

## RECOMMANDATION UIT-R SF.1008-1\*

**POSSIBILITÉS D'UTILISATION PAR DES STATIONS SPATIALES DU SERVICE FIXE  
PAR SATELLITE D'ORBITES LÉGÈREMENT INCLINÉES PAR RAPPORT  
À L'ORBITE DES SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES DANS DES BANDES  
UTILISÉES EN PARTAGE AVEC LE SERVICE FIXE**

(1994-1995)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) qu'après la cessation du maintien en position nord-sud, l'inclinaison orbitale des stations spatiales théoriquement géostationnaires a «naturellement» tendance à augmenter pour atteindre une valeur maximale d'environ  $\pm 15^\circ$  par rapport au plan de l'équateur, à raison initialement d'environ  $0,9^\circ$  par an au maximum;
- b) que l'utilisation d'orbites légèrement inclinées par rapport à l'orbite des satellites géostationnaires (OSG) peut s'avérer intéressante dans le service fixe par satellite (SFS) pour prolonger la vie utile des stations spatiales;
- c) que le recours aux orbites inclinées peut être prévu au stade de la planification des réseaux à satellites;
- d) qu'un satellite peut être placé sur une orbite initialement inclinée, de telle sorte que son inclinaison commence d'abord par diminuer jusqu'à s'annuler, puis augmente;
- e) que les opérations du SFS imposent elles-mêmes des contraintes qui, dans la plupart des cas, limitent l'inclinaison utilisable sur les réseaux du SFS à des valeurs nettement inférieures à la limite naturelle mentionnée au § a);
- f) que le nombre de stations spatiales du SFS qui utiliseront des orbites légèrement inclinées sera, en pratique, peu élevé;
- g) que les systèmes du SFS dont les stations sont placées sur des orbites inclinées, et dont les émissions sont conformes aux limites de puissance surfacique indiquées dans la Recommandation UIT-R SF.358 risqueraient de brouiller des systèmes de Terre, en exposant un nombre accru de stations de Terre à un brouillage direct, mais que toutes les stations du service fixe ainsi touchées ne seront pas associées au seul et même réseau de Terre;
- h) que, pour préserver l'étendue de la zone desservie, la tolérance de pointage des stations spatiales devra sans doute ne pas dépasser une valeur convenablement choisie par rapport à la direction initiale du faisceau, mais que dans ces conditions, les angles d'incidence au niveau des stations de Terre et les angles par rapport à l'axe principal de l'antenne seront différents des valeurs observées dans le cas des satellites géostationnaires;
- j) qu'en dépit du fait que la qualité de bout en bout des réseaux de Terre ne soit pas nécessairement affectée dans tous les cas par la valeur de l'inclinaison, la probabilité que différents bonds le soient croît en fonction de l'inclinaison;
- k) que les réseaux existants du service fixe exploités dans la plupart des bandes de fréquences partagées avec le SFS sont parvenus à maturité et que, dans la plupart des pays, leur fonctionnement, évitant les directions azimutales de brouillage potentiel, repose sur l'hypothèse suivant laquelle les stations spatiales occupent leur position nominale sur l'OSG;
- l) que les effets sur les stations spatiales sur orbite inclinée des stations terrestres du service fixe observant les limites définies dans la Recommandation UIT-R SF.406 en ce qui concerne les stations spatiales placées sur l'OSG, dépendent de l'inclinaison;
- m) que tout renforcement des exigences en matière d'évitement de l'orbite limiterait fortement le pourcentage de l'horizon visible pour les futures installations du service fixe (voir les Fig. 4a et 4b);
- n) que l'utilisation d'une orbite inclinée peut entraîner l'extension de la zone de coordination d'une station terrestre;
- o) que les stations terrestres associées à des stations spatiales du SFS sur des orbites légèrement inclinées peuvent utiliser des dispositifs de poursuite,

---

\* Les Commissions d'études 4 et 9 des radiocommunications ont apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2000 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 44.

*recommande*

1 qu'une station spatiale émettrice d'un réseau du SFS, ayant une fréquence assignée sur l'OSG et censée fonctionner sans maintien en position nord-sud pendant une partie de sa vie utile sur orbite soit lancée avec une inclinaison initiale dont la valeur en degrés soit au moins égale à la plus petite des deux valeurs suivantes (Note 3):

1.1  $N - 5^\circ$  où  $N$  est le nombre d'années pendant lesquelles la station doit fonctionner sans maintien en position nord-sud; ou

1.2  $5^\circ$ ;

2 que l'accord des administrations affectées soit recherché, au cas où il est prévu qu'une station spatiale émettrice du réseau du service fixe fonctionnera sous une inclinaison orbitale supérieure à  $5^\circ$ . Provisoirement, une administration est dite affectée dans les cas suivants:

2.1 en conséquence directe d'une inclinaison orbitale supérieure à  $5^\circ$ , le satellite pourrait illuminer une station fixe située dans sa zone sous un angle d'élévation inférieur à  $5^\circ$ . Cela ne concerne pas les stations fixes depuis lesquelles le satellite est visible sous un angle d'élévation inférieur à  $5^\circ$ , lorsque l'inclinaison orbitale de ce satellite est inférieure ou égale à  $5^\circ$ , et

2.2 si la puissance surfacique des émissions du satellite dirigées vers une station fixe présentant les caractéristiques définies au § 2.1 ci-dessus doit atteindre les valeurs indiquées à la Fig. 1 dans des conditions de propagation par temps clair;

3 que les stations spatiales du service fixe placées sur des orbites légèrement inclinées par rapport à l'OSG continuent à observer les dispositions de la Recommandation UIT-R SF.358, quelle que soit leur position sur l'orbite;

4 que les systèmes du service fixe continuent à observer les dispositions de la Recommandation UIT-R SF.406 concernant l'OSG;

5 que les stations terriennes soient coordonnées ou, si nécessaire, fassent l'objet d'une nouvelle coordination, en tenant compte du niveau de poursuite indispensable afin de s'adapter à l'utilisation d'orbites inclinées;

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

NOTE 1 – Les Recommandations UIT-R SF.358 et UIT-R SF.406 comportent des valeurs voisines de celles qui sont indiquées respectivement à l'Article S21 du Règlement des radiocommunications (RR). Les valeurs indiquées dans le RR sont à observer en priorité.

NOTE 2 – Les données de maintien en position et de pointage des faisceaux, présentées conformément aux dispositions de l'Appendice S4 du RR devraient faire état de toute utilisation prévue d'une orbite légèrement inclinée.

NOTE 3 – Un lancement sur orbite avec inclinaison initiale désigne un lancement ayant pour effet de placer un engin spatial sur une orbite circulaire géosynchrone dont les paramètres nominaux provoqueront, après insertion de l'engin sur cette orbite, et sans aucune correction d'inclinaison, la diminution progressive de l'inclinaison orbitale, son annulation et enfin son accroissement.

NOTE 4 – Le § 2 ci-dessus ne s'applique pas aux stations spatiales dont l'exploitation sur une orbite légèrement inclinée est antérieure au 31 décembre 1993 ou a été notifiée avant cette date.

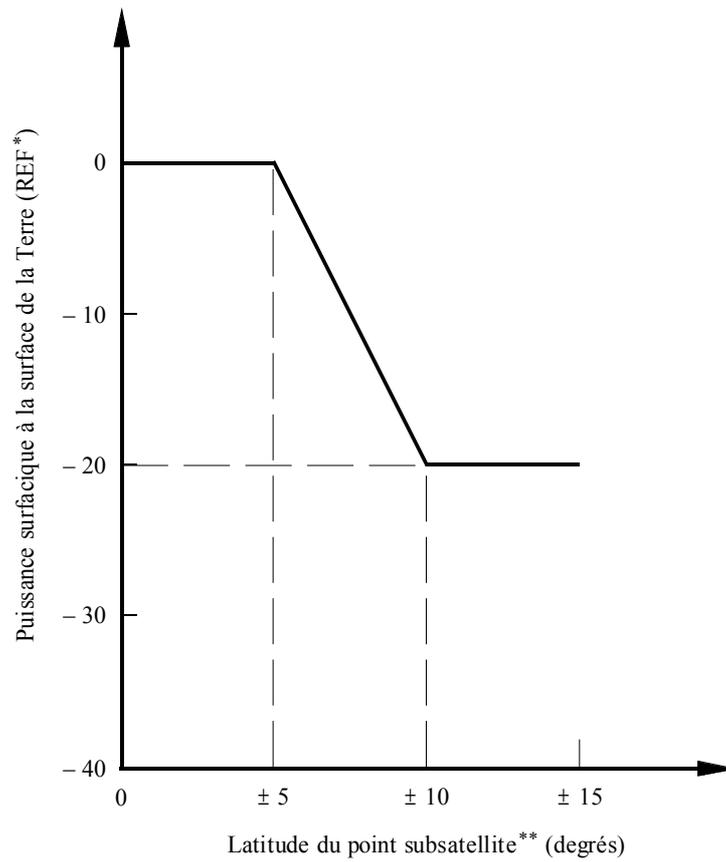
NOTE 5 – La question du partage des bandes de fréquences entre le service fixe et le SFS utilisant des orbites légèrement inclinées par rapport à l'orbite des satellites géostationnaires est étudiée à l'Annexe 1.

NOTE 6 – Même si le seuil de coordination représenté à la Fig. 1 est respecté, il y a une probabilité non négligeable de brouillage sur les bords de Terre avec des antennes à gain élevé pointées dans des directions azimutales correspondant à la visibilité des orbites inclinées dont l'angle d'inclinaison est inférieur à  $10^\circ$ .

NOTE 7 – La Recommandation UIT-R S.743 traite de la coordination entre réseaux à satellites utilisant des satellites en orbites géostationnaires légèrement inclinées d'une part et entre ces réseaux et les réseaux à satellites en orbite géostationnaire non inclinée d'autre part.

NOTE 8 – Selon le nombre de satellites sur orbite légèrement inclinée visés par le § 2.1 ci-dessus qui interviennent dans un système donné du faisceau hertzien à bords multiples, il peut être difficile de respecter les objectifs de disponibilité et de qualité de fonctionnement définis dans la Recommandation UIT-R SF.615. Des études complémentaires doivent être entreprises à ce sujet.

FIGURE 1  
Seuil de coordination défini au § 2



\* La valeur REF correspond à la limite définie dans la Recommandation UIT-R SF.358.

\*\* Il convient d'utiliser la valeur correspondant à la latitude du point subsatellite au moment où le satellite coupe la ligne de visée de l'antenne de la station fixe.

## **Partage des fréquences entre le service fixe et le service fixe par satellite utilisant des satellites sur orbites légèrement inclinées par rapport à l'orbite des satellites géostationnaires**

### **1 Introduction**

Pour prolonger la durée de vie utile des satellites géostationnaires sur orbite, il existe deux stratégies, reposant sur le fait que cette vie utile dépend en grande partie du propergol servant au maintien en position nord-sud, qui consomme dix fois plus de propergol que dans le sens est-ouest.

- Si un satellite géostationnaire a presque épuisé son propergol de maintien en position, tout en fonctionnant correctement par ailleurs, on peut prolonger beaucoup sa vie utile sur l'orbite si le propergol qui lui reste est réservé au maintien en position en longitude.
- Un satellite destiné à une mission géostationnaire est placé en orbite inclinée au début de son exploitation, mais l'on choisit les paramètres de l'orbite afin d'assurer en l'absence de corrections, une diminution progressive de son inclinaison, jusqu'à ce qu'elle devienne équatoriale. Cette inclinaison continuera à croître, à moins que du propergol ne soit consommé pour compenser l'attraction du Soleil et de la Lune. Cette stratégie permet de maintenir un satellite sur orbite circulaire géosynchrone d'inclinaison relativement faible avec un volume de propergol initial moins important que celui qu'exigerait une orbite initialement géostationnaire.

En ce qui concerne les brouillages entre systèmes à satellites géostationnaires et entre faisceaux hertziens de Terre et systèmes à satellites géostationnaires, le RR ne couvre pas actuellement le cas où l'orbite s'écarte nettement de l'orbite des satellites géostationnaires, mais il est clair que son inclinaison a une incidence sur ces types de brouillage.

### **2 Interaction station spatiale/station de Terre**

#### **2.1 Géométrie de l'orbite**

##### **2.1.1 Eclairage de portions de la surface terrestre initialement non éclairées**

Les Fig. 2a et 2b montrent l'accroissement de la surface terrestre qui sera en visibilité directe d'un satellite situé nominalelement en (0,0) et qui dériverait pour se placer sur une orbite inclinée, par exemple, de 5° et 15° respectivement. Les surfaces ombrées représentent les zones éclairées supplémentaires. Bien que ces extensions couvrent essentiellement les régions polaires, les «cornes» est-ouest couvrent des latitudes assez basses.

Certains récepteurs de faisceaux hertziens de Terre qui, en raison de la courbure de la Terre, sont cachés par rapport à l'OSG ou du moins ne la voient pas tout entière risquent de se trouver en visibilité directe de satellites sur orbite inclinée.

#### **2.2 Zones orbitales affectant des stations de faisceaux hertziens**

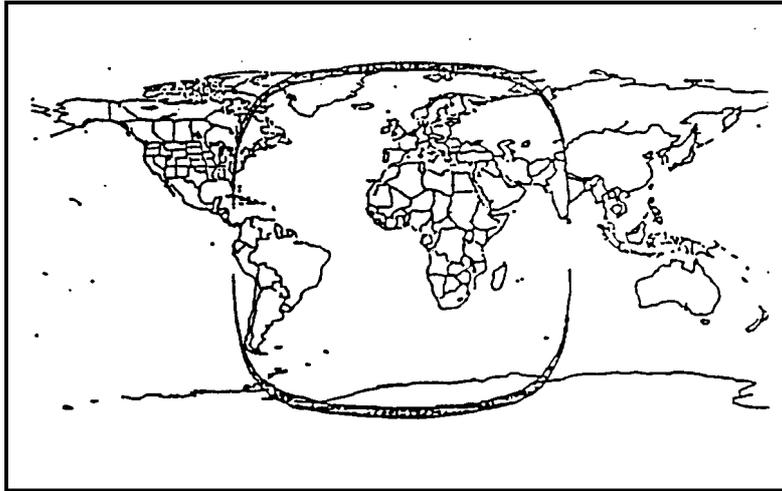
La Fig. 3 présente une carte du ciel sur 360° d'azimut pour un emplacement situé à la latitude de 50° N. Ce schéma représente l'OSG telle qu'elle est vue de la station de faisceau hertzien et montre comment la bande où les satellites peuvent apparaître au cours d'une période de 24 h s'élargit en fonction de l'angle d'inclinaison. La zone incurvée ombrée qui entoure l'OSG représente la région où il est recommandé de ne pas pointer les faisceaux hertziens, soit 2° de part et d'autre de l'OSG pour les stations qui fonctionnent dans la bande 1-10 GHz (numéro S21.2.1 du RR).

Les tracés en forme de 8 figurent la trajectoire des satellites, espacés de 10° sur l'OSG, au cours d'une période de 24 h. Les arcs représentent les sommets et les bases des 8 parcours quand on se trouve dans le cas le plus critique, c'est-à-dire quand tous les satellites sur l'OSG suivent des orbites inclinées de 5°, 10° ou 15°.

La Fig. 3 illustre parfaitement la situation dans laquelle les satellites jusque-là invisibles pour la station de Terre deviennent visibles au-dessus de l'horizon.

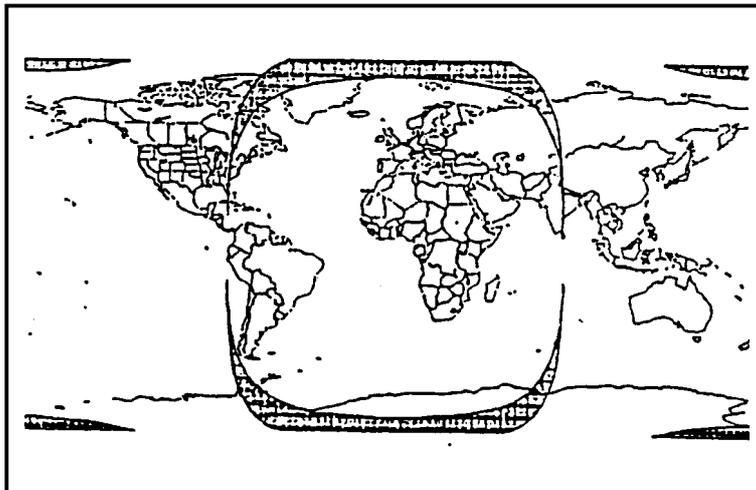
La Figure montre aussi comment s'accroît la zone d'exposition directe des faisceaux hertziens aux satellites, et inversement, les dimensions de cette zone dépendant directement de l'emplacement. On en trouvera une illustration à la Fig. 4a qui montre la variation en fonction de la latitude. Il convient de noter que, dans le cas de liaisons bidirectionnelles avec deux antennes pointées en sens opposés, on considérera les zones d'exposition directe de l'une au moins des deux antennes (voir la Fig. 4b).

FIGURE 2a  
Augmentation de l'illumination de la surface de la Terre  
(inclinaison de  $5^{\circ}$ )



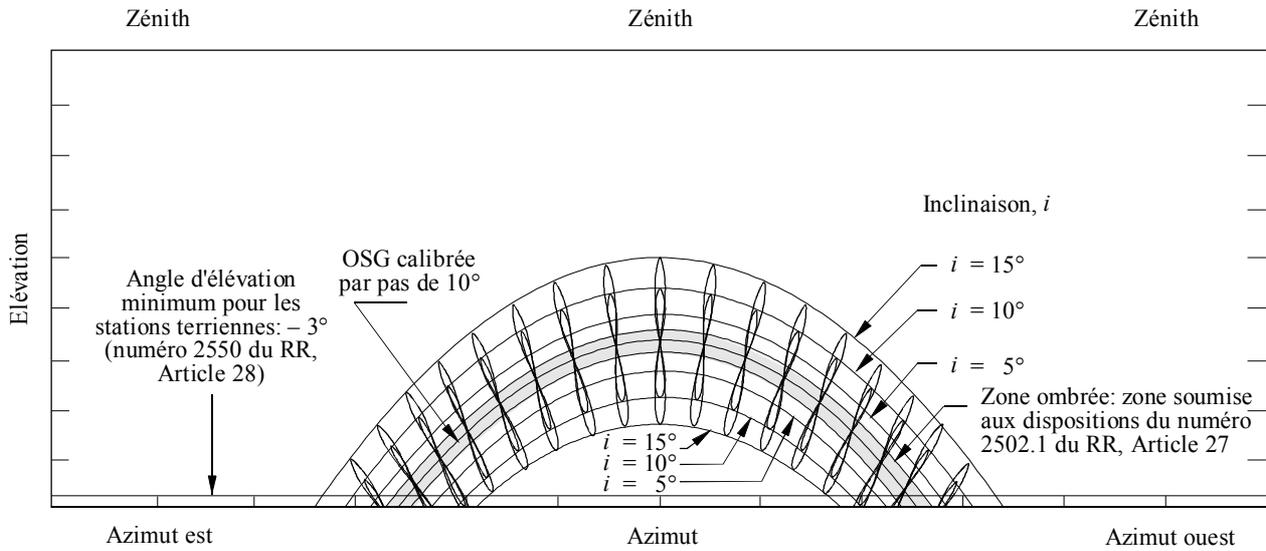
D02

FIGURE 2b  
Augmentation de l'illumination de la surface de la Terre  
(inclinaison de  $15^{\circ}$ )



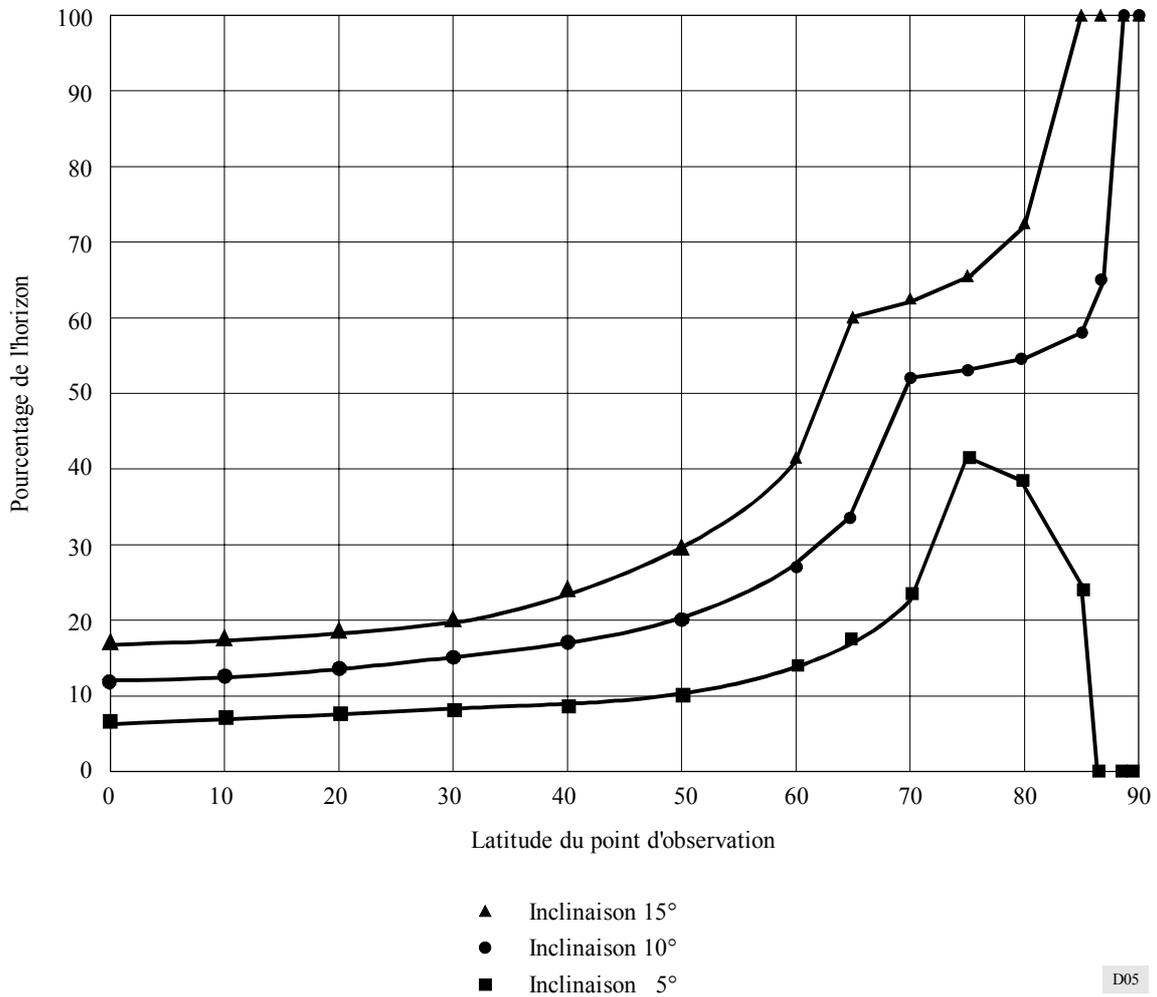
D03

FIGURE 3  
 Vue générale de l'OSG et des bandes orbitales  
 (latitude avoisinant 50° N)



D04

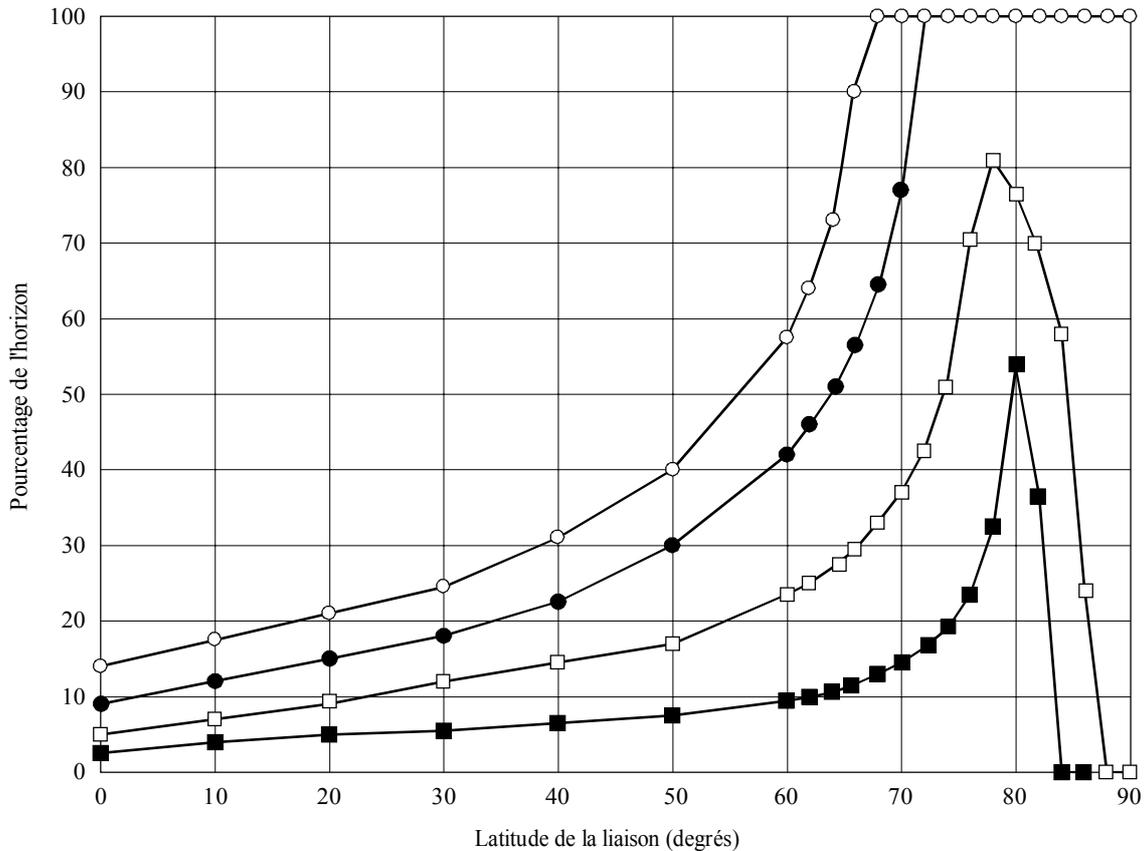
FIGURE 4a  
 Pourcentage de l'horizon où l'orbite inclinée est visible pour le récepteur d'une station de Terre



D05

FIGURE 4b

Pourcentage de l'horizon où l'orbite inclinée est visible pour l'une ou l'autre extrémité d'un «bond» de Terre bidirectionnel



- Inclinaison 2°
- Inclinaison 5°
- Inclinaison 10°
- Inclinaison 15°

D06

## 2.3 Brouillage des stations de Terre par des stations spatiales

### 2.3.1 Introduction

L'évaluation du partage entre les systèmes du SFS et ceux du service fixe lorsque l'orbite des satellites des premiers est légèrement inclinée, est une chose complexe. Il ne faut pas oublier que du fait de l'inclinaison orbitale, certaines stations de Terre risquent de se trouver directement exposées aux satellites pendant des périodes de temps qui dépendent du degré de l'inclinaison et du pointage des antennes des faisceaux hertziens. Il ne faut pas oublier non plus que, toujours en raison de l'inclinaison orbitale, certaines parties du réseau de Terre exposées à un surcroît de brouillage seront quant à elles protégées du brouillage à certains moments. Il se peut néanmoins que l'exposition des systèmes numériques dure longtemps même si elle est nettement inférieure à celle qui se produit lorsque les satellites ne sont pas inclinés.

Le présent paragraphe contient les résultats de plusieurs études qui analysent l'indisponibilité du système, l'exposition au brouillage et le brouillage global subi par un circuit fictif de référence.

### 2.3.2 Modèle d'indisponibilité des systèmes

Pour simplifier, on ne considérera que le brouillage dans le lobe principal et on calculera ses effets au moyen d'un diagramme de gain d'antenne rectangulaire. Un satellite brouille un récepteur de Terre donné si l'azimut du point où il passe à l'horizon est compris dans l'intervalle de  $\pm 0,5^\circ$  par rapport à l'azimut de l'axe de visée de l'antenne de réception.

Le satellite brouille le récepteur tant qu'il se trouve entre l'horizon et  $1^\circ$  au-dessus de l'horizon. Le rapport  $\delta$  du Tableau 1 indique combien de temps cela dure. Pour un satellite dont la déclinaison le fait passer à l'horizon avec une valeur donnée de la différence de longitude,  $\delta$  correspond à l'angle d'élévation qui résulte d'une augmentation de déclinaison de  $1^\circ$ . Pour simplifier, le terme «déclinaison» désigne dans le présent paragraphe la latitude de la projection du satellite à la surface de la Terre.

TABLEAU 1

**Brouillage sur Terre causé par des satellites géostationnaires  
avec un espacement orbital de  $3^\circ$**

a) *Inclinaison orbitale de  $5^\circ$*

	$\lambda_S$	$Z_S$	$\delta$	$100 P_I$	$100 P_u$	$100 P_{nu}$
Latitude du récepteur brouillé (degrés N)	Intervalles des longitudes de visibilité (degrés)	Intervalles des azimuts de visibilité (degrés)	Degrés d'élévation par degré de déclinaison	Pourcentage de bonds avec récepteurs exposés au brouillage	Pourcentage du temps où un bond brouillé est indisponible	Pourcentage du temps où une liaison à 50 bonds est indisponible
20	3,70	10,78	0,35	1,4	0,1429	0,098
30	5,88	11,73	0,51	2,2	0,0980	0,107
40	8,59	13,33	0,65	3,2	0,0769	0,122
50	12,32	16,04	0,78	4,6	0,0641	0,146
60	18,33	21,10	0,88	6,8	0,0568	0,193

b) *Inclinaison orbitale de  $10^\circ$*

	$\lambda_S$	$Z_S$	$\delta$	$100 P_I$	$100 P_u$	$100 P_{nu}$
Latitude du récepteur brouillé (degrés N)	Intervalles des longitudes de visibilité (degrés)	Intervalles des azimuts de visibilité (degrés)	Degrés d'élévation par degré de déclinaison	Pourcentage de bonds avec récepteurs exposés au brouillage	Pourcentage du temps où un bond brouillé est indisponible	Pourcentage du temps où une liaison à 50 bonds est indisponible
20	7,5	22	0,35	2,8	0,071	0,10
30	12	23,5	0,51	4,4	0,049	0,11
40	17,5	27	0,65	6,5	0,038	0,12
50	25	32,5	0,78	9,3	0,032	0,15
60	37,5	43	0,88	13,9	0,028	0,20

Pour faciliter les calculs, on suppose que les déclinaisons d'un satellite sur orbite inclinée sont distribuées de façon uniforme. Cela revient à admettre que la variation de la déclinaison dans le temps correspond à une fonction triangulaire et non sinusoidale. Cette supposition diminue le temps d'exposition des récepteurs concernés dont les antennes sont pointées le plus loin du point où l'OSG croise l'horizon, mais elle simplifie sensiblement les statistiques pour le calcul de l'indisponibilité du réseau.

### 2.3.2.1 Calcul de l'indisponibilité

Considérons une station radioélectrique de Terre qui fonctionne à une certaine latitude en présence de satellites qui sont tous sur des orbites d'inclinaison  $\alpha_m = 10^\circ$ . On peut déterminer  $\lambda_S$ , intervalle des longitudes d'où peut provenir un brouillage observable pour une latitude et une inclinaison données. Cet intervalle augmente de façon presque linéaire avec l'angle inclinaison. On peut aussi déterminer  $Z_S$ , intervalle des azimuts sur lequel un brouillage sera observable. Comme  $Z_S$  est plus grand que  $\lambda_S$ , les satellites paraîtront plus écartés en azimut que leur séparation orbitale nominale. Par conséquent, sur l'arc  $\lambda_S$  chaque satellite apparaîtra comme une source de brouillage distincte.

Pour des satellites espacés de  $S$  degrés sur l'OSG, le nombre de brouilleurs possible  $N_S$  est donné par:

$$N_S = \frac{\lambda_S}{S} \quad (1)$$

Comme les trajets de Terre sont bidirectionnels et qu'il y a des brouilleurs à la fois à l'est et à l'ouest du sud, la probabilité  $P_I$  pour qu'un bond subisse un brouillage est donnée, en négligeant la largeur du faisceau de l'antenne de réception et en supposant que la distribution angulaire des directions du trajet dans le réseau de Terre est uniforme, par:

$$P_I = \frac{N_S}{90} = \frac{\lambda_S}{90 S} \quad (2)$$

Pour un trajet dont l'antenne de réception est pointée dans un azimut qui s'écarte au plus de  $0,5^\circ$  de l'azimut où un satellite franchit l'horizon, on peut déterminer la fraction de temps pendant laquelle le trajet subit un brouillage. Comme le satellite prend deux fois par jour la même déclinaison, il passe  $12/\alpha_m$  heures par jour dans chaque tranche de déclinaison de  $1^\circ$ . L'augmentation de l'angle d'élévation par degré de déclinaison,  $\delta$ , est normalement inférieure à 1, et dépend plus de la latitude que de la différence de longitude rapportée au satellite. On peut donc adopter une valeur moyenne représentative de  $\delta$  pour la latitude du trajet. Cela étant, la durée pendant laquelle le satellite reste entre l'horizon et une élévation de  $1^\circ$  au-dessus de l'horizon est donnée par  $12/\delta\alpha_m$  et la fraction de temps  $f_I$  pendant laquelle le trajet est exposé au brouillage est donnée par:

$$f_I = \frac{1}{2\delta\alpha_m} \quad (3)$$

Pour évaluer l'effet d'un brouillage qui arrive sous un faible angle d'élévation, supposons que les satellites envoient vers les récepteurs de Terre la puissance surfacique maximale admissible, soit  $-152$  dB(W(m<sup>2</sup>/4 kHz)). Pour un faisceau hertzien numérique de Terre dont la largeur de bande de bruit est de 15 MHz, la surface de captation de 10 m<sup>2</sup> et le rendement de 80%, la puissance de brouillage reçue pourrait être égale à  $-77$  dBm ( $-152 + 30 + 36 + 9$ ).

Actuellement, la plupart des signaux de satellites brouilleurs sont de plus faible puissance. A titre d'exemple, prenons un seul signal vidéo avec dispersion dans une largeur de bande de 3 MHz qui produit un brouillage de réception de  $-84$  dBm. A l'entrée du récepteur, la puissance de bruit du système, due au bruit thermique et au bruit du récepteur correspondant à un facteur de bruit de 3 dB, serait égale à  $-99$  dBm. Le brouillage aura donc pour effet d'abaisser de 15 dB la marge du récepteur contre les évanouissements causés par le bruit thermique.

Un faisceau hertzien numérique type dans la bande des 4 GHz a une marge d'évanouissement vis-à-vis du bruit thermique comprise entre 40 et 44 dB. En prenant la valeur centrale de 42 dB, le brouillage réduirait la marge à 27 dB. Si le faisceau hertzien numérique est équipé d'une régulation automatique de la puissance d'émission (RAPE) et fonctionne à un niveau de puissance nominal inférieur de 12 dB au maximum, la marge effective du récepteur contre les évanouissements serait 15 dB. Sur un trajet de Terre, des évanouissements de cet ordre de grandeur varient généralement lentement et ne sont pas dispersifs. On peut s'attendre qu'un trajet subisse des évanouissements de cette profondeur pendant 0,2% à 2,0% du temps. Pour les besoins du présent calcul, on prendra 0,5% comme pourcentage représentatif du temps pendant lequel le trajet est rendu indisponible lorsque le brouillage est présent. La probabilité  $P_u$  pour qu'un bond brouillé soit indisponible s'obtient à partir de l'équation (3) par la formule:

$$P_u = \frac{5 \times 10^{-3}}{2\delta\alpha_m} \quad (4)$$

Pour le conduit numérique fictif de référence (CNFR) qui, en principe, comprend 50 bonds distincts, la Recommandation UIT-R F.557 précise les objectifs d'indisponibilité. Les sources de brouillage qui agissent sur les différents bonds constituant un circuit sont distinctes et indépendantes, comme le sont les évanouissements qui provoquent l'indisponibilité. Cela étant, l'indisponibilité de réseau ou de circuit,  $P_{nu}$ , qui résulte des brouillages est donnée par:

$$P_{nu} = 50 P_I P_u \quad (5)$$

ou, d'après les équations (2), (4) et (5):

$$P_{nu} = \frac{\lambda_S \times 10^{-2}}{7,2 S \delta \alpha_m} \quad (6)$$

Le Tableau 1 donne les valeurs des caractéristiques et des probabilités qui correspondent au cas où l'inclinaison des satellites est égale à  $10^\circ$ . On notera que l'indisponibilité du réseau est plus de 10 fois plus grande que les objectifs prescrits par la Recommandation UIT-R SF.615 pour l'ensemble des sources de brouillages. En outre, on suppose qu'il n'existe aucune corrélation temporelle entre la fréquence des évanouissements et la présence de brouillage. Il s'ensuit que les calculs correspondent à des moyennes annuelles et qu'il se peut qu'il soit encore plus difficile de satisfaire aux objectifs de qualité de fonctionnement pour un mois quelconque définis dans la Recommandation UIT-R SF.615.

On pourrait penser qu'une indisponibilité aussi importante provient de ce qu'on a choisi une forte valeur d'inclinaison orbitale; en fait, l'indisponibilité est presque indépendante de l'inclinaison. L'intervalle des longitudes est en relation linéaire avec la gamme des déclinaisons. L'indisponibilité du réseau est donc indépendante de  $\alpha_m$ . Si on diminue l'inclinaison orbitale maximale  $\alpha_m$ , on réduit la proportion des bonds qui subissent un brouillage,  $P_I$ , mais on augmente la fraction du temps pendant laquelle un bond qui subit le brouillage est indisponible  $P_u$ . En outre, la diminution des séparations orbitales des satellites augmente à la fois  $P_I$  et  $P_u$ . Etant donné que la largeur de faisceau de l'antenne réceptrice a été négligée dans le calcul de  $P_I$ , l'indisponibilité calculée est représentative de l'utilisation d'orbites à grand angle d'inclinaison. Tous les satellites sur l'orbite ne rayonneront pas forcément à la puissance surfacique limite de  $-152 \text{ dB(W(m}^2/4 \text{ kHz))}$ . Ils n'occupent pas non plus uniformément toute la bande de fréquences.

Toutefois, les spécifications de qualité de fonctionnement applicables à une section numérique de CNFR de qualité supérieure n'autorisent pas toujours l'exposition directe de n'importe quel récepteur terrestre. D'après les chiffres de la colonne 5 des Tableaux 1a) et 1b), l'accroissement de l'inclinaison orbitale aura pour effet d'augmenter le nombre de récepteurs affectés, dont l'immobilisation pourra s'avérer nécessaire, afin de remplir les conditions requises quant à la qualité de fonctionnement du réseau. De plus, il peut s'avérer nécessaire de se conformer aux spécifications de performance d'une section numérique en matière de brouillage. Or, la valeur de l'inclinaison orbitale maximale risque d'affecter la qualité de fonctionnement.

### 2.3.2.2 Conséquences des faibles inclinaisons orbitales

Il est nécessaire d'étudier plus en détail les conséquences d'angles d'inclinaison assez petits pour que l'intervalle de visibilité en azimut,  $Z_S$ , soit comparable à l'ouverture du faisceau d'antenne. Si les orbites ne sont pas inclinées, la fraction du nombre de récepteurs de Terre exposés à des brouillages dans le faisceau principal, dépend de l'angle apparent,  $\epsilon$ , sous lequel l'OSG coupe l'horizon géométrique d'un observateur terrestre. Pour des satellites espacés de  $3^\circ$ , la fraction  $n_0$  du nombre des antennes de réception à lobes carrés ( $1^\circ$  sur  $1^\circ$ ) qui sont exposées au brouillage, aux latitudes considérées, est donnée par:

$$n_0 = \frac{1}{180 S \sin \epsilon} \quad (7)$$

dans l'hypothèse où les antennes sont uniformément distribuées, en angle et en emplacement, le long d'un parallèle du globe.

Le Tableau 2 donne des valeurs représentatives de  $n_0$ , qui indiquent la proportion des récepteurs de Terre auxquels il faut s'intéresser spécialement pour faciliter le partage des bandes de fréquences. La fraction supplémentaire du nombre de récepteurs qui seraient affectés, par degré d'inclinaison maximale de l'orbite, s'obtient en divisant la demi-probabilité pour qu'un bond soit exposé au brouillage par l'inclinaison orbitale maximale,  $0,5 P_I / \alpha_m$ , soit:

$$n_{\alpha_m} = \frac{\lambda_S}{180 S \alpha_m} \quad (8)$$

Le Tableau 2 montre que les inconvénients du partage sont à peu près multipliés par deux aux latitudes supérieures à  $20^\circ$  pour les inclinaisons orbitales inférieures à  $1^\circ$ . Il faut noter que les chiffres figurant dans les deux colonnes sont inversement proportionnels aux espacements orbitaux des satellites.

Les résultats du Tableau 2 montrent que le nombre de récepteurs de Terre qui seraient exposés à des brouillages augmente avec l'inclinaison orbitale. Cela indique qu'il faut limiter l'inclinaison des orbites. Il convient d'étendre l'étude à des modèles d'antennes de réception de Terre plus généralisés pour savoir s'il faut imposer des restrictions plus sévères à l'inclinaison pour ramener la proportion de récepteurs de Terre affectés à une valeur convenable et la gêne subie à un niveau acceptable.

### 2.3.3 Brouillage global sur un circuit fictif de référence

Pour les récepteurs du service fixe (SF), les satellites géostationnaires se présentent généralement comme des sources ponctuelles de brouillage fonctionnant en des positions orbitales assignées fixes. Dans des études antérieures, fondées sur des modèles informatisés de la méthode de Monte Carlo, on a calculé les brouillages que le SF peut subir de la part de stations spatiales fixes du SFS, en faisant un certain nombre d'hypothèses paramétriques.

Pour étudier les conséquences globales de cette configuration géométrique qui évolue avec le temps, on a mis en œuvre un modèle, en tenant compte, d'une part de caractéristiques réelles de faisceaux hertziens et, d'autre part, de l'occupation totale de l'orbite par des satellites espacés de  $3^\circ$  et produisant chacun la puissance surfacique admissible pour tous les angles d'arrivée. On a en outre adapté le modèle pour permettre la simulation du cas où chaque satellite est placé sur une orbite géosynchrone inclinée, choisie de façon aléatoire (angles d'inclinaison de  $0^\circ$  à  $15^\circ$ ).

TABLEAU 2

**Pourcentage de récepteurs de Terre soumis à des brouillages dans leur lobe principal  
causés par des stations spatiales avec des espacements orbitaux de 3°**

	100 $n_0$	100 $n_{\alpha_m}$
Latitude du récepteur brouillé (degrés N)	Pourcentage des récepteurs exposés à des brouillages dans leur lobe principal, pour des orbites non inclinées	Pourcentage supplémentaire de récepteurs affectés, par degré d'inclinaison orbitale
20	0,20	0,14
30	0,21	0,22
40	0,24	0,32
50	0,29	0,46
60	0,37	0,69

Pour cette étude, on a fait passer sur ordinateur le programme du modèle ci-dessus afin de déterminer le niveau moyen des brouillages que subirait le SF à diverses latitudes et pour différentes directions de trajet lorsque les stations spatiales du SFS présentent des inclinaisons orbitales comprises dans un certain intervalle. De cette étude, il ressort qu'à toute latitude, le brouillage global causé au SF par des satellites du SFS distribués de façon aléatoire sur des orbites géosynchrones inclinées est très peu différent de celui qu'on aurait si tous les satellites étaient sur l'orbite géostationnaire. Les Fig. 5a et 5b résument les résultats fournis par un passage du programme effectué au cours de l'étude. Ils comparent, pour des trajets de faisceaux hertziens situés aux environs de la latitude 40°, les distributions de probabilité de brouillage du SF par des satellites du SFS sur orbites inclinées à 0° et 15°. Dans le cas de la Fig. 5a, on a choisi une direction de trajet d'environ 77°, qui donne les plus forts brouillages. On voit que dans ce cas le SF est moins brouillé, en moyenne, pour une inclinaison de 15°.

D'autres passages en ordinateur (voir la Fig. 5b) donnent des résultats inverses pour d'autres directions du trajet. On conclut de l'étude qu'à toute latitude et pour toute direction de trajet, le brouillage moyen ne dépend pas de l'inclinaison de l'orbite; mais certains trajets peuvent subir des variations périodiques mesurables du brouillage quand les satellites se déplacent par rapport aux diagrammes d'antennes du SF. On notera toutefois que ces études ne concernent que le niveau relatif de brouillage dû aux satellites du SFS sur orbites inclinées, sans considérer le nombre total des stations du SF qui peuvent être affectées du fait de l'inclinaison.

### 2.3.4 Brouillage global sur un réseau réel du service fixe

Des études ont été consacrées aux conséquences observées sur de grands réseaux du SF dans l'hypothèse où l'utilisation d'orbites géosynchrones présentant différentes inclinaisons serait admise.

#### 2.3.4.1 Etude A

Cette étude a utilisé le réseau transcanadien à 4 GHz reliant Vancouver à Halifax (129 bonds), les satellites recensés étant ceux figurant sur la Liste A établie par l'ex-IFRB en décembre 1988, avec, comme paramètres appropriés, les renseignements fournis par la publication anticipée. Le nombre total des satellites était de 167. La valeur de la p.i.r.e. prise en considération a été calculée d'après la valeur maximale de la puissance surfacique de crête dans une bande de 20 MHz et jusqu'à une puissance maximale de 10 W par 20 MHz.

L'interruption de chaque bond a été calculée en additionnant les brouillages causés par tous les satellites placés sur des orbites diversement inclinées. L'interruption totale de bout en bout a été déterminée en calculant la somme des interruptions pour chaque bond. Cette façon de procéder a permis de calculer la part de l'interruption imputable aux différentes inclinaisons.

On a constaté que la plupart des 129 bonds n'enregistraient pas d'accroissements notables du niveau d'interruption pour des inclinaisons orbitales inférieures à  $\pm 7^\circ$ . Par contre, plusieurs bonds ont fait l'objet de modifications importantes, comportant une diminution ou un accroissement de l'interruption. L'agrégation de bout en bout des interruptions a néanmoins masqué ces variations et présente un accroissement de moins de 5% dans un sens et de 10% environ dans l'autre.

D'après les résultats de cette étude, qui couvre un vaste éventail de situations, une inclinaison orbitale inférieure à  $\pm 7^\circ$  serait en définitive admissible du seul point de vue du brouillage dû aux satellites. Or, différentes considérations, telles que la coordination des stations terriennes et des stations fixes risquent d'imposer des restrictions supplémentaires propres à définir la valeur maximale de l'inclinaison admissible.

FIGURE 5a  
Distribution du brouillage

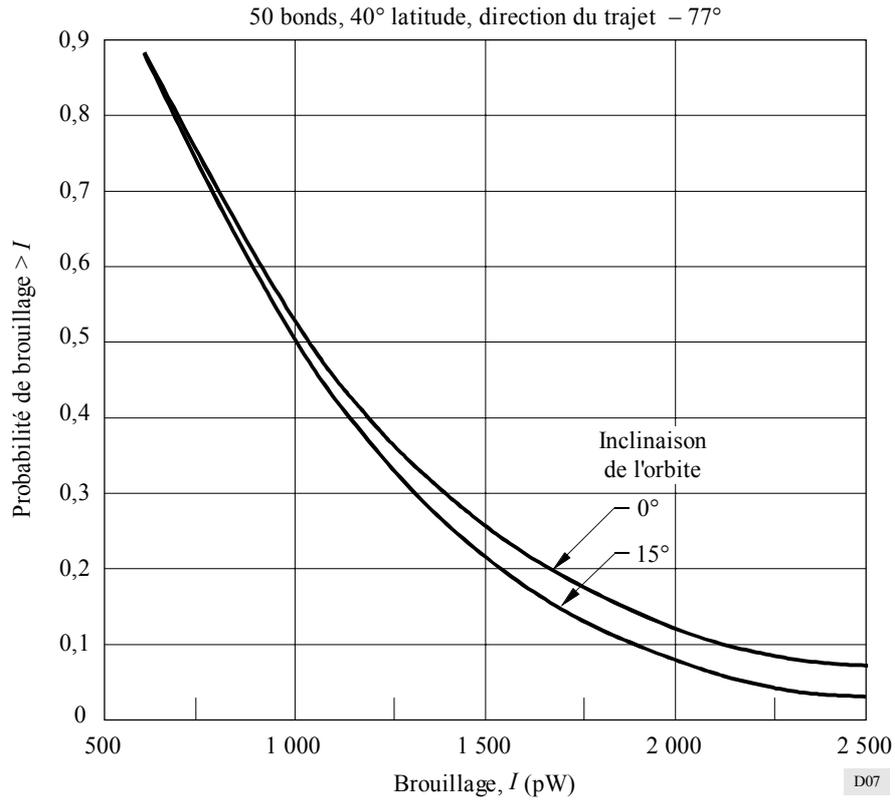
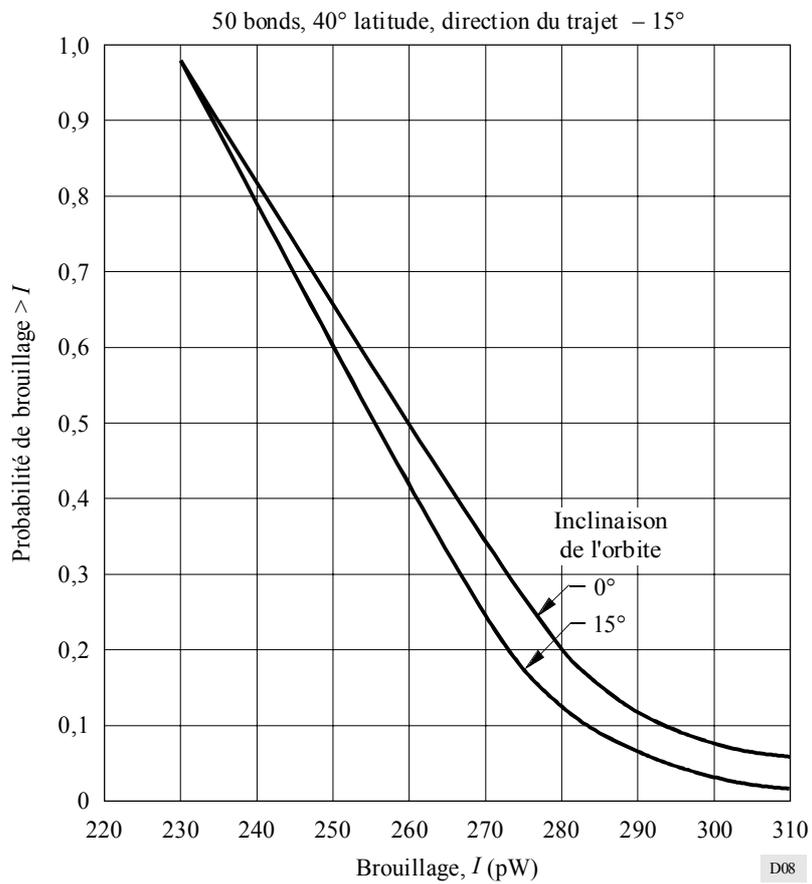


FIGURE 5b  
Distribution du brouillage



2.3.4.2 Etude B

Le modèle de SF pris en considération a été dans ce cas le réseau d'acheminement reliant Tokyo à Osaka et fonctionnant à 4 GHz (61 bonds et 122 antennes). On a supposé que le diagramme de rayonnement des antennes présentait les caractéristiques décrites dans la Recommandation UIT-R F.699 avec  $D/\lambda = 50$ , que la perte de la ligne d'alimentation de l'antenne était de 3 dB et que le bruit du récepteur était de 4 dB. La puissance surfacique maximale de chaque satellite a été choisie conformément aux indications de la Recommandation UIT-R SF.358. Aucun affaiblissement dû à l'atmosphère n'a été pris en considération.

On a supposé que l'inclinaison orbitale des satellites était de  $i^\circ$ . En pareille circonstance, la densité de probabilité  $p(x)$  d'un satellite dont l'orbite est séparée par un angle de  $x^\circ$  de l'OSG peut être calculée approximativement par la formule:

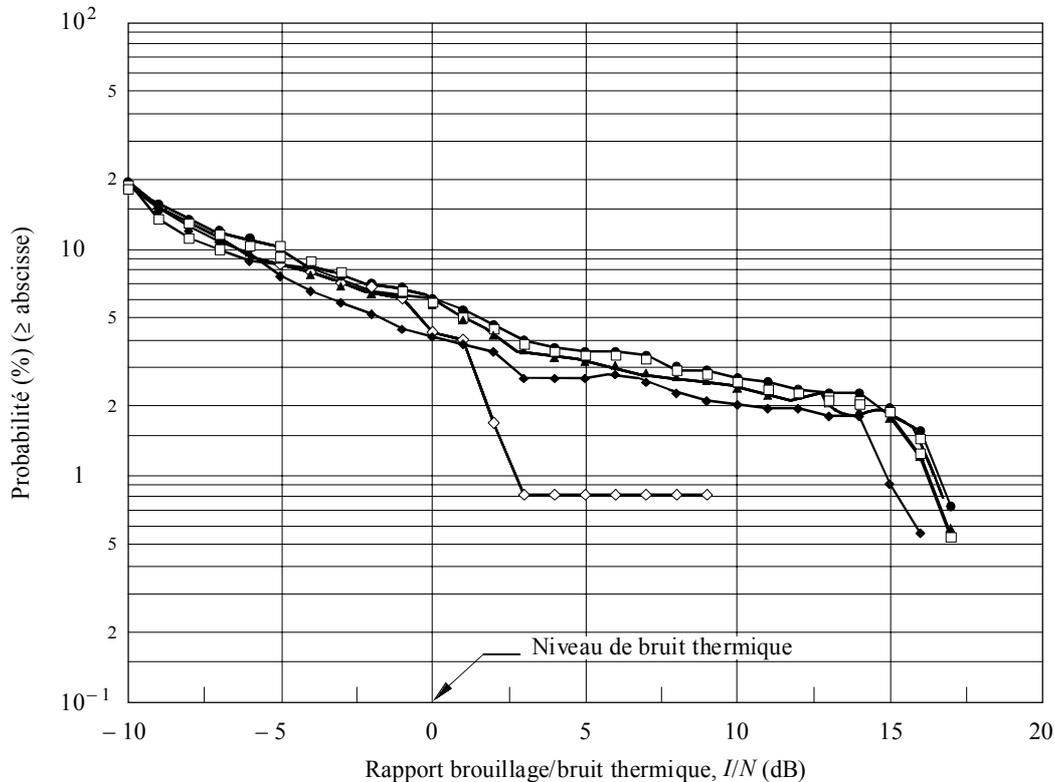
$$p(x) = \frac{1}{\pi\sqrt{i^2 - x^2}} \tag{9}$$

L'angle de séparation entre une antenne d'émission de faisceaux hertziens et l'orbite inclinée a été calculé pour chaque valeur de  $x$ , compte tenu de la réfraction atmosphérique du faisceau d'antenne et de la valeur de la fonction de densité de probabilité  $p(x)$ . L'angle d'élévation de l'horizon a également été pris en considération.

La puissance brouilleuse affectant chaque récepteur de faisceaux hertziens a été calculée à partir du satellite le plus proche.

La Fig. 6 présente les résultats obtenus. Les valeurs portées en abscisse sont celles du rapport brouillage/bruit thermique ( $I/N$ ). On notera que lorsque l'utilisation d'orbites inclinées n'est pas autorisée, la probabilité d'obtention d'un rapport  $I/N$  supérieur à 10 dB est nulle, mais que celle-ci atteint environ 3% pour un angle d'inclinaison de  $2,5^\circ$ . Si l'inclinaison dépasse  $2,5^\circ$ , la probabilité d'obtention d'un rapport  $I/N$  tend à augmenter, mais dans une proportion limitée.

FIGURE 6  
Statistiques de puissance de brouillage dû aux satellites



Inclinaison orbitale:

- ◇—  $0^\circ$
- $2,5^\circ$
- $5^\circ$
- ▲—  $10^\circ$
- $15^\circ$

D'après les résultats ci-dessus, l'exploitation de satellites sur orbite inclinée accroît la probabilité d'obtention de rapports  $I/N$  élevés même si l'angle d'inclinaison est faible, parce que les trajets des faisceaux hertziens ont été planifiés de manière à ce que les antennes de réception ne soient pas pointées vers l'OSG. Toutefois, il convient de noter que les calculs susmentionnés sont quelque peu «pessimistes» en ce sens qu'on suppose pour les calculs que les antennes de réception pointent dans des directions proches des positions longitudinales les plus défavorables des satellites. En conséquence, en situation réelle, l'augmentation du nombre de rapports  $I/N$  élevés sera plus faible.

Compte tenu de divers facteurs, dont le fait que seul un nombre restreint de satellites seront exploités sur orbite inclinée, on conclut que l'exploitation sur orbite inclinée dans une certaine limite devrait être acceptée du point de vue du brouillage causé par les satellites aux faisceaux hertziens.

### 2.3.5 Etude sur l'évaluation statistique du brouillage

#### 2.3.5.1 Introduction

Cette étude représente un essai d'évaluation statistique du brouillage causé à des faisceaux hertziens par des satellites du SFS évoluant sur une orbite légèrement inclinée. Les valeurs utilisées dans cette étude ne correspondent peut-être pas au cas le plus défavorable, mais elles ont été choisies en tant que valeurs types pour des réseaux de faisceaux hertziens opérant dans de nombreux pays. Les effets produits par certains facteurs tels que la diversité d'emplacement et le gain d'antenne sont étudiés au § 2.3.5.4.

#### 2.3.5.2 Modèle de brouillage

##### 2.3.5.2.1 Modèle de faisceau hertzien

Fréquence de fonctionnement:	4 et 11 GHz
Diamètre d'antenne:	3 m (gain = 39,7 dB à 4 GHz; 48,5 dB à 11 GHz)
Température de bruit des récepteurs:	750 K
Pertes dans les lignes d'alimentation:	3 dB
Angle d'élévation des antennes:	0°
Angle d'azimut des antennes:	uniforme dans 360°, sauf pour les directions à moins de 2° ou 1,5° de l'OSG
Diagramme de rayonnement des antennes:	voir la Recommandation UIT-R F.699.

Pour évaluer le brouillage causé par un satellite, on a calculé le rapport brouillage/bruit thermique  $I/N$ . Dans les conditions spécifiées ci-dessus, le rapport  $I/N$  maximum, pour une station de faisceau hertzien exposée directement au brouillage du satellite, est de 15,1 dB à 4 GHz et 17,1 dB à 11 GHz, dans le cas de la propagation en espace libre sans pertes par absorption dans l'atmosphère.

##### 2.3.5.2.2 Modèle de satellite

On admet par hypothèse qu'un seul satellite est présent sur l'orbite légèrement inclinée. Compte tenu de la grande directivité des antennes de faisceaux hertziens, on considère que cette hypothèse est suffisante pour l'évaluation du brouillage étudiée ici.

La latitude et la longitude d'un satellite fonctionnant sur une orbite inclinée sont déterminées à l'aide des formules données dans la Recommandation UIT-R S.743.

Autre hypothèse: le satellite produit à la surface de la Terre la puissance surfacique maximale conforme aux indications de la Recommandation UIT-R SF.358, cela pour tous les angles (voir le § 1.2 du *recommande* pour 4 GHz et le § 1.3 pour 11 GHz).

On admet par ailleurs que la puissance surfacique est constante dans toute la bande passante d'un récepteur du faisceau hertzien.

##### 2.3.5.2.3 Propagation

Afin de simplifier les calculs, on n'a pas tenu compte de la réfraction atmosphérique.

En revanche, on a tenu compte des pertes par absorption dans l'atmosphère dues à l'oxygène et à la vapeur d'eau (valeur type: 7,5 g/m<sup>3</sup>) en fonction de l'angle d'élévation.

L'affaiblissement a été calculé selon la méthode décrite dans la Recommandation UIT-R P.676. Les valeurs effectives sont données dans la Fig. 8.

### 2.3.5.3 Evaluation du brouillage

#### 2.3.5.3.1 Calculs

On a calculé les rapports  $I/N$  obtenus pour une station de faisceau hertzien. Les Fig. 7a à 7d donnent quelques résultats, comme suit:

Fig. 7a: station d'un système à 4 GHz située à la latitude  $40^\circ$

Fig. 7b: station d'un système à 11 GHz située à la latitude  $40^\circ$

Fig. 7c: station d'un système à 4 GHz située à la latitude  $60^\circ$

Fig. 7d: station d'un système à 11 GHz située à la latitude  $60^\circ$ .

En règle générale, les effets du brouillage sont d'autant plus prononcés que la latitude est plus élevée, raison pour laquelle on considère que les calculs effectués pour les latitudes  $40^\circ$  et  $60^\circ$  sont représentatifs.

Les calculs ont été faits pour les angles d'inclinaison  $2,5^\circ$ ,  $5^\circ$  et  $10^\circ$ . Dans chaque figure, l'abscisse représente la longitude relative du satellite par rapport à la longitude du point d'intersection de l'horizon et de l'orbite ( $78,6^\circ$  pour la latitude  $40^\circ$  et  $72,4^\circ$  pour la latitude  $60^\circ$ ).

Les calculs ont été effectués comme suit. Pour chaque valeur de la longitude du satellite, on choisit l'angle d'azimut et l'orientation de l'antenne de la station de faisceau hertzien de façon uniforme dans  $360^\circ$ , sauf pour les directions en deçà de  $2^\circ$  (pour le système à 4 GHz) ou de  $1,5^\circ$  (pour le système à 11 GHz) par rapport à la direction de l'OSG.

Dans chacun des cas susmentionnés, on évalue le brouillage (rapport  $I/N$ ) pour tous les emplacements possibles du satellite sur l'orbite inclinée. On détermine les deux valeurs suivantes: la valeur de  $I/N$  pour le cas le plus défavorable et la valeur de « $I/N$  10%» qui est dépassée pendant 10% du temps au maximum. Ces deux valeurs sont des fonctions de l'azimut de l'antenne du faisceau hertzien. Les «valeurs à 10%» portées en graphique ont été déterminées à partir des  $I/N$  10% qui étaient dépassés pour un maximum de 1% des angles d'azimut possibles.

Dans les figures, les courbes en trait plein et les courbes en tirets correspondent respectivement aux valeurs du cas le plus défavorable et aux valeurs 10% définies ci-dessus.

#### 2.3.5.3.2 Brouillage causé à une station située à $40^\circ$ de latitude

La Fig. 7a donne les valeurs de  $I/N$  pour une station d'un faisceau hertzien de 4 GHz située à  $40^\circ$  de latitude. Les courbes en trait plein correspondent au cas le plus défavorable. Elles sont tracées en fonction de la longitude du satellite, la valeur la plus élevée de  $I/N$  étant 13,2 dB. Lorsque la position du satellite est très proche du point d'intersection horizon/orbite, la valeur la plus défavorable diminue parce que l'antenne de la station de faisceau hertzien est orientée dans une direction qui s'écarte d'au moins  $2^\circ$  de l'OSG. Lorsque la longitude relative du satellite dépasse une certaine valeur limite, le satellite disparaît sous l'horizon et il n'y a par conséquent plus de brouillage.

La valeur 10% est un peu inférieure à la valeur la plus défavorable et ce phénomène se trouve accentué pour les grands angles d'inclinaison. Si cet angle est de  $10^\circ$ , la valeur la plus défavorable est très grande dans un intervalle étendu (de  $-10^\circ$  à  $8^\circ$ ), mais la valeur 10% est inférieure à 0 dB sauf pour certaines longitudes voisines de  $-9^\circ$  et  $+7^\circ$ .

La Fig. 7b indique les mêmes résultats pour la fréquence 11 GHz. La plus grande valeur de  $I/N$  est 13,6 dB. Comme l'antenne 11 GHz a une ouverture de faisceau plus petite, la valeur 10% est très inférieure à celle obtenue pour 4 GHz. Cela veut dire que l'effet du brouillage est moins marqué à 11 GHz qu'à 4 GHz.

#### 2.3.5.3.3 Brouillage causé à une station située à $60^\circ$ de latitude

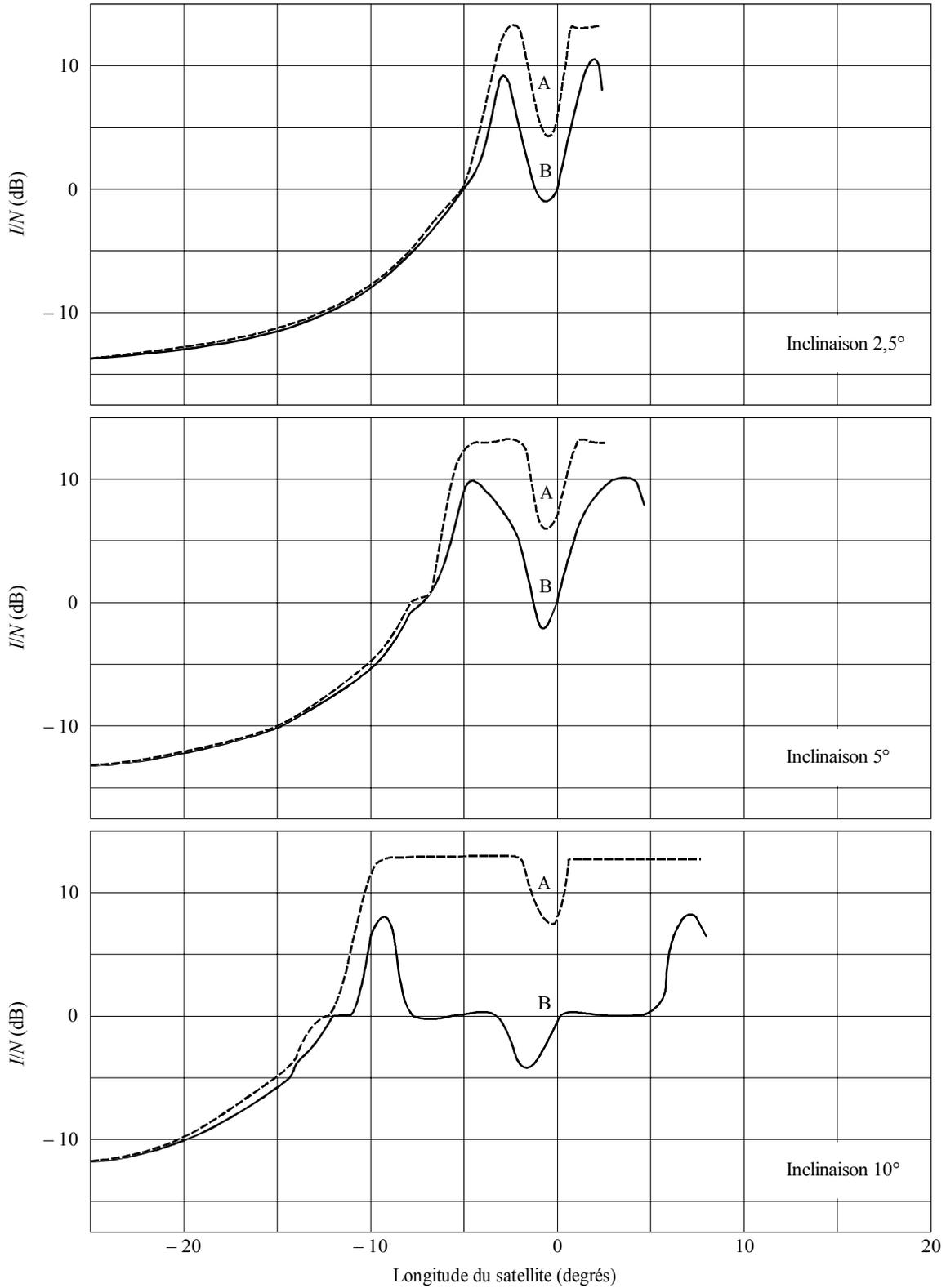
Les Fig. 7c et 7d représentent le brouillage causé à une station de faisceau hertzien située à  $60^\circ$  de latitude et fonctionnant, respectivement, à 4 GHz et 11 GHz.

Les courbes du cas le plus défavorable présentent leurs maxima dans un intervalle de longitudes de satellite plus large que pour la latitude  $40^\circ$ , mais la tendance générale est similaire à celle mise en évidence par les Fig. 7a et 7b, savoir: la valeur 10% est inférieure à la valeur la plus défavorable, et si on considère uniquement la valeur 10% l'effet du brouillage est moins marqué.

FIGURE 7a

Rapport  $I/N$  pour une station de faisceau hertzien située à une latitude  $40^\circ$  (4 GHz)

Longitude du satellite par rapport au point d'intersection horizon/orbite ( $78,6^\circ$ )



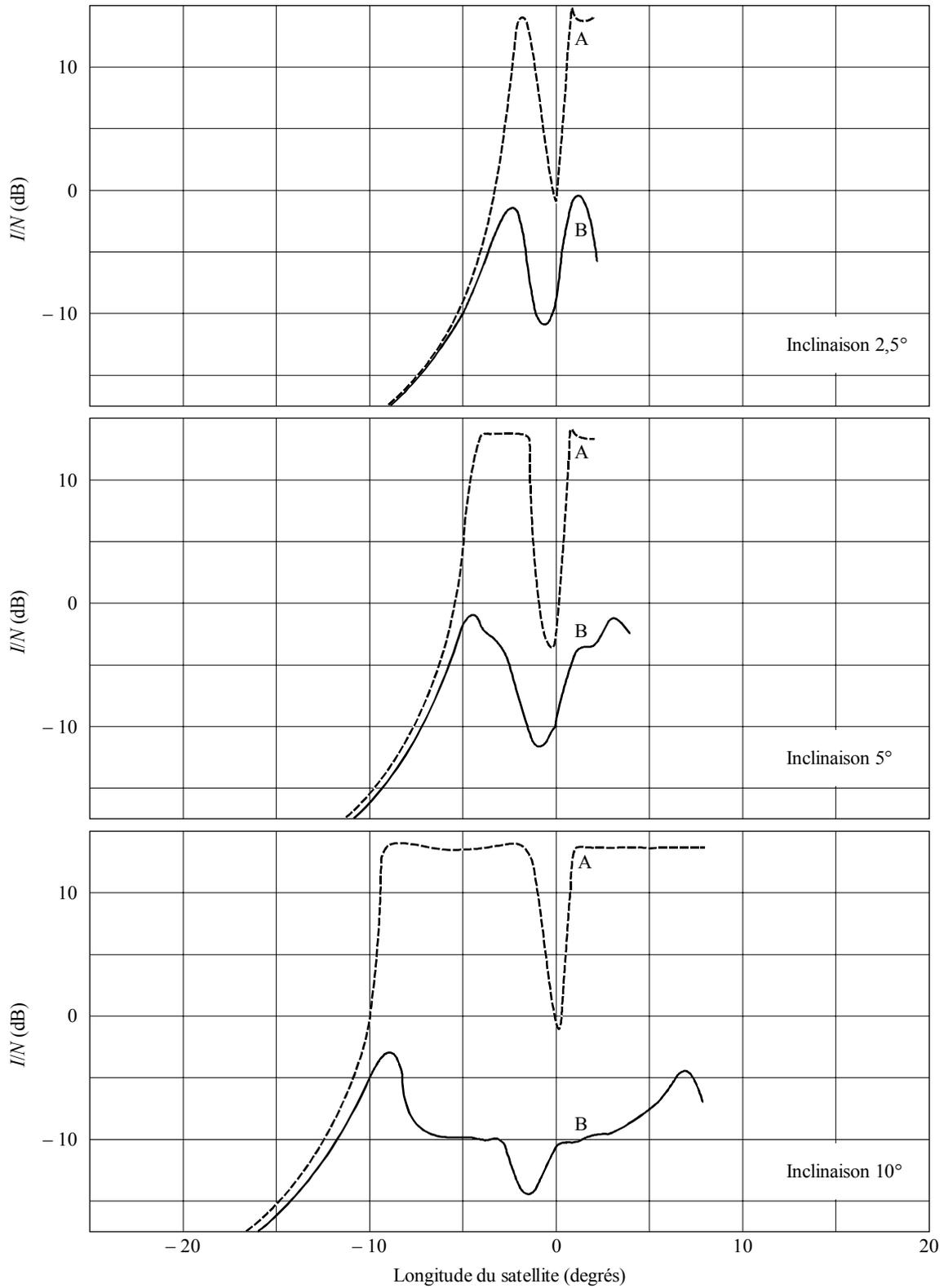
Courbe A: valeur la plus défavorable

Courbe B: valeur 10%, définie au § 2.3.5.3.1

FIGURE 7b

Rapport  $I/N$  pour une station de faisceau hertzien située à une latitude  $40^\circ$  (11 GHz)

Longitude du satellite par rapport au point d'intersection horizon/orbite ( $78,6^\circ$ )



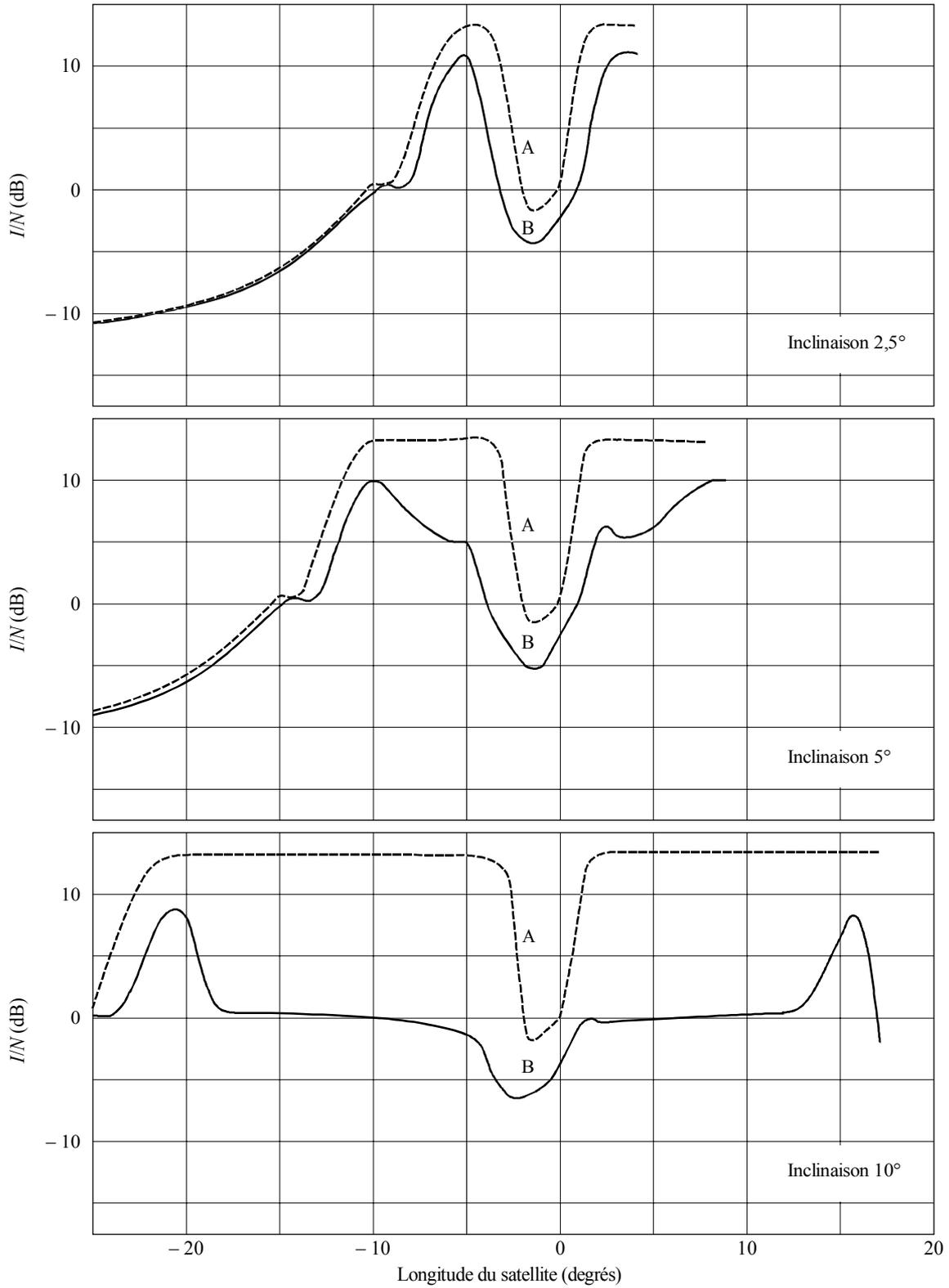
Courbe A: valeur la plus défavorable

Courbe B: valeur 10%, définie au § 2.3.5.3.1

FIGURE 7c

Rapport  $I/N$  pour une station de faisceau hertzien située à une latitude  $60^\circ$  (4 GHz)

Longitude du satellite par rapport au point d'intersection horizon/orbite ( $72,4^\circ$ )



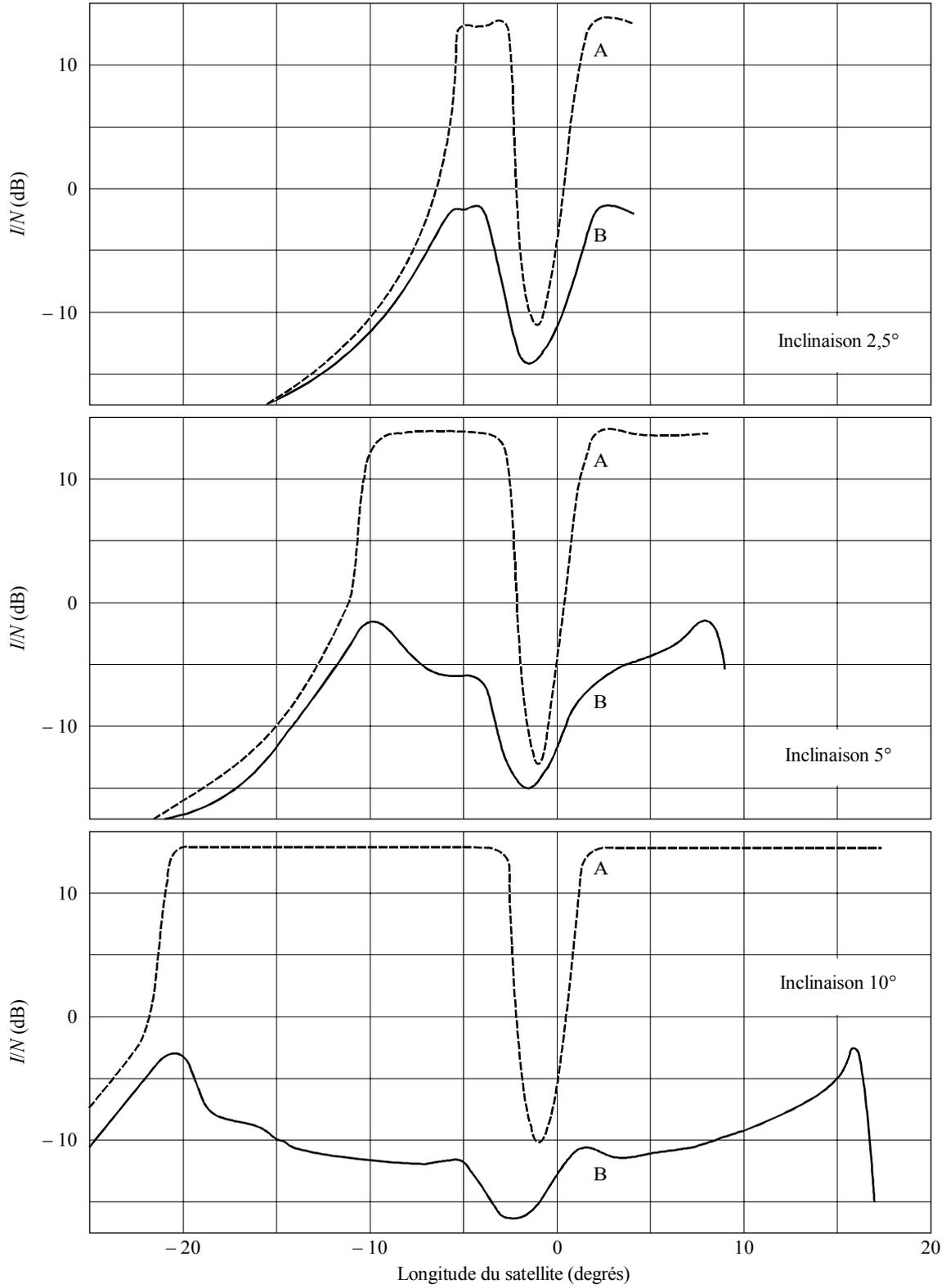
Courbe A: valeur la plus défavorable

Courbe B: valeur 10%, définie au § 2.3.5.3.1

FIGURE 7d

Rapport  $I/N$  pour une station de faisceau hertzien située à une latitude  $60^\circ$  (11 GHz)

Longitude du satellite par rapport au point d'intersection horizon/orbite ( $72,4^\circ$ )

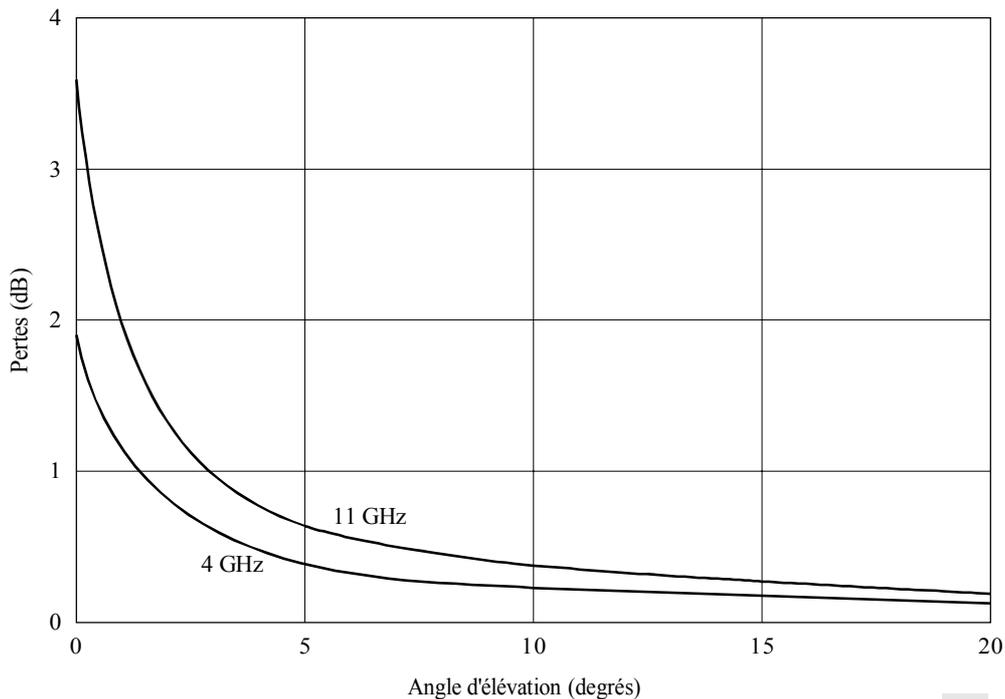


Courbe A: valeur la plus défavorable

Courbe B: valeur 10%, définie au § 2.3.5.3.1

FIGURE 8

## Pertes par absorption dans l'atmosphère



D14

### 2.3.5.4 Influence de certains facteurs

#### 2.3.5.4.1 Diversité d'emplacement

Si l'on fait fonctionner la station de faisceau hertzien en réception avec diversité d'emplacement, il en résulte une augmentation d'environ 3 dB des valeurs  $I/N$  les plus défavorables. En revanche, les valeurs  $I/N$  10% n'augmentent pas de façon sensible, parce que la diversité a pour conséquence une directivité très prononcée dans le plan vertical.

#### 2.3.5.4.2 Gain d'antenne

On note une augmentation des valeurs  $I/N$  les plus défavorables si on utilise une antenne de plus grand diamètre dans la station de faisceau hertzien. Par exemple, avec une antenne de 4 m, on constate que les valeurs les plus défavorables augmentent d'environ 2,5 dB par comparaison avec une antenne de 3 m. Toutefois, l'ouverture du faisceau principal diminue quand le diamètre de l'antenne augmente. En fait, le gain (dans le faisceau principal) d'une antenne de 4 m de diamètre est plus petit que celui d'une antenne de 3 m pour les angles supérieurs à  $0,9^\circ$ . Cela compense jusqu'à un certain point l'effet produit par une augmentation du gain maximum de l'antenne. De ce fait, l'accroissement des valeurs 10% est en moyenne inférieur à 1 dB.

#### 2.3.5.4.3 Pertes dans les lignes d'alimentation

Dans certains cas, les pertes dans la ligne d'alimentation d'une station de faisceau hertzien ne dépassent pas 0,5 dB. Il en résulterait une augmentation de 2,5 dB de toutes les valeurs  $I/N$  indiquées au § 2.3.5.3.

## 2.4 Brouillage occasionné à des stations spatiales par des stations de Terre

### 2.4.1 Introduction

L'analyse du risque de brouillage des stations spatiales repose sur un calcul de probabilité, faute de données précises concernant les emplacements, etc., des stations de faisceaux hertziens. Pour évaluer l'augmentation de risque engendrée par l'exploitation de satellites sur orbite inclinée, on estime la probabilité de brouillage dans le cas de l'OSG puis, au moyen du même modèle, on estime le risque relatif pour le cas de l'orbite inclinée. Dans ce dernier cas, on a décidé qu'une inclinaison de  $5^\circ$  représentait une valeur raisonnable pour l'analyse. Des inclinaisons plus faibles donnent une estimation proportionnellement plus faible du risque de brouillage, tandis que des valeurs plus élevées donneront une estimation plus élevée.

## 2.4.2 Le modèle

Les stations de faisceaux hertziens dont le faisceau principal pourrait couper l'OSG sont circonscrites à celles qui ont un azimut de rayonnement particulier, à une latitude spécifique. Il y a quatre points de ce genre par position de satellite sur l'OSG: ils correspondent aux latitudes nord et sud ainsi qu'aux longitudes est et ouest par rapport à la position sur l'OSG.

En tenant compte de l'ouverture de faisceau de l'antenne de faisceaux hertziens, de l'angle d'élévation et des effets de réfraction, on définit une petite bande semblable à celle de la Fig. 2a qui contient toutes les stations qui pourraient couper l'OSG ou l'orbite inclinée à un moment donné. La largeur de cette bande est fonction des valeurs des paramètres du modèle.

Les paramètres du modèle pris comme hypothèse sont les suivants: angles d'élévation de  $-1^\circ$  à  $4^\circ$  pour l'antenne de station de faisceaux hertziens et, pour la réfraction, une plage allant de 250 à 400. Ce dernier facteur ajoute  $2^\circ$  à la plage de visibilité effective à la limite extérieure de la bande. On suppose également que le centre du faisceau est séparé de l'orbite à l'étude par une distance de  $1,5^\circ$ , ce qui tient compte de l'ouverture de faisceau avec une certaine marge.

## 2.4.3 Cas de l'OSG

Compte tenu des paramètres pris en hypothèse, la largeur de la bande dans le cas de l'OSG est de  $7^\circ$  environ. Le nombre de stations situées dans cette bande est fonction de sa superficie et de la densité supposée des stations de Terre. Il suffit de faire les calculs pour un quadrant, de l'équateur à la latitude de  $70^\circ$  et, par symétrie, de les appliquer à tous les quadrants. L'intersection du faisceau avec un point précis de l'OSG peut avoir lieu à partir des quatre quadrants.

La bande de  $7^\circ$  d'un quadrant (775 km) correspond à une superficie de 7 875 000 km<sup>2</sup>.

## 2.4.4 Cas de l'orbite inclinée

La largeur de la bande ne change pas en fonction de l'inclinaison aux basses latitudes, mais elle augmente avec la latitude en fonction de l'inclinaison. Dans le cas d'une inclinaison de  $5^\circ$ , la superficie de la bande contenue dans un quadrant est de 13 230 000 km<sup>2</sup>, et le nombre de stations devrait représenter 1,68 fois celui du cas de l'OSG.

Ce résultat variera directement avec l'inclinaison et peut être considéré comme représentatif des effets de l'orbite inclinée.

## 2.4.5 Evaluation quantitative

On peut estimer le nombre des intersections potentielles en supposant une densité maximale de stations de faisceaux hertziens pour toutes les terres situées dans la bande dont la population est suffisante pour justifier l'hypothèse. La densité maximale d'une station par 2 500 km<sup>2</sup> donne, dans toutes les directions, une station tous les 50 km, soit la distance normale d'un bond retenue par les concepteurs de faisceaux hertziens.

On suppose en outre qu'en tenant compte de la densité démographique et des effets des régions océaniques, la superficie en question serait de l'ordre de 20% du total. On prend pour hypothèse un pointage aléatoire de l'antenne de la station de faisceaux hertziens avec une ouverture de faisceau de  $2^\circ$  et, en appliquant ces considérations au cas de l'OSG, le nombre total de stations avec possibilité d'intersection serait d'environ 14 et d'environ 24 pour l'orbite inclinée.

## 2.4.6 Considérations d'ordre pratiques

Le présent modèle contient plusieurs hypothèses très prudentes, par exemple:

- les angles d'élévation des faisceaux hertziens sont compris entre  $-1$  et  $4^\circ$ ,
- l'utilisation d'une densité uniforme des stations de faisceaux hertziens,
- la représentativité d'un angle d'élévation de  $2^\circ$ ,
- une réfractivité nominale type de 300.

Des ajustements peuvent être apportés à ce modèle. L'application de ces ajustements a pour effet net de ramener la zone en question à 42% du modèle initial dans le cas de l'OSG, et à 64% dans le cas de l'orbite inclinée. Le nombre des cas potentiels de brouillage est ramené à environ 6 pour l'OSG et à 15 pour l'orbite inclinée.

## 2.4.7 Expérience réelle

L'examen des satellites INTELSAT placés sur l'OSG qui subissent des brouillages provoqués par des installations de faisceaux hertziens a montré que ces effets ont été négligeables. En fait, un seul cas de ce genre a été enregistré au cours des dix dernières années.

### 3 Brouillage stations terriennes/stations de Terre

#### 3.1 Introduction

L'absence ou l'interruption du maintien en position nord-sud entraîne, dans le cas d'un satellite géostationnaire, une modification constante de son inclinaison orbitale. Une station terrienne travaillant en liaison avec un tel satellite devra donc le poursuivre avec le faisceau principal de son antenne sur une trajectoire diurne (correspondant à un huit étroit). Lorsqu'une telle station terrienne a été coordonnée avec les stations des services de Terre en vue d'un service «strictement géostationnaire» (mouvement du satellite limité par des tolérances de position faibles, prescrites ou annoncées), la nécessité de suivre un satellite ayant ou prenant une inclinaison orbitale significative obligera le faisceau principal de l'antenne de la station terrienne à prendre des angles d'élévation et, en liaison avec ces derniers, des azimuts différents (plus petits ou plus grands) que ceux pour lesquels la coordination a été effectuée. Les préoccupations intéressent surtout le cas des angles d'élévation plus petits que ceux nécessaires à l'exploitation géostationnaire en raison du gain supérieur de l'antenne par rapport à l'horizon qui en résulte et qui est à l'origine de brouillages potentiels causés ou subis par la station terrienne.

#### 3.2 Considérations géométriques

##### 3.2.1 Expressions analytiques

L'angle d'élévation  $\varepsilon_s$  et l'angle d'azimut  $\alpha_s$  du faisceau principal d'une station terrienne en direction de la station spatiale sur l'orbite inclinée des satellites géostationnaires au point d'excursion maximale ont pour expression:

$$\varepsilon_s = \arcsin((KA - 1,0)/B) \quad (10)$$

$$\alpha_s = 90,0 + \arccos(K \cos i \cdot \sin \delta / B \cdot \cos \varepsilon_s) \quad (11)$$

$$A = \cos i \cos \zeta \cos \delta + \sin i \sin \zeta \quad (12)$$

$$B = (1,0 + K^2 - 2KA)^{0,5} \quad (13)$$

A noter que  $\arccos(-x) = 180,0 - \arccos x$

où:

- $K$ : rapport du rayon de l'OSG au rayon de la Terre, présumé égal à 6,62
- $i$ : inclinaison de l'orbite (+ vers le nœud ascendant à l'est de Greenwich)
- $\zeta$ : latitude de la station terrienne (+ vers le nord)
- $\delta$ : différence de longitude entre la station spatiale et la station terrienne.

##### 3.2.2 Perte de discrimination

Au fur et à mesure que le satellite progresse dans une orbite inclinée, l'angle d'élévation et l'azimut varient avec le temps. Cela peut se traduire par des variations de gain vers l'horizon, comme cela est indiqué dans les paragraphes qui suivent.

Tant la réduction de l'angle d'élévation que le décalage associé de l'azimut ne sont pas seulement fonction de l'inclinaison orbitale du satellite suivi, mais aussi de la latitude et de la longitude relative (différence de longitude par rapport au point nodal subsatellite) de la station terrienne en cause, comme le montrent les Fig. 9a, 9b, 9c et 9d pour les deux inclinaisons orbitales 5° et 10° respectivement.

Aux Fig. 9a, 9b, 9c et 9d, la circonférence extérieure décrit les emplacements situés à la surface de la Terre (en termes de latitude et de longitude par rapport au point nodal subsatellite) où l'angle d'élévation du faisceau principal de l'antenne de la station terrienne par rapport au satellite sur orbite inclinée n'est jamais inférieur à 3°. La surface intérieure, qui ressemble à une amande, contient la partie de la surface terrestre où l'angle d'élévation n'est jamais inférieur à 48° et n'est donc pas sujet à des variations du gain de l'antenne par rapport à l'horizon (en admettant que, au-delà d'un angle hors axe du faisceau de 48°, il n'y a pas de variation appréciable du gain de l'antenne).

FIGURE 9a

Augmentation du gain de l'antenne de la station terrienne par rapport à l'horizon et décalage du faisceau principal en azimut (inclinaison de 5°)

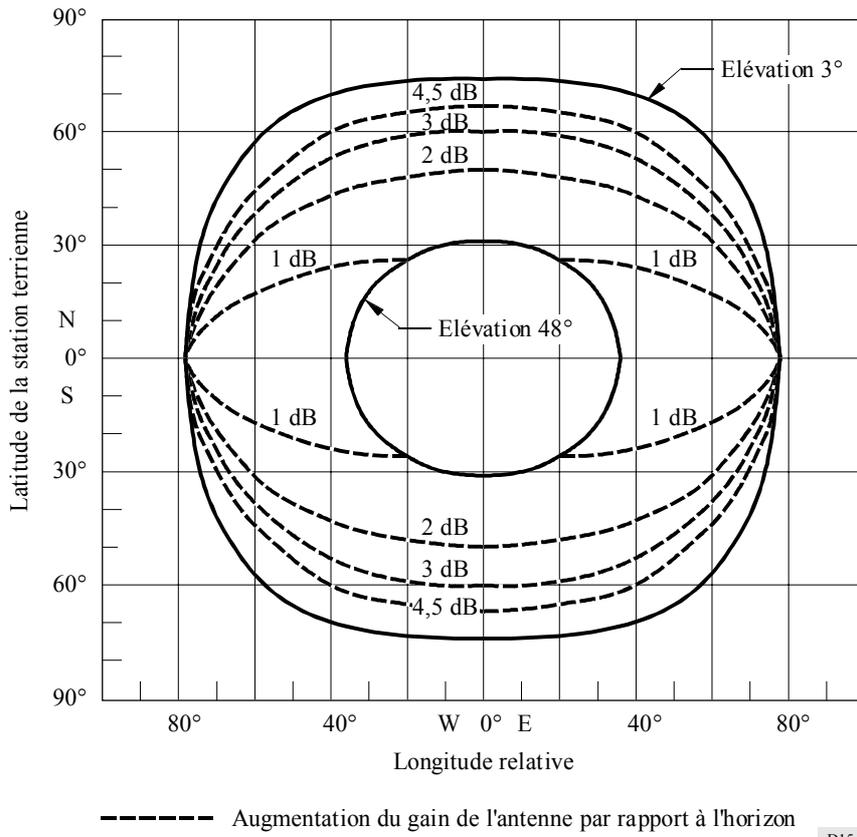


FIGURE 9b

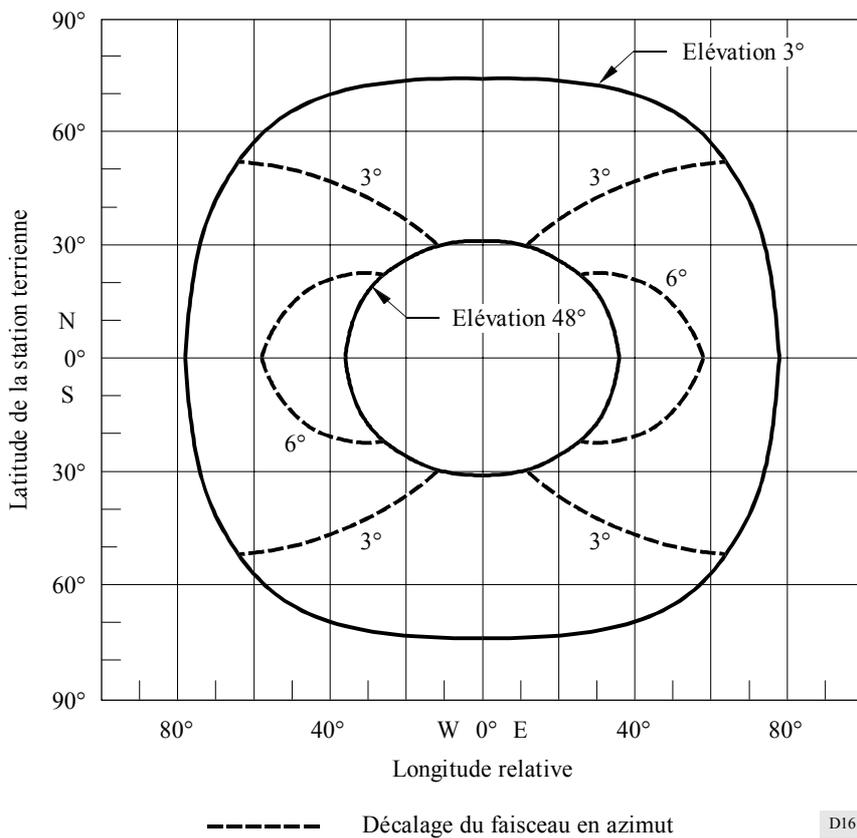
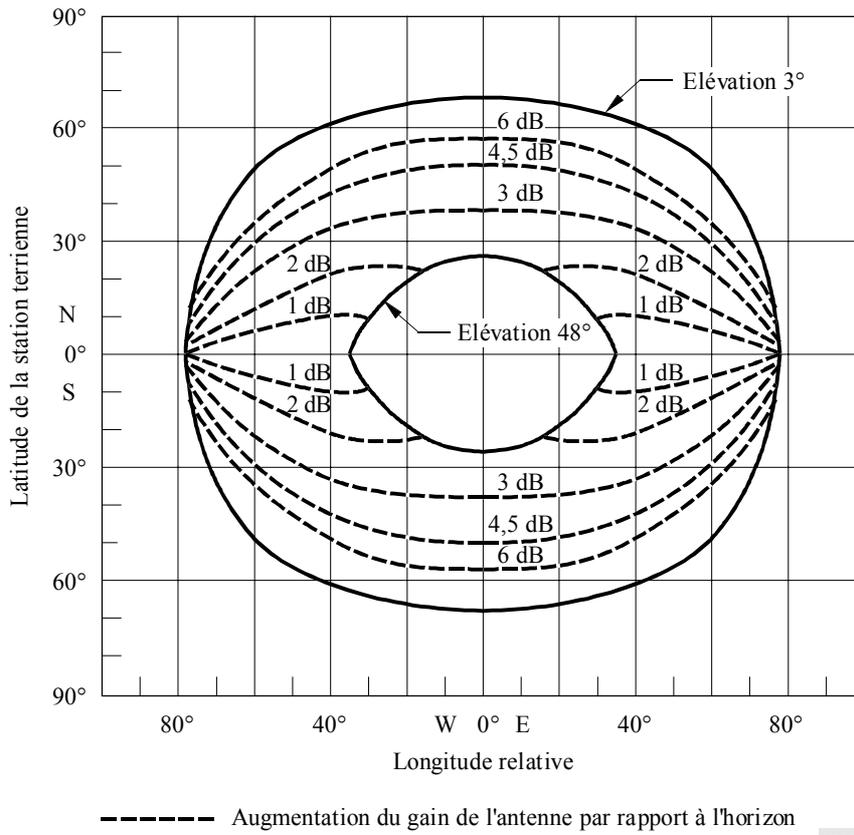


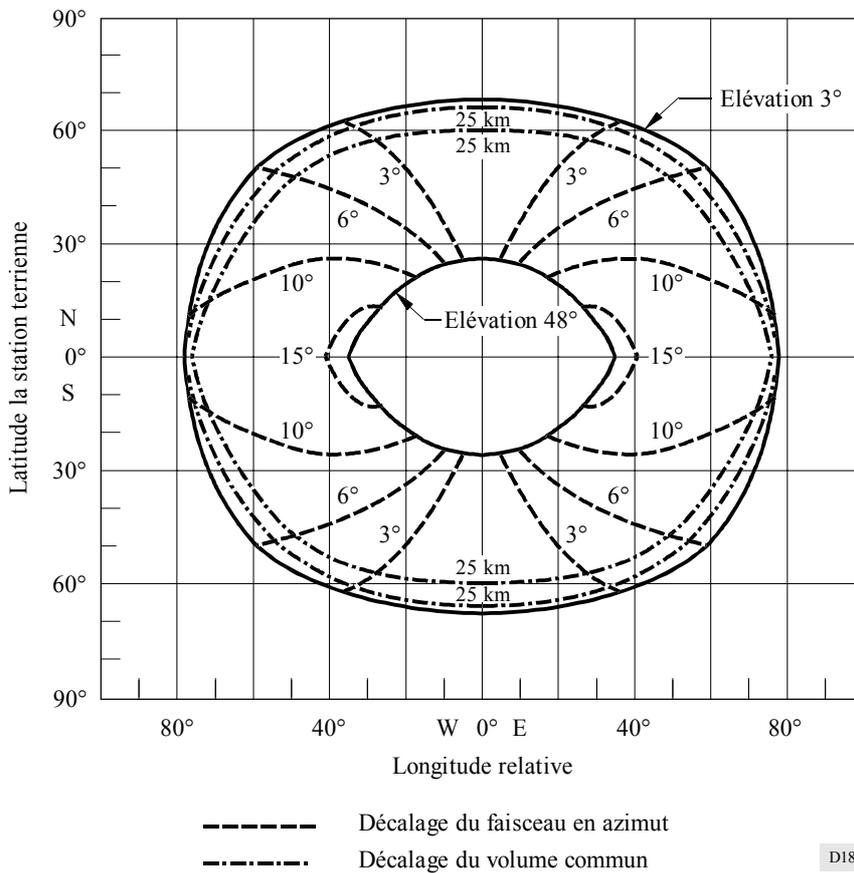
FIGURE 9c

Augmentation du gain de l'antenne de la station terrienne par rapport à l'horizon et décalage du faisceau principal en azimut (inclinaison de 10°)



D17

FIGURE 9d



D18

Dans le diagramme supérieur de chaque figure, les lignes brisées représentent l'augmentation du gain de l'antenne de la station terrienne par rapport à l'horizon (en dB) en se fondant sur un diagramme d'antenne de la forme  $A - 25 \log \theta$  (dB). Dans le diagramme inférieur, les lignes brisées montrent, pour les emplacements de stations terriennes correspondants, le décalage de l'azimut du faisceau principal de l'antenne de la station terrienne entre le point qui correspond à une exploitation strictement géostationnaire et celui auquel le satellite est vu sous l'angle d'élévation le plus faible sur son orbite inclinée. Le décalage en azimut est toujours orienté vers l'équateur. Les stations terriennes situées à la longitude du nœud du satellite présentent la plus forte augmentation du gain de l'antenne par rapport à l'horizon et le plus faible décalage en azimut; les stations terriennes proches de l'équateur ont la plus petite augmentation du gain de l'antenne par rapport à l'horizon et le plus fort décalage en azimut. Plus l'inclinaison est grande, plus forts sont aussi bien le gain de l'antenne par rapport à l'horizon et le décalage en azimut.

La Fig. 9d représente, sous forme d'un ensemble de courbes additionnel, le décalage latéral d'un «volume commun» à l'altitude de 4 km. Il s'agit là de la plus haute altitude à laquelle on peut s'attendre à un brouillage dû à la diffusion par les hydrométéores.

### 3.3 Incidence sur la zone de coordination des stations terriennes

En raison de la variation de l'azimut et de l'angle d'élévation, les stations terriennes qui faisaient précédemment l'objet d'une coordination avec des systèmes de Terre, en partant du principe qu'elles travailleraient avec un satellite sur l'OSG, peuvent pâtir de l'emploi d'orbites inclinées. D'autres stations de Terre peuvent aussi être affectées. Les nouveaux contours visés dans la coordination seraient alors fonction de la ou des positions et de l'arc pour lesquels ils ont été calculés. On trouvera une grande variété de cas qui affecteront un grand nombre de stations terriennes dans le monde.

Les conclusions avancées concernent un ensemble de conditions limites susceptibles de faciliter l'évaluation du problème éventuel lorsqu'une nouvelle coordination de ces stations est jugée nécessaire.

#### 3.3.1 Incidence sur l'emplacement des stations terriennes

Les stations terriennes qui peuvent travailler avec des satellites sur orbite inclinée de  $5^\circ$  sont limitées à celles dont les angles d'élévation se situent entre  $5^\circ$  et  $10^\circ$  à l'emplacement nominal sur l'OSG, selon la latitude de la station terrienne. Dans sa plus grande dimension, le contour de coordination est dans ce cas basé sur un gain d'antenne de 7 à 14,5 dB dans le plan horizontal. Pour une station réceptrice, ce gain établit la sensibilité au brouillage. Pour une station émettrice, ce gain détermine la densité de p.i.r.e. dans le plan horizontal.

Dans le cas d'une station terrienne située sur l'équateur et fonctionnant à un faible angle d'élévation, le mouvement de l'antenne en azimut est environ le double de l'angle d'inclinaison, mais l'angle d'élévation change très peu.

Dans le cas d'une station terrienne fonctionnant sous un angle d'élévation nominal de  $5^\circ$ , l'augmentation va de 0 à 4,9 dB, pour la gamme des valeurs d'azimut de  $\pm 50^\circ$  et une inclinaison de  $5^\circ$ . L'incidence de ce qui précède sur la zone de coordination d'une station terrienne à 6 GHz qui avait fait l'objet de la coordination à  $5^\circ$ , avec la densité de p.i.r.e. maximale admissible de 40 dB(W/4 kHz), se traduit par un élargissement du contour autour de la région du faisceau principal, l'azimut nominal restant inchangé.

Dans le cas des stations terriennes à latitude élevée, l'azimut change très peu, tandis que l'angle d'élévation sera égal à environ le double de l'inclinaison. L'exploitation sur orbite inclinée serait alors limitée aux stations terriennes ayant un angle d'élévation nominal de  $10^\circ$  par rapport à l'OSG. Ceci signifie qu'il faudrait descendre jusqu'à  $5^\circ$  pendant une partie de la période de poursuite et qu'il se produirait une augmentation de gain de 7,5 dB sur cet azimut qui se traduirait par une augmentation de gain surtout pour l'azimut du faisceau principal.

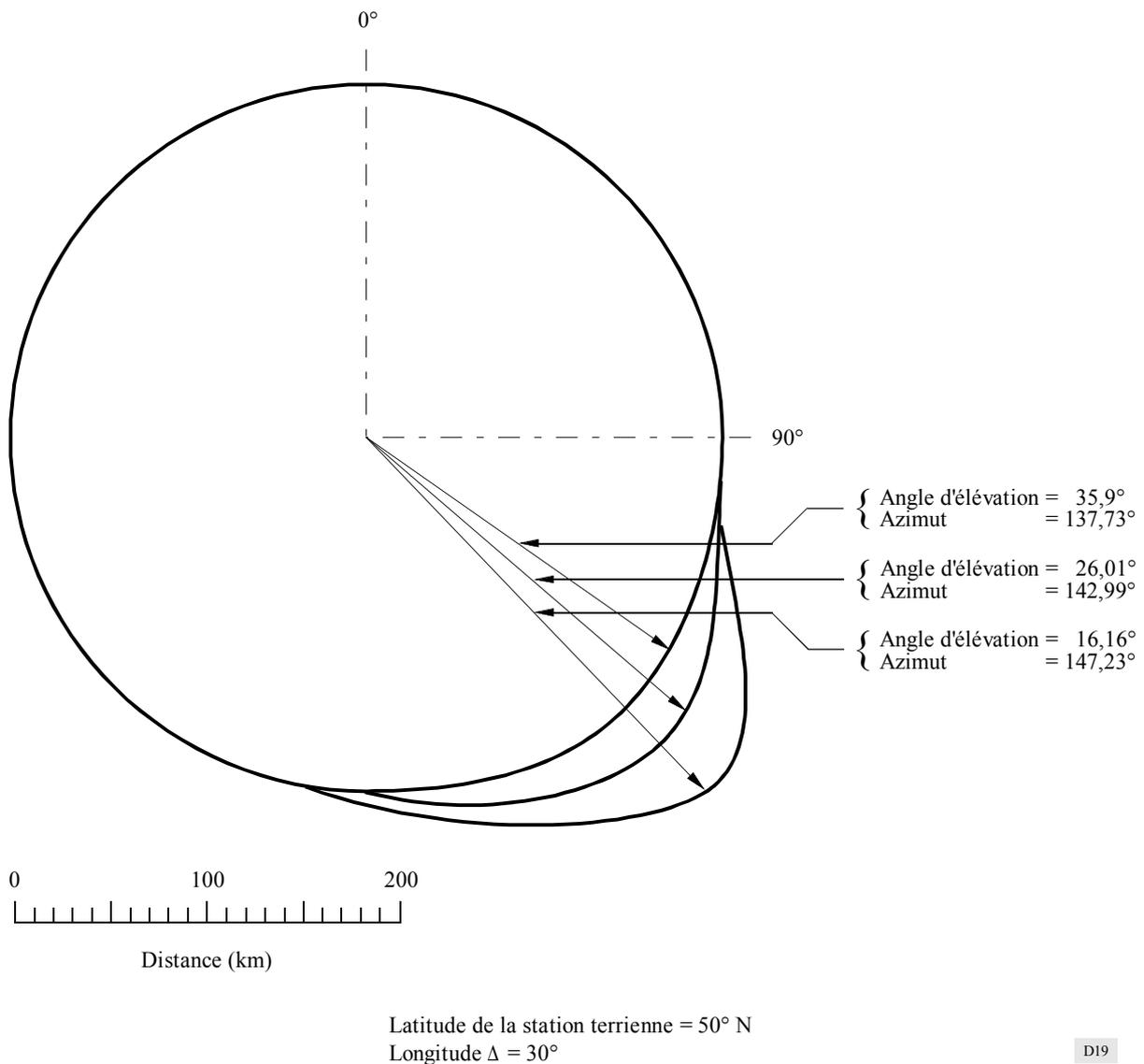
Il y a des emplacements où les angles d'azimut et d'élévation changent d'une valeur presque égale, mais moins que dans l'un ou l'autre des cas ci-dessus. Ici, les variations de gain seront moindres que dans les cas extrêmes et, dans tous les cas considérés, la zone de coordination change le plus dans la région du faisceau principal de la station terrienne. On trouvera l'illustration de cette situation à la Fig. 10.

#### 3.3.2 Modification des distances de coordination

Les effets sur les distances de coordination seront principalement dus aux variations d'angles d'élévation. Pour des valeurs nominales d'angles d'élévation dans la plage de  $15^\circ$  à  $20^\circ$ , la variation de gain aurait une valeur maximale de 4,4 dB environ. Pour les angles d'élévation supérieurs à  $20^\circ$ , une variation d'angle d'élévation de  $5^\circ$  par rapport à la valeur nominale causera une augmentation maximale de gain de 3 dB dans le plan horizontal. Pour des valeurs nominales d'angles d'élévation supérieures à  $53^\circ$  environ, le gain ne changera pas.

FIGURE 10

Mode 1, Zone A – Zone de coordination de la station terrienne d'émission fonctionnant à 6 GHz sur orbite inclinée de 10°



La Fig. 11 présente les résultats d'une étude consacrée aux modifications de la distance de coordination maximale en Mode de propagation 1 (trajet le long du grand cercle) en fonction des différences de longitude et de latitude de la station terrienne, par comparaison au contour de coordination type établi pour une station terrienne fonctionnant à 6 GHz. On a supposé une puissance d'émission de 20 dBW et une dispersion d'énergie de 2 MHz. La distance de coordination maximale augmente de 10% à 20% pour des valeurs nominales d'angle d'élévation d'antenne comprises entre 10° et 20° et de quelques pour-cent pour des angles d'élévation plus importants. La variation en pourcentage est indépendante de la zone de propagation considérée (Zones A, B et C).

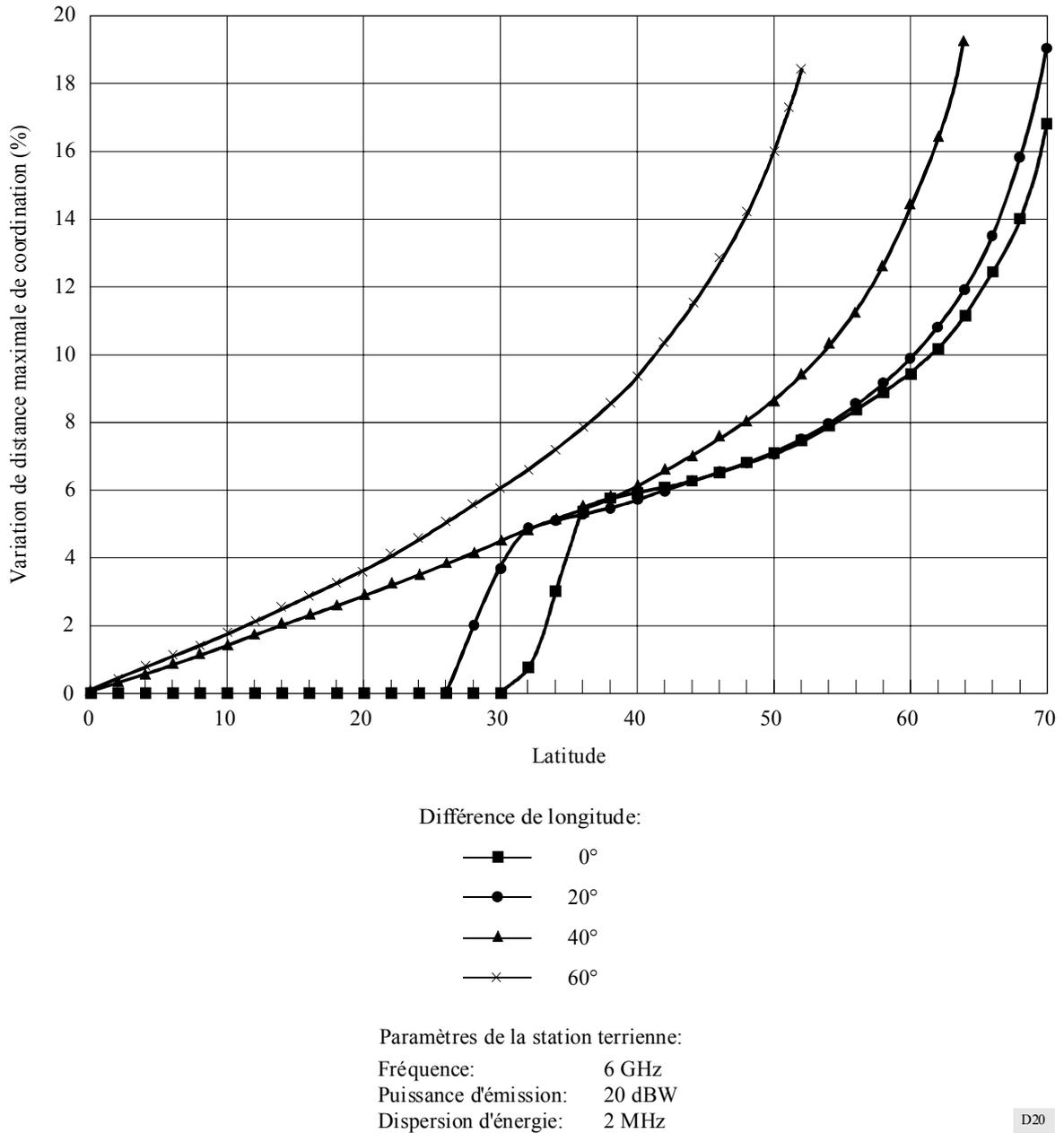
Les modifications observées en Mode de propagation 2 (dispersion due aux hydrométéores) sont faibles, et dans la plupart des cas, inférieures à 6%.

### 3.4 Brouillage occasionné à des récepteurs SF par des stations terriennes

Une étude stochastique a été réalisée pour évaluer l'incidence du fonctionnement en orbite inclinée sur une station de Terre. Dans cette étude, les stations terriennes sont situées à des latitudes de 41° N et soumises à des limites telles que l'angle d'élévation est le maximum local vers l'orbite inclinée. Pour l'inclinaison de 15°, le brouillage augmente de 4,5 dB pour 23% des récepteurs de Terre et pendant au moins 10% du temps (2,4 heures par jour), alors que pour l'inclinaison de 5°, 38% des récepteurs verront le brouillage augmenter de 1,5 dB pendant 10% du temps. L'augmentation prévisible

du brouillage sera moins forte pour des angles d'élévation plus grands ou pour des récepteurs de Terre pointés dans des azimuts qui évitent l'OSG qu'avec la distribution uniforme admise par hypothèse. Toutefois, pour des latitudes plus élevées avec des angles d'élévation plus faibles, le brouillage prévisible sera plus fort.

FIGURE 11  
 Variation de distance maximale de coordination (%) par comparaison  
 à la distance de coordination d'une station terrienne type  
 Inclinaison orbitale: 5°, Zone A, fréquence = 6 GHz



D20

### 3.5 Résumé

Pour les pays proches de l'équateur, une nouvelle coordination de leurs stations terriennes ne sera pas nécessaire si elles sont exploitées en liaison avec un satellite sur orbite inclinée. Même si leurs longitudes relatives ne s'inscrivent pas dans la zone en amande où l'angle d'élévation est supérieur à 48°, on n'observe qu'une faible augmentation de la valeur du gain de l'antenne par rapport à l'horizon et il est généralement possible de ne pas en tenir compte.

Les pays situés sous de plus hautes latitudes sont proportionnellement plus affectés et peuvent, dans certains cas, éprouver des difficultés à coordonner et plus spécialement à refaire la coordination de leurs stations terriennes pour travailler avec de plus grandes inclinaisons orbitales de leurs satellites. Cependant, dans tous les cas, un compromis est possible entre l'acceptation de difficultés accrues dans la coordination des stations terriennes et une exploitation plus extensive d'une orbite inclinée.

## 4 Conclusions

La présente Annexe a étudié la situation de partage entre le service fixe et le SFS lorsque les satellites se trouvent sur une orbite inclinée. L'effet produit sur les réseaux de Terre est imputable aux stations spatiales et aux stations terriennes. De même, des réseaux à satellites seront également affectés par les brouillages dus aux stations spatiales et terriennes.

Lorsque les satellites se déplacent sur une orbite légèrement inclinée, la situation de partage est complexe. Pendant une courte période, les récepteurs du service fixe sont plus exposés au brouillage direct des satellites et *vice versa*. Le nombre de stations de Terre ainsi exposées au brouillage augmente avec le degré d'inclinaison.

L'effet de ce risque de brouillage sur l'indisponibilité du système ainsi que le brouillage total reçu ont été étudiés dans la présente Annexe. On a mis au point un modèle montrant que selon les hypothèses retenues, on peut s'attendre à un accroissement de l'indisponibilité dans un rapport de 1 à 10. Les hypothèses sont les suivantes: le système est doté de contrôle de puissance adaptatif, tous les satellites se trouvent sur une orbite inclinée de  $10^\circ$ , ont une puissance surfacique de  $-124 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ , et sont espacés de  $3^\circ$ . Toutefois, il convient de noter que compte tenu de la tendance à utiliser de petites antennes de station terrienne, il est peu probable que les exploitants de satellites utiliseront un degré d'inclinaison important. D'autres modèles, fondés sur une évaluation de la distribution des faisceaux à partir d'un faisceau hertzien en service, montrent que le brouillage total de bout en bout peut dans certains cas être réduit, selon le facteur de risque de brouillage.

Dans un autre modèle, il ressort du calcul du brouillage global sur un circuit fictif de référence que le brouillage n'augmente pas, mais qu'il est redistribué sur la longueur du réseau.

Il est nécessaire d'entreprendre de nouvelles études en ce qui concerne les modèles à utiliser pour les calculs du brouillage. Il faut disposer de plus amples informations sur la répartition des faisceaux de Terre autour de l'orbite.

Il faut également entreprendre des études contribuant à la mise au point de techniques applicables aux deux services et permettant d'améliorer la situation en ce qui concerne le brouillage, notamment lorsque les angles d'inclinaison sont faibles. Cela pourrait faire intervenir des techniques telles que le contrôle de puissance automatique, les annuleurs de brouillage, la spécification de la puissance surfacique dans une large bande, les restrictions applicables au pointage d'antenne de satellite, la limitation de l'inclinaison, les procédures de coordination, les effets d'écran du terrain et autres.

En ce qui concerne les effets sur la zone de coordination entre les stations terriennes et les stations spatiales, ceux-ci varient en fonction de l'angle d'élévation, de l'azimut et de la longitude de la station terrienne. L'augmentation de la distance de coordination qui en découle varie selon le degré d'inclinaison. Pour une inclinaison d'orbite de  $5^\circ$  et un angle d'élévation nominal de la station terrienne compris entre  $10^\circ$  et  $20^\circ$ , la distance de coordination maximale augmente de 10% à 20%, par comparaison à l'absence d'exploitation sur orbite inclinée; plus important, elle n'augmente que de quelques points de pourcentage pour des angles d'élévation.

---