causé à un réseau à polarisation rectiligne par un réseau à polarisation rectiligne et un réseau adjacent à polarisation circulaire. Le niveau de brouillage cumulatif causé au signal de plus faible puissance du réseau utile à polarisation rectiligne par un réseau adjacent à polarisation circulaire serait plus élevé que celui causé par un réseau à polarisation rectiligne.

Dans ce dernier cas, d'autres simulations ont été effectuées pour évaluer comment combler cette différence. La puissance d'émission du réseau brouilleur à polarisation circulaire a été réduite de façon à ce que le niveau de brouillage causé au réseau utile soit le même que celui causé à un réseau brouilleur à polarisation rectiligne double. Pour ce faire, on a procédé en deux temps: premièrement les intensités des deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouilleur à polarisation circulaire ont été réduites afin de maintenir le même différentiel relatif de puissance pour les deux polarisations du réseau brouillé et deuxièmement les intensités des deux signaux du réseau brouilleur ont, elles aussi, été réduites afin de maintenir le même niveau de puissance pour les deux polarisations. La réduction nécessaire de la puissance d'émission en fonction du différentiel relatif de puissance des deux signaux à polarisation orthogonale est illustrée dans la Fig. 12.

4 Conclusion

En appliquant les équations élaborées précédemment, on a pu évaluer le brouillage relatif causé par un réseau brouilleur à polarisation circulaire double et à polarisation rectiligne double à un réseau à polarisation rectiligne double. Pour tous les cas, sauf en liaison descendante lorsque le réseau utile et le réseau brouilleur fonctionnent avec un différentiel de puissance entre leurs deux polarisations orthogonales, on a démontré qu'il y a peu de différence, voire aucune, dans le niveau de brouillage causé. Dans ce cas, on a démontré qu'il est possible de ramener le brouillage causé par le réseau à polarisation circulaire au même niveau que le brouillage causé par un réseau à polarisation rectiligne en réduisant la puissance d'émission des deux signaux du réseau brouilleur. Il est possible de mettre en oeuvre cette réduction tout en maintenant le même différentiel de puissance entre les deux signaux à polarisation orthogonale du réseau brouilleur et du réseau brouillé ou en ayant des puissances égales pour les deux polarisations du réseau brouilleur.

FIGURE 12

Réduction nécessaire de la puissance d'émission en fonction du différentiel de puissance relatif des deux signaux à polarisation orthogonale pour qu'il y ait le même niveau de brouillage dans le réseau utile que dans un réseau brouilleur à double polarisation rectiligne

