

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R F.1249-5
(01/2018)

**Caractéristiques techniques et
opérationnelles propres à faciliter le partage
entre les systèmes point à point du service
fixe et le service inter-satellites dans la
bande 25,25-27,5 GHz**

Série F
Service fixe



Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2018

© UIT 2018

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R F.1249-5*

Caractéristiques techniques et opérationnelles propres à faciliter le partage entre les systèmes point à point du service fixe et le service inter-satellites dans la bande 25,25-27,5 GHz

(Question UIT-R 118/7)

(1997-2000-2009-2013-2015-2018)

Domaine d'application

La présente Recommandation donne la densité de p.i.r.e. maximale des stations d'émission point à point du service fixe en direction de l'orbite des satellites géostationnaires afin de permettre le partage avec le service inter-satellites dans la bande 25,25-27,5 GHz. La densité de p.i.r.e. de référence dans la présente Recommandation prend en compte le besoin de transmission au niveau minimal nécessaire ainsi que l'utilisation de la commande automatique de la puissance d'émission (CAPE) dans les stations du service fixe en cas de précipitations.

Mots clés

Satellites relais de données, positions orbitales, p.i.r.e., densité spectrale

Abréviations

CAPE	commande automatique de la puissance d'émission
OSG	orbite des satellites géostationnaires
p.i.r.e.	puissance isotrope rayonnée équivalente
SF	service fixe
SRD	satellite relais de données

Recommandations et Rapports de l'UIT connexes

Recommandation UIT-R F.758	Paramètres des systèmes et considérations relatives à la mise au point de critères pour le partage ou la compatibilité entre les systèmes hertziens fixes numériques du service fixe et les systèmes d'autres services ainsi que d'autres sources de brouillage
Recommandation UIT-R F.1333	Evaluation de l'angle d'élévation effectif d'une station du service fixe vers une station spatiale, compte tenu de la réfraction dans l'atmosphère
Recommandation UIT-R F.1404	Affaiblissement minimal de propagation dû aux gaz atmosphériques, à utiliser pour les études de partage de fréquences entre systèmes du service fixe et systèmes des services de radiodiffusion par satellite, mobile par satellite et scientifiques spatiaux

* Cette Recommandation ayant été élaborée conjointement par les Commissions d'études 5 et 7 des radiocommunications, toute révision future devra être faite conjointement.

Recommandation UIT-R F.1509	Caractéristiques techniques et opérationnelles propres à faciliter le partage entre les systèmes point à multipoint du service fixe et le service inter satellites dans la bande 25,25-27,5 GHz
Recommandation UIT-R P.526	Propagation par diffraction
Recommandation UIT-R P.676	Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère
Recommandation UIT-R SA.1155	Critères de protection relatifs à l'exploitation des systèmes à satellites relais de données
Recommandation UIT-R SA.1276	Positions orbitales des satellites relais de données devant être protégées contre les émissions des systèmes du service fixe fonctionnant dans la bande 25,25-27,5 GHz
Recommandation UIT-R SF.765	Intersection des faisceaux des antennes de faisceaux hertziens avec les orbites des stations spatiales du service fixe par satellite

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que la bande de fréquences 25,25-27,5 GHz est attribuée au service inter-satellites et au service fixe à titre primaire;
- b) que cette bande de fréquences est utilisée pour des applications de recherche spatiale et d'exploration de la Terre, et plus précisément pour les liaisons inter-satellites de retour vers les satellites relais de données (SRD) placés sur l'orbite des satellites géostationnaires (OSG);
- c) que certaines stations d'émission du service fixe peuvent être dotées d'une commande automatique de puissance d'émission (CAPE) qui permet de réduire leur puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) par temps clair;
- d) qu'il est établi que l'on peut tolérer les brouillages cumulatifs émanant des lobes latéraux des antennes d'un grand nombre de stations d'émission du service fixe ne pointant pas vers un SRD, mais que le phénomène de couplage des faisceaux principaux entre une seule station d'émission du service fixe et un SRD, lorsque la station pointe effectivement vers le satellite, pose apparemment un grave problème de brouillage potentiel (voir l'Annexe 1);
- e) que si certaines liaisons particulièrement longues du service fixe imposent en exploitation des densités de p.i.r.e. élevées, les stations utilisées sur ces liaisons fonctionnent généralement à des angles d'élévation nuls ou quasi nuls, ce qui réduit sensiblement les risques de brouillage en raison de l'affaiblissement dans l'atmosphère;
- f) que, dans certaines circonstances, la topographie et certains obstacles artificiels empêchent les rayonnements du service fixe de se propager dans l'espace, ou entraînent un affaiblissement substantiel sur les trajets de brouillage potentiel;
- g) que l'on peut utiliser dans les deux services des techniques de réduction des brouillages propres à minimiser les brouillages occasionnés par les systèmes du service fixe aux systèmes à SRD,

reconnaissant

- a) qu'en vertu de la Recommandation UIT-R SA.1155, les niveaux totaux maximum de la densité de puissance spectrale des brouillages occasionnés dans la bande 25,25-27,5 GHz aux SRD géostationnaires du service inter-satellites ne devraient pas dépasser -178 dB(W/kHz) pendant plus de 0,1% du temps;

b) qu'un nombre limité de réseaux à SRD sont utilisés sur l'OSG, et que la liste de ces réseaux figure dans la Recommandation UIT-R SA.1276 (voir la Note 1);

c) que la Recommandation UIT-R F.758 donne une grande diversité de paramètres de systèmes hertziens fixes pouvant être modélisée au moyen de systèmes représentatifs pour certaines gammes de fréquences particulières,

recommande

1 de faire en sorte que la p.i.r.e. maximale présente dans la largeur de bande correspondant au canal attribué à cette station du service fixe soit ramenée, lorsque cela est envisageable dans la pratique, à la valeur la plus faible nécessaire pour un fonctionnement satisfaisant;

2 s'agissant des positions sur l'OSG spécifiées dans la Recommandation UIT-R SA.1276 (voir la Note 1):

2.1 de faire en sorte, dans la mesure où cela est envisageable dans la pratique, que la densité de p.i.r.e. rayonnée par une telle station du service fixe en direction des positions ci-dessus mentionnées ne dépasse pas +24 dBW dans une bande quelconque de 1 MHz (voir la Note 2);

2.2 en présence de phénomènes d'affaiblissement dû aux précipitations entre les stations d'émission et de réception du service fixe, d'envisager de faire intervenir une CAPE afin d'accroître la puissance rayonnée par la station d'émission d'une valeur ne dépassant pas l'affaiblissement dû aux précipitations, de telle sorte que la densité de p.i.r.e. en direction des positions de l'OSG dont il est question plus haut ne dépasse pas +33 dBW dans une bande quelconque de 1 MHz;

2.3 lorsque l'affaiblissement dans l'atmosphère observé en direction des positions sur l'OSG dont il est question plus haut, calculé par application des procédures définies dans l'Annexe 1 à la Recommandation UIT-R P.676, compte tenu de l'angle d'élévation en direction de ces positions orbitales, de l'altitude de l'antenne d'émission de la station du service fixe et des données localement disponibles sur la teneur moyenne en vapeur d'eau au cours du mois le plus sec, et d'autres paramètres météorologiques (voir la Note 3), dépasse 3 dB, d'envisager de relever de cette même valeur la densité de p.i.r.e. de la station du service fixe;

2.4 lorsque les zones de Fresnel sur le trajet établi à partir d'une telle station d'émission du service fixe en direction des positions orbitales dont il est question plus haut sont totalement ou partiellement occultées, d'envisager de relever la densité de p.i.r.e. dans cette direction d'une valeur calculée par application des méthodes décrites dans la Recommandation UIT-R P.526, en tenant dûment compte de la réfraction dans l'atmosphère sur ce trajet (voir la Recommandation UIT-R F.1333);

2.5 de tenir compte du fait que l'Annexe 2 décrit une méthode applicable au calcul des séparations angulaires par rapport aux positions spécifiques sur l'OSG;

3 pour toutes les autres positions de l'OSG:

3.1 de faire en sorte que la densité de p.i.r.e. d'une telle station du service fixe en direction de l'OSG ne dépasse pas +33 dBW dans une bande quelconque de 1 MHz;

3.2 de tenir compte du fait que l'Annexe 2 à la Recommandation UIT-R SF.765 décrit une méthode applicable au calcul des angles de séparation par rapport à l'OSG (voir la Note 4);

4 les quatre Notes 1, 2, 3 et 4 suivantes font partie de la présente Recommandation:

NOTE 1 – La Recommandation UIT-R SA.1276-5 spécifie les positions orbitales suivantes sur l'orbite des satellites géostationnaires:

- 9° E; 10,6° E; 16,4° E; 16,8° E; 20,4° E; 21,5° E; 47° E; 59° E; 77° E; 80° E; 85° E; 89° E; 90,75° E; 95° E; 113° E; 121° E; 133° E; 160° E; 167° E; 171° E; 176,8° E; 177,5° E; 12° O; 16° O; 32° O; 41° O; 44° O; 46° O; 49° O; 62° O; 139° O; 160° O; 164,2° O; 167,5° W; 170° O; 171° O; 174° O.

Lorsque la Recommandation UIT-R SA.1276 est révisée afin d'ajouter de nouvelles positions orbitales pour les SRD, la protection des stations spatiales utilisant ces nouveaux créneaux orbitaux conformément à la révision de la présente Recommandation ne s'applique qu'aux stations du service fixe installées après la date d'entrée en vigueur de la Recommandation UIT-R SA.1276 révisée.

NOTE 2 – Les brouillages pouvant être occasionnés à des SRD par des systèmes hertziens fixes point à point et dépassant les limites de densité de p.i.r.e. définies au *recommande* 2.1 peuvent être réduits si l'on évite d'utiliser les fréquences centrales attribuées à ces satellites, lorsque cela est envisageable dans la pratique. Il conviendra d'étudier plus avant cette technique de réduction.

NOTE 3 – La Recommandation UIT-R F.1404 expose une méthode d'estimation des affaiblissements dans l'atmosphère, qui repose sur l'utilisation d'informations détaillées sur les paramètres météorologiques locaux pour la bande 25,5-27,5 GHz. Lorsque de telles données ne sont pas disponibles, une méthode simple, reposant sur des modèles climatiques simplifiés, est proposée à titre provisoire. Cette méthode appelle toutefois un complément d'étude. Les administrations disposant de paramètres météorologiques locaux utilisables dans l'estimation des phénomènes d'affaiblissement dû aux gaz sont priées de communiquer ces informations à l'UIT-R (notamment aux Commissions d'études 3 et 5 des radiocommunications).

NOTE 4 – La Recommandation UIT-R SF.765 devait initialement servir à calculer des valeurs de séparation précises, jusqu'à 2 degrés. Il convient de noter que l'algorithme utilisé dans ladite Recommandation peut également s'appliquer jusqu'à 10 degrés en utilisant la valeur $B = 10^\circ$ au § 1 de l'Annexe 2 de la Recommandation UIT-R SF.765.

Annexe 1

Densité maximale de p.i.r.e. des émetteurs de systèmes hertziens fixes point à point exploités dans la bande 25,25-27,5 GHz en partage avec le service inter-satellites

1 Introduction

La présente Annexe résume un certain nombre d'analyses qui montrent que le critère de protection défini dans la Recommandation UIT-R SA.1155 pour les SRD peut être respecté sauf en présence d'un phénomène de couplage de faisceaux principaux dû aux émissions de stations hertziennes fixes point à point.

2 Modélisation des systèmes

2.1 Déploiement du service fixe point à point dans la bande 25,25-27,5 GHz

Les hypothèses suivantes concernant les caractéristiques techniques et opérationnelles des stations point à point du service fixe sont extrapolées à partir des systèmes existants dans la bande des 23 GHz.

- On suppose que 100 000 émetteurs sont répartis dans le monde dans la bande 25,25-27,5 GHz (bande des 26 GHz).

- Répartition estimée des niveaux de densité de p.i.r.e. des émetteurs:
 - on estime que plus de 70% de la totalité des liaisons du service fixe assurées dans la bande 25,25-27,5 GHz sont exploitées au-dessous de +24 dB(W/MHz);
 - on estime que moins de 25% des systèmes sont exploités dans une fourchette comprise entre + 24 et +33 dB(W/MHz);
 - on estime enfin que moins de 5% de ces liaisons sont exploitées au-dessus de +33 dB(W/MHz).
- Chaque émetteur exploite une seule fréquence, la moitié des émetteurs fonctionnent dans le sens «aller», l'autre moitié dans le sens «retour».
- La disposition des canaux est conforme à la Recommandation UIT-R F.748 (les largeurs de bande recommandées par canal sont comprises entre 112 MHz et 3,5 ou 2,5 MHz, et il serait possible d'ajouter des largeurs de bande de 1,75 ou 1,25 MHz à l'avenir).
- Les canaux exploités sont répartis sur l'ensemble de la bande.
- Les angles d'élévation sont en général compris entre 0° et 5°.
- La longueur des trajets est généralement comprise entre 2 et 5 km.
- Dans la bande des 26 GHz, il est nécessaire de prévoir d'importantes marges pour tenir compte des évanouissements dus à la pluie et obtenir une disponibilité de 99,999%.
- Les principaux fournisseurs du service fixe point à point ont tendance à choisir la plus faible puissance d'émission possible afin de réduire les espacements dans les configurations à réutilisation de fréquences.
- Dans le parc des équipements disponibles, très rares sont les systèmes dotés d'une commande automatique de puissance.

2.2 Déploiement des SRD utilisant des liaisons espace-espace du service inter-satellites

Les caractéristiques techniques et opérationnelles des SRD qu'envisagent d'exploiter la NASA (Etats-Unis d'Amérique), l'Agence spatiale européenne (ESA), l'Agence spatiale russe et la JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency – Agence japonaise d'exploration aérospatiale), satellites qui utiliseront des liaisons espace-espace dans la bande des 26 GHz, sont résumées ci-après:

- Les positions orbitales sont indiquées dans la Recommandation UIT-R SA.1276.
- Caractéristiques types des SRD:
 - deux antennes à accès unique et gain élevé (gain maximal: 58 dBi);
 - ouverture du faisceau de l'antenne de réception à 3 dB: < 0,2 degrés;
 - l'antenne de réception ne traite qu'un signal de retour dans la bande des 20/30 GHz;
 - température de bruit du récepteur du satellite: $T = 703$ K (densité de bruit de -140,13 dB(W/MHz));
 - débits de données sur la voie de retour: 1 kbit/s-300 Mbit/s dans une largeur de bande de 225 MHz;
 - débits de données sur la voie de retour: 1 kbit/s-800 Mbit/s dans une largeur de bande de 650 MHz;
 - fréquence centrale de réception réglable par pas de 25 MHz (ou par valeurs inférieures).

- Les fréquences centrales des SRD choisies compte tenu des recommandations du SNIP (*Space Network Interoperability Panel* – Groupe sur l'interopérabilité des réseaux spatiaux) pour les canaux de retour communs seront les suivantes: 25,60; 25,85; 26,10; 26,35; 26,60; 26,85; 27,10 ou 27,35 GHz.

Aucune technique de réduction des brouillages n'a été étudiée ou appliquée pour ce qui est de la génération actuelle des SRD fonctionnant dans la bande des 26 GHz.

3 Evaluation des brouillages

3.1 Critères de protection applicables aux SRD

La Recommandation UIT-R SA.1155, intitulée «Critères de protection relatifs à l'exploitation des systèmes à satellites relais de données», recommande que le niveau maximal de densité spectrale de puissance du brouillage cumulatif à ne pas dépasser, pour toutes les sources, pendant plus de 0,1% du temps, soit de -178 dB(W/kHz) dans la bande 25,25-27,5 GHz (ce qui équivaut à -148 dB(W/MHz)). Ce niveau est calculé sur la base d'un rapport signal brouilleur/bruit de -10 dB et d'une dégradation de 0,4 dB de la marge de liaison. La largeur de bande de référence maximale recommandée est de 1 kHz. Le critère de protection donne une densité maximale de p.i.r.e. brouilleuse de 13,5 dB(W/MHz), rayonnée par le système fixe en direction du SRD en présence d'un phénomène de couplage des faisceaux principaux, comme indiqué au Tableau 1.

TABLEAU 1

Densité maximale de p.i.r.e. rayonnée par un système du service fixe en direction d'un SRD, en présence d'un phénomène de couplage des faisceaux principaux

Densité de p.i.r.e. rayonnée par le service fixe (dB(W/MHz))	13,5
Affaiblissement dans l'atmosphère (dB)	3
Affaiblissement de polarisation (dB)	3
Affaiblissement en espace libre (dB)	213,5
Gain maximal de l'antenne de réception du SRD (dBi)	58
Densité maximale de puissance brouilleuse (dB(W/MHz))	-148

3.2 Brouillage par le faisceau principal

Les critères de brouillage par le faisceau principal couvrent:

- la limite tolérable de densité de p.i.r.e. rayonnée par le service fixe, c'est-à-dire la valeur qui respecte les critères de protection des SRD définis dans la Recommandation UIT-R SA.1155;
- la probabilité de brouillage par le faisceau principal. La limite tolérable de densité de p.i.r.e. due au service fixe est calculée dans l'hypothèse d'un brouillage occasionné dans le même canal vers une orbite de SRD non inclinée. L'évaluation de la probabilité de brouillage par le faisceau principal est faite d'après les conditions d'exploitation des deux systèmes.

On considère le cas d'un faisceau hertzien du service fixe rayonnant en direction d'un SRD et occasionnant un phénomène de couplage dans le faisceau principal de l'antenne à gain élevé de ce satellite pour diverses valeurs de niveau de densité de p.i.r.e. Les résultats sont exposés au Tableau 2, qui montre qu'une densité spectrale de p.i.r.e. supérieure à 13,5 dB(W/MHz), avec un affaiblissement dû à l'absorption atmosphérique de 3 dB et un affaiblissement de polarisation de 3 dB, entraîne un niveau de brouillage supérieur à la valeur spécifiée dans la Recommandation UIT-R SA.1155 dans le cas d'un alignement direct.

TABLEAU 2

**Dépassement du critère de brouillage en fonction de la densité
de p.i.r.e. rayonnée du service fixe vers le SRD**

Densité de p.i.r.e. occasionnée par le service fixe (dB(W/MHz))	13,5	24	33
Gain de l'antenne de réception du SRD (dBi)	58	58	58
Affaiblissement en espace libre (dB)	213,5	213,5	213,5
Affaiblissement dans l'atmosphère (dB)	3	3	3
Affaiblissement de polarisation (dB)	3	3	3
Puissance du signal brouilleur, I (dB(W/MHz))	-148	-137,5	-128,5
Critère de brouillage maximal (dB(W/MHz))	-148	-148	-148
<i>Dépassement du critère (dB)</i>	<i>0</i>	<i>10,5</i>	<i>19,5</i>

On notera que l'affaiblissement dans l'atmosphère peut être inférieur à 3 dB dans certaines conditions climatiques pour des angles d'élévation importants.

On a procédé à diverses simulations pour évaluer le brouillage en pourcentage du temps dans le cas d'un SRD suivant un satellite en orbite terrestre basse (LEO). Pour analyser le brouillage en pourcentage du temps, il est nécessaire de simuler le vol orbital du satellite LEO. Divers angles d'inclinaison des systèmes LEO ont été considérés. Dans chaque cas, la valeur de longitude de la station de Terre retenue était telle que le SRD se trouvait dans le faisceau principal de l'antenne de la station de Terre, dirigé dans le plan horizontal.

On a procédé à trois simulations différentes, sur 100 jours, avec un pas de 0,1 min, et l'on a calculé, pour chaque pas considéré, la valeur du brouillage occasionné par rapport à la valeur observée dans le cas d'un couplage en ligne de visée au niveau du récepteur du SRD. Les résultats des séries de simulations sont représentés graphiquement à la Fig. 1. Ces trois configurations étaient les suivantes:

- Cas 1:* satellite utilisateur en orbite basse, altitude: 300 km; inclinaison: 85°; latitude de la station du service fixe: 50°;
- Cas 2:* satellite utilisateur en orbite basse, altitude: 300 km; inclinaison: 65°; latitude de la station du service fixe: 60°;
- Cas 3:* satellite utilisateur en orbite basse, altitude: 300 km; inclinaison: 28,5°; latitude de la station du service fixe: 28,5°.

Les courbes de la Fig. 1 permettent de déterminer la densité spectrale de p.i.r.e. qui, dans des conditions de propagation en espace libre, garantira que la puissance brouilleuse reçue par le SRD ne dépasse pas la valeur de -148 dB(W/MHz) pendant plus de 0,1% du temps. Les calculs sont résumés au Tableau 3. Ce Tableau montre que la densité spectrale de p.i.r.e. requise pour répondre aux critères est fonction des paramètres orbitaux du satellite LEO que le SRD suit et du lieu où se trouve la station d'émission du service fixe. Les valeurs acceptables de densité spectrale de p.i.r.e. sont comprises entre 31,5 dB(W/MHz) dans le cas 1, et 17,5 dB(W/MHz) pour le cas 3. Aux fins de la présente Recommandation, une valeur unique de 24 dB(W/MHz) est acceptable. La densité spectrale de p.i.r.e. considérée est obtenue dans des conditions de propagation en espace libre.

Plusieurs conditions d'exploitation réduisent substantiellement la probabilité de brouillage entre le service fixe et les SRD, ainsi que les effets de ce type de brouillage:

- la répartition des niveaux de densité de p.i.r.e. dans le service fixe (voir le § 2.1), qui donne à penser que, probablement, moins de 30% des systèmes de ce service sont exploités au-dessus de la limite +24 dB(W/MHz);

- les différences d'utilisation des bandes de fréquences que l'on peut observer entre les systèmes du service fixe et les SRD (se reporter au Tableau 5), qui indiquent qu'en général seulement 4% des phénomènes de couplage des faisceaux principaux occasionnent des brouillages;
- le fait que les antennes des émetteurs du service fixe sont pointées à la fois selon un angle d'azimut aléatoire uniformément réparti entre 0° et 360°, et selon un angle d'élévation aléatoire uniformément réparti entre 0° et 5° (se reporter aux § 3.1 et 3.3 de la présente Annexe), ce qui réduit encore la probabilité de couplage direct des faisceaux d'un facteur d'au moins 10³.

En fait, la probabilité de couplage direct des faisceaux est inférieure à 10⁻⁵.

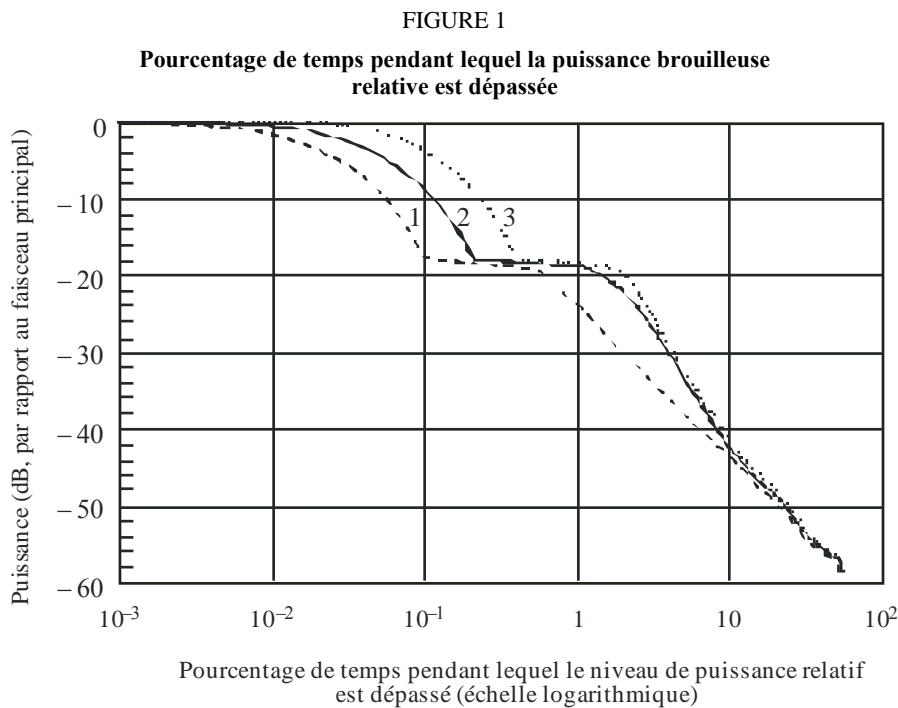


TABLEAU 3

Résumé des calculs permettant de déterminer la valeur acceptable de densité spectrale de p.i.r.e. des émissions des stations du service fixe en direction d'un SRD

Cas	Niveau de puissance par rapport au faisceau principal au percentile 0,1% (voir la Fig. 1) (dB)	Densité de p.i.r.e. pour $I = -148$ dB(W/MHz)	Densité de p.i.r.e. acceptable (dB(W/MHz))
1	-18	13,5	31,5
2	-9	13,5	22,5
3	-4	13,5	17,5

3.3 Brouillage cumulatif

La densité maximale de p.i.r.e. a été calculée à partir de la plus élevée des valeurs retenues pour chaque distribution des densités de puissance émise en direction des SRD par les systèmes du service

fixe (voir le § 2.1 de la présente Annexe). La moyenne pondérée la plus défavorable donne en l'occurrence un niveau de densité de p.i.r.e. de 36,2 dB(W/MHz), comme l'indique le Tableau 4.

TABLEAU 4
**Répartition estimative des niveaux de densité
de p.i.r.e. rayonnée par le service fixe**

50%	26 dB(W/MHz)	398 W/MHz
40%	33 dB(W/MHz)	1 995 W/MHz
10%	45 dB(W/MHz)	31 623 W/MHz
Moyenne pondérée		36,19 dB(W/MHz)

Le nombre de signaux brouilleurs présents dans un même canal a été déterminé à partir du modèle de répartition du § 2.1 de la présente Annexe. On estime que pas moins de 100 000 émetteurs du service fixe peuvent être en exploitation dans la bande 25,25-27,5 GHz dans le monde entier. Sur la base du «Plan allemand» pris pour exemple dans la Recommandation UIT-R F.748, on peut supposer qu'il y a:

- 50 000 émetteurs dans la partie inférieure de la bande (25,56-26,06 GHz);
- 50 000 émetteurs dans la partie supérieure de la bande (26,68-27,18 GHz).

La répartition des canaux utilisés dans les simulations de Monte Carlo est précisée au Tableau 5 pour une largeur de bande totale de 500 MHz dans le «Plan allemand». Sur un nombre total de 100 000 émetteurs en place dans le monde, on pourrait dénombrer au total, dans une bande quelconque de 1 MHz, 2 001 émetteurs fonctionnant dans le même canal.

TABLEAU 5
**Répartition estimative des largeurs de bande de canal utilisées
par les stations point à point du service fixe**

Largeur de bande par canal (MHz)	Utilisation estimée (%)	Nombre, sur 50 000	Nombre de stations fonctionnant dans le même canal
112	5	2 500	625
56	5	2 500	312
28	10	5 000	312
14	30	15 000	428
7	30	15 000	210
3,5	15	7 500	106
1,75	5	2 500	8
Total			2 001

La répartition spatiale du brouillage est déterminée à partir d'une simulation de Monte Carlo dans laquelle on suppose que l'équivalent de 2 000 émetteurs du service fixe sont répartis autour des principales villes du monde. Les émetteurs fonctionnent dans le même canal avec une densité de p.i.r.e. moyenne de 36 dB(W/MHz), et les antennes du service fixe sont pointées selon des azimuts choisis de façon aléatoire et uniformément répartis entre 0° et 360°. Les Fig. 2 et 3 représentent la

densité cumulative de brouillage au niveau de deux SRD placés respectivement à 41° O et à 174° O, en fonction de l'angle de pointage de l'antenne du satellite (roulis et tangage).

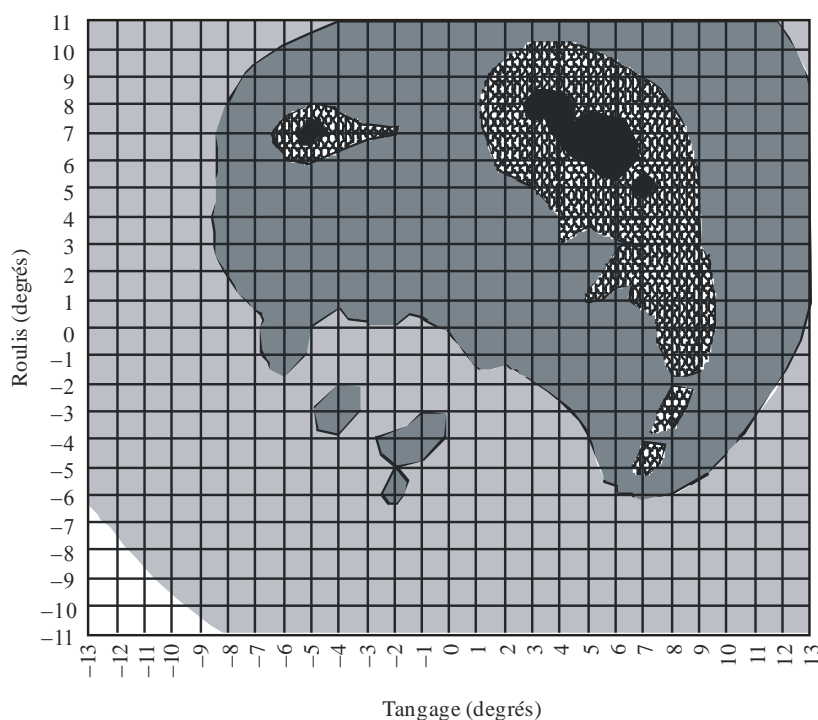
Dans le cas du SRD en orbite à 41° O (voir la Fig. 2), le niveau maximal cumulatif de brouillage est de -148 dB(W/MHz), de sorte que le critère de protection serait respecté sauf en cas de couplage des faisceaux principaux avec un seul émetteur du service fixe fonctionnant dans le même canal pouvant occasionner un brouillage dépassant le critère.

La Fig. 3 montre que dans le cas d'un SRD placé à 174° O, le niveau maximal cumulatif de brouillage est de $-149,5$ dB(W/MHz), niveau inférieur de $1,5$ dB au critère. Ici encore, le critère de protection serait respecté sauf en cas de phénomène de couplage des faisceaux principaux.

Les Fig. 2 et 3 montrent que le niveau cumulatif de brouillage résultant de la répartition aléatoire des faisceaux hertziens prise pour hypothèse dans les simulations de Monte Carlo ne semble pas occasionner de brouillages dépassant les critères définis dans la Recommandation UIT-R SA.1155. Pour conclure, on peut dire que le brouillage cumulatif occasionné aux SRD par les émissions de stations point à point du service fixe réparties de façon aléatoire ne dépassera pas la valeur de -148 dB(W/MHz), et que les phénomènes de couplage des faisceaux principaux évoqués au § 3.2 se traduiront par des brouillages dépassant les critères définis dans la Recommandation UIT-R SA.1155.

FIGURE 2

Brouillage cumulatif (dB(W/MHz)) occasionné à un SRD situé à 41° O,
en fonction des angles de pointage de l'antenne du satellite



Niveau maximal du brouillage cumulatif = -148 dB(W/MHz)
Critère: -148 dB(W/MHz)



F.1249-02

4 Techniques de réduction des brouillages

4.1 Systèmes du service fixe

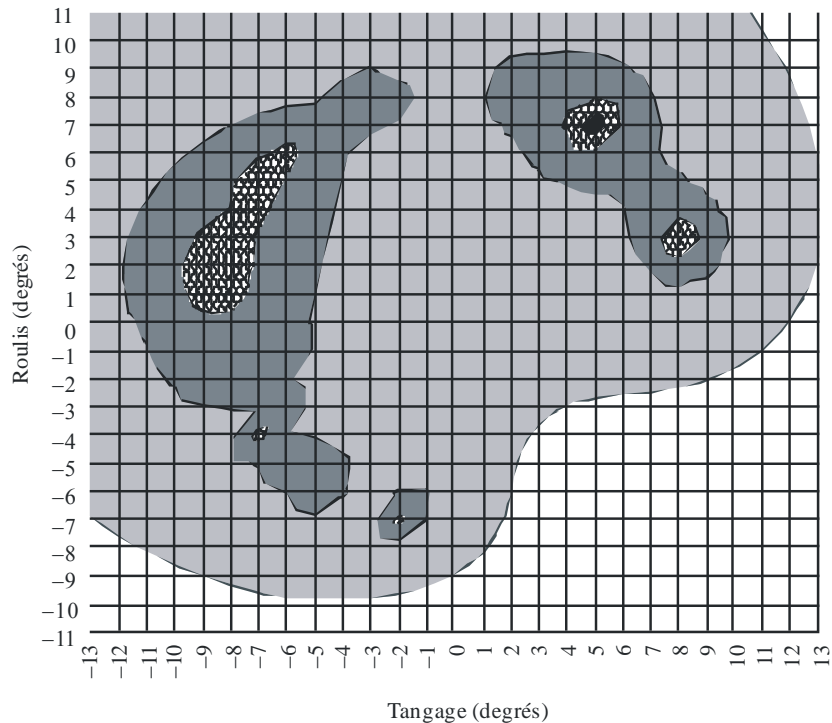
Pour réduire les brouillages, on peut recourir à certaines méthodes fondamentales, et établies, de conception des systèmes ou encore à diverses techniques élaborées spécifiquement à cette fin:

- Fonctionnement à la valeur minimale de densité de p.i.r.e. nécessaire, utilisé pour des raisons d'économie et d'exploitation, puisqu'une telle technique permet, par exemple, d'abaisser le coût des équipements et celui de leur maintenance, d'adopter des équipements plus petits et plus légers, de réduire la consommation primaire d'énergie ou encore de raccourcir les espacements en cas de réutilisation des fréquences.
- Adoption de systèmes tenant compte des effets d'affaiblissement dans l'atmosphère.

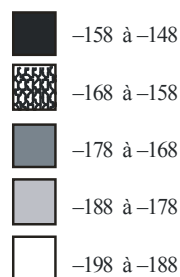
- Choix des emplacements et des configurations, permettant de réduire substantiellement les rayonnements dépassant la portée de service requise du système fixe considéré, soit par effet de blocage ou d'occultation par des obstacles naturels et/ou artificiels, soit par occultation partielle (zone de Fresnel) entraînant un affaiblissement de diffraction (voir l'Annexe 3).
- Utilisation de systèmes de CAPE.

FIGURE 3

Brouillage cumulatif (dB(W/MHz)) occasionné à un SRD situé à 174° O, en fonction des angles de pointage de l'antenne du satellite



Niveau maximal du brouillage cumulatif = -149,5 dB(W/MHz)
Critère: -148 dB(W/MHz)



F.1249-03

4.2 Systèmes à SRD

Les techniques de réduction des brouillages à utiliser dans le cas des SRD couvrent, par exemple, l'agilité en fréquence et la redondance, l'intégration des phénomènes de brouillage et l'annulation adaptative. L'UIT-R a d'ailleurs amorcé une étude des techniques de réduction des brouillages.

4.3 Partage des fréquences et coopération

La coexistence programmée du service fixe et du service par SRD pose un nouvel ensemble de problèmes de partage des fréquences qui appelle une nouvelle approche. En la matière, l'approche la

plus prometteuse semble passer, au niveau de l'exploitation, par la mise en place d'un cadre de coopération susceptible:

- de faciliter la compréhension mutuelle des besoins du service et des conditions d'exploitation;
- de déboucher sur des méthodes de partage appropriées;
- de favoriser la mise en œuvre de contre-mesures dans les deux services.

5 Conclusions

Si l'on pose l'hypothèse d'une densité moyenne de p.i.r.e. des stations point à point du service fixe de 36 dB(W/MHz), rayonnée selon de faibles angles d'élévation et des azimuts aléatoires, si on utilise, aussi bien au niveau des stations du service fixe que des SRD, des antennes à faisceaux étroits et gain élevé et si on adopte les plans de disposition des canaux dans le service fixe, il semble que les critères de protection des SRD (voir la Recommandation UIT-R SA.1155) puissent être respectés dans tous les cas, à l'exception des phénomènes de couplage dans l'axe ou au voisinage de l'axe des faisceaux principaux. Il faut limiter à 24 dB(W/MHz) les émissions des stations point à point du service fixe en direction des positions orbitales des SRD pour respecter les critères de protection définis dans la Recommandation UIT-R SA.1155 (cette valeur s'applique à des conditions de propagation en espace libre).

La mise en place d'un cadre de coopération pour le partage des fréquences serait utile pour l'application de la présente Recommandation.

Annexe 2

Méthode de calcul des séparations angulaires entre les faisceaux des antennes d'émission des stations point à point du service fixe et les directions des SRD géostationnaires

1 Introduction

La présente Annexe expose une méthode de calcul des séparations angulaires entre les faisceaux des antennes d'émission du service fixe et les directions des SRD géostationnaires mis en orbite comme spécifié au *recommande* 2, compte tenu des effets de réfraction dans l'atmosphère et de l'horizon local.

2 Paramètres de la station du service fixe

Les paramètres de la station du service fixe considérée sont:

ζ : latitude de la station (valeur absolue);

α_r : azimut du faisceau d'antenne mesuré dans le sens trigonométrique à partir du nord;

ε_r : angle d'élévation du faisceau d'antenne;

h : altitude de l'antenne par rapport au niveau de la mer (km);

δ : différence de longitude (valeur absolue) entre la station et l'un des satellites visés au *recommande 2*.

Lorsque δ est supérieur à 90° (ou plus précisément, lorsque $\cos \delta < 0$), le satellite n'est pas visible de la station du service fixe et il n'est donc pas nécessaire de prolonger le calcul (au reste, même lorsque δ est légèrement inférieur à 90° , le satellite est parfois invisible, mais cette question sera abordée ultérieurement).

3 Détermination de l'azimut du satellite

On considère un modèle ellipsoïdal, dans lequel le rayon de la Terre, R , est égal à 6378,14 km (à l'équateur) et f (facteur d'ellipsité de la Terre) est égal à 1/298,25. En conséquence, le rayon de la Terre au pôle s'écrit $(1 - f)R$.

Dans ce cas, la latitude géocentrique ζ_1 et le rayon effectif de la Terre R_1 à la latitude géographique ζ , et à l'altitude de l'antenne h , sont donnés par:

$$\zeta_1 = \operatorname{arctg} [(1 - f)^2 \operatorname{tg} \zeta] \quad (1)$$

$$R_1 = R(1 - f \sin^2 \zeta_1) + h \quad (2)$$

On calcule ensuite la valeur de Ψ (arc de grand cercle compris entre la station du service fixe et le point subsatellite) comme suit:

$$\Psi = \arccos (\cos \zeta_1 \cos \delta) \quad (3)$$

Ce qui permet d'obtenir l'azimut α_s du satellite vu de la station du service fixe:

$$\alpha'_s = \arccos (\operatorname{tg} \zeta_1 \operatorname{cotg} \Psi) \quad (4)$$

$$\alpha_s = \alpha'_s = 180^\circ \quad \text{dans le cas d'une station du service fixe située dans l'hémisphère nord, les satellites étant situés à l'ouest de cette station} \quad (5a)$$

$$\alpha_s = 180^\circ - \alpha'_s \quad \text{dans le cas d'une station du service fixe située dans l'hémisphère nord, les satellites étant situés à l'est de cette station} \quad (5b)$$

$$\alpha_s = 360^\circ - \alpha'_s \quad \text{dans le cas d'une station du service fixe située dans l'hémisphère sud, les satellites étant situés à l'ouest de cette station} \quad (5c)$$

$$\alpha_s = \alpha'_s \quad \text{dans le cas d'une station du service fixe située dans l'hémisphère sud, les satellites étant situés à l'est de cette station} \quad (5d)$$

4 Détermination de l'élévation du satellite

On calcule tout d'abord l'élévation (ε'_s) du satellite vu de la station du service fixe, en supposant qu'il n'y a pas de réfraction dans l'atmosphère:

$$\varepsilon'_s = \arctg \left(\frac{K \cos \Psi - 1}{K \sin \Psi} \right) \quad (6)$$

où:

$$K = R_s/R_1$$

$$R_s = 42\,164 \text{ km (rayon de l'orbite).}$$

Pour tenir compte des effets de la réfraction dans l'atmosphère et de l'horizon local, on définit les angles d'élévation suivants:

ε_{m1} : angle d'élévation en direction de l'horizon local, pour une courbure atmosphérique maximale, vu de l'altitude de l'antenne du service fixe à l'azimut du satellite (α_s) (voir la Note 1)

ε_{m2} : angle d'élévation en direction de l'horizon local, pour une courbure atmosphérique minimale, vu de l'altitude de l'antenne du service fixe à l'azimut du satellite (α_s) (voir la Note 1).

On détermine ensuite la visibilité du satellite:

- on calcule $\varepsilon_1 = \varepsilon_{m1} - \tau_{max}(\varepsilon_{m1}, h)$ et $\varepsilon_2 = \varepsilon_{m2} - \tau_{min}(\varepsilon_{m2}, h)$, $\tau_{max}(\varepsilon, h)$ et $\tau_{min}(\varepsilon, h)$ étant respectivement les valeurs maximale et minimale de courbure atmosphérique correspondant à l'angle d'élévation ε , (les formules numériques étant données dans la Note 2);
- lorsque $\varepsilon_2 \leq \varepsilon'_s$, le satellite est toujours visible;
- lorsque $\varepsilon_1 \leq \varepsilon'_s < \varepsilon_2$, le satellite est visible pendant un certain pourcentage de temps;
- lorsque $\varepsilon'_s < \varepsilon_1$, le satellite n'est pas visible, quelles que soient les conditions de réfraction dues à l'atmosphère, si bien qu'il n'y a pas lieu de poursuivre le calcul.

Lorsque $\varepsilon_2 \leq \varepsilon'_s$, les angles d'élévation $\varepsilon_{s\,max}$ et $\varepsilon_{s\,min}$ du satellite correspondant respectivement aux courbures atmosphériques maximale et minimale peuvent être calculés par résolution du système d'équation suivant (voir la Note 3):

$$\varepsilon_{s\,max} - \tau_{max}(\varepsilon_{s\,max}, h) = \varepsilon'_s \quad (7a)$$

$$\varepsilon_{s\,min} - \tau_{min}(\varepsilon_{s\,min}, h) = \varepsilon'_s \quad (7b)$$

Lorsque $\varepsilon_1 \leq \varepsilon'_s < \varepsilon_2$, il n'est pas nécessaire de résoudre l'équation (7b): il suffit de résoudre l'équation (7a). Dans ce cas, on utilisera $\varepsilon_{s\,min} = \varepsilon_{m2}$.

L'angle d'élévation ε_s donnant la valeur minimale d'espacement angulaire avec une précision suffisante se calcule comme suit:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{s\,max} \quad \text{pour } \varepsilon_{s\,max} \leq \varepsilon_r \quad (8a)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_r \quad \text{pour } \varepsilon_{s\,min} \leq \varepsilon_r < \varepsilon_{s\,max} \quad (8b)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{s \min} \quad \text{pour} \quad \varepsilon_r < \varepsilon_{s \min} \quad (8c)$$

5 Détermination de l'angle de séparation

L'angle minimal de séparation SA entre le faisceau de l'antenne de la station du service fixe et la direction d'un SRD géostationnaire, vu de la station du service fixe, est donné par l'équation suivante:

$$SA = \arccos [\cos \varepsilon_r \cos \varepsilon_s \cos(\alpha_r - \alpha_s) + \sin \varepsilon_r \sin \varepsilon_s] \quad (9)$$

La séparation angulaire sera calculée pour chacun des SRD géostationnaires telle que spécifiée au *recommande 2*.

NOTE 1 – Lorsque l'horizon local est constitué par un terrain plat ou une mer, ε_m répond à l'équation suivante:

$$\varepsilon_m = -\arccos \left[\frac{R + h_1}{R + h} \times \frac{1 + N_0 \times 10^{-6}(1 + \Delta N/N_0)^{h_1}}{1 + N_0 \times 10^{-6}(1 + \Delta N/N_0)^h} \right] \quad (10)$$

où:

h : altitude (km) de l'antenne de la station par rapport au niveau de la mer

h_1 : altitude (km) de l'horizon local ($h \geq h_1$)

R : rayon de la Terre (6 370 km par hypothèse).

Selon la Recommandation UIT-R SF.765, ε_{m1} est un angle d'élévation correspondant à la courbure maximale due à l'atmosphère ($N_0 = 400$ et $\Delta N = -68$) et ε_{m2} un angle d'élévation correspondant à la courbure minimale due à l'atmosphère ($N_0 = 250$ et $\Delta N = -30$). On notera que $\varepsilon_{m1} \geq \varepsilon_{m2}$.

Dans la pratique, il est parfois difficile d'estimer les valeurs précises de ε_{m1} et de ε_{m2} , compte tenu du profil complexe de l'horizon local. Il peut être plus simple d'estimer les valeurs de ε_{m1} et de ε_{m2} en utilisant l'équation (10) et en prenant $h_1 = 0$ par hypothèse. On obtient ainsi en général un angle de séparation précis. Toutefois, si $\varepsilon_{s \max}$ est supérieur à ε_{m1} mais très proche de ε_{m1} , il se peut que le satellite ne soit pas visible en raison de l'horizon local. En pareil cas, on recommencera le calcul avec les valeurs effectives de ε_{m1} et ε_{m2} .

NOTE 2 – La courbure due à l'atmosphère (degrés) peut être calculée à l'aide des équations suivantes, obtenues à partir des éléments rassemblés dans l'Annexe 2 à la Recommandation UIT-R SF.765:

$$\tau_{\max}(\varepsilon, h) = 1 / [0,7885809 + 0,175963 h + 0,0251620 h^2 + \varepsilon (0,549056 + 0,0744484 h + 0,0101650 h^2) + \varepsilon^2 (0,0187029 + 0,0143814 h)] \quad (11a)$$

$$\tau_{\min}(\varepsilon, h) = 1 / [1,755698 + 0,313461 h + \varepsilon (0,815022 + 0,109154 h) + \varepsilon^2 (0,0295668 + 0,0185682 h)] \quad (11b)$$

où:

ε : angle d'élévation (degrés)

h : hauteur (km) de l'antenne de la station par rapport au niveau de la mer.

Ces équations sont valables dans l'intervalle $\varepsilon \geq \varepsilon_{m1}$ ou bien $\varepsilon \geq \varepsilon_{m2}$. L'algorithme utilisé dans la présente Annexe garantit que ces formules ne sont appliquées que lorsqu'elles sont valides.

NOTE 3 – Certaines précautions concernant la convergence sont nécessaires pour résoudre l'équation (7a), tout particulièrement lorsque h est important et que ε'_s est négatif. En conséquence, pour résoudre l'équation (7a) on pourra appliquer la méthode de Newton-Raphson en prenant comme valeur initiale $\varepsilon_{s \max} = \max(\varepsilon'_s, \varepsilon_{m1})$. La convergence est obtenue après plusieurs itérations.

On pourra procéder de même pour résoudre l'équation (7b); dans ce cas, la valeur initiale sera $\varepsilon_{s\min} = \max(\varepsilon'_s, \varepsilon_{m2})$.

NOTE 4 – On trouvera à la Pièce jointe 1 un programme informatique applicable au calcul des angles de séparation selon la méthodologie exposée dans la présente Annexe.

Pièce jointe 1 à l'Annexe 2

```

/*****
/* nom de fichier : drsang_b.c
/* langage : C
/* fonction : calcul des séparations angulaires entre les faisceaux
/* d'antenne d'émission du service fixe et les directions
/* des satellites relais de données géostationnaires
*****/

/*----- inclure fichiers -----*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <errno.h>

static double pi,rd,dr,em1,em2,a[3],b[3];

/*-----*/
/* module : courbure
/* fonction : définir les caractéristiques de courbure due à l'atmosphère
/* in h0 : altitude (km) de l'antenne de la station par rapport au niveau de la mer
/* h1 : altitude (km) de l'horizon local (h0>=h1)
/* out em1,2 : angles d'élévation vers l'horizon local correspondant respectivement
/* à la valeur maximale et à la valeur minimale de la courbure due à l'atmosphère
(voir l'équation (8))
/* a,b : coefficients de courbure due à l'atmosphère correspondant
/* aux valeurs maximale et minimale de courbure due à l'atmosphère
/*-----*/

void courbure(h0,h1)
double h0,h1;
{
double r=6378.0; /* rayon de la Terre (km) */
em1=-acos((r+h1)/(r+h0)*
(1+0.00040*pow(0.83,h1))/(1+0.00040*pow(0.83,h0)));
em2=-acos((r+h1)/(r+h0)*
(1+0.00025*pow(0.88,h1))/(1+0.00025*pow(0.88,h0)));
a[0]=(0.7885809+0.1759630*h0+0.0251620*h0*h0)*rd;
a[1]=(0.5490560+0.0744484*h0+0.0101650*h0*h0)*rd*rd;
a[2]=(0.0187029+0.0143814*h0)*rd*rd*rd;
b[0]=(1.7556980+0.3134610*h0)*rd;
b[1]=(0.8150220+0.1091540*h0)*rd*rd;
}

```

```

        b[2]=(0.0295668+0.0185682*h0)*rd*rd*rd;
    }
/*-----*/
/* module : tmax,tmin,dtmax,dtmin */
/* fonction : calcul de la courbure due à l'atmosphère en degrés */
/* in e : angle d'élévation (degrés) */
/* out tmax : courbure due à l'atmosphère (voir l'équation (11a)) */
/* dtmax : dérivée de tmax */
/* tmin : courbure due à l'atmosphère (voir l'équation (11b)) */
/* dtmin : dérivée de tmin */
/*-----*/
double tmax(e)
    double e;
    {return (1.0/(a[0]+e*(a[1]+a[2]*e)));}

double dtmax(e)
    double e;
    {return (-(a[1]+2.0*a[2]*e)*pow(tmax(e),2.0));}

double tmin(e)
    double e;
    {return (1.0/(b[0]+e*(b[1]+b[2]*e)));}

double dtmin(e)
    double e;
    {return (-(b[1]+2.0*b[2]*e)*pow(tmin(e),2.0));}

/*-----*/
/* module : sangle (séparation angulaire) */
/* fonction : calcul de la séparation angulaire en degrés */
/* in slon : longitude du satellite relais de données (radians) */
/* ilat : hémisphère nord ou sud */
/* rlat : latitude de la station hertzienne (radians) */
/* rlon : longitude de la station hertzienne (radians) */
/* az0 : azimut du faisceau d'antenne (radians) */
/* e0 : angle d'élévation du faisceau d'antenne (radians) */
/* h0 : altitude (km) de l'antenne de la station par rapport au niveau de la mer */
/* out sa : séparation angulaire */
/*-----*/
double sangle(slون,ilat,rлат,rлон,az0,e0,h0)
    double slon,ilat,rлат,rлон,az0,e0,h0;

{
    double delta,zeta,r1,arc,tanarc;
    double azss,azs,ees,e1,e2,es1,esmax,es2,esmin,es,sa;
    double r=6378.14; /* rayon de la Terre à l'équateur */
    double f=1/298.25; /* coefficient d'ellipsité de la Terre */
    double rs=42164; /* rayon de l'orbite */

    delta=rлон-slون;
    if(cos(delta)<=0) {sa=500.0;goto end_sa;}
    /* ----- Détermination de l'azimut du satellite ----- */
    zeta=atan(pow(1-f,2.0)*tan(rлат)); /* équation (1) */
    r1=r*(1-f*pow(sin(zeta),2.0))+h0; /* équation (2) */
}

```



```

arc=acos(cos(zeta)*cos(delta));    /* équation (3)          */
tanarc=tan(arc); if(tanarc<tan(zeta)) tanarc=tan(zeta);
if(tanarc==0.0) azss=0.0;
else azss=acos(tan(zeta)/tanarc);    /* équation (4)      */
if((ilat>0)&&(sin(delta)>=0)) azs=azss+pi;    /* équation (5a)    */
else if((ilat>0)&&(sin(delta)<0)) azs=pi-azss; /* équation (5b)    */
else if(sin(delta)>=0) azs=2*pi-azss;    /* équation (5c)    */
else azs=azss;                        /* équation (5d)    */
/* ----- Détermination de l'élévation du satellite ----- */
if(arc==0.0) ees=pi/2.0;
else ees=atan((cos(arc)-r1/rs)/sin(arc));    /* équation (6)     */
e1=em1-tmax(em1);
e2=em2-tmin(em2);
if(ees<e1) {sa=500.0; goto end_sa;}
else{
    /* ----- résolution de l'équation (7a), (voir la Note 3) ----- */
    es1=10.0;if(ees<em1) esmax=em1; else esmax=ees;
    while(fabs(esmax-es1)>1.0e-5){
        es1=esmax;
        esmax=es1-(es1-tmax(es1)-ees)/(1.0-dtmax(es1));
    }
    if(ees<e2) esmin=em2;
    else{
        /* ----- résolution de l'équation (7b), (voir la Note 3) ----- */
        es2=10.0;if(ees<em2) esmin=em2; else esmin=ees;
        while(fabs(esmin-es2)>1.0e-5){
            es2=esmin;
            esmin=es2-(es2-tmin(es2)-ees)/(1.0-dtmin(es2));
        }
    }
    if(esmax<=e0) es=esmax;                /* équation (8a)    */
    else if(esmin<=e0) es=e0;              /* équation (8b)    */
    else es=esmin;                          /* équation (8c)    */
    /* ----- Détermination de la séparation angulaire ----- équation (9) */
    sa=rd*acos(cos(e0)*cos(es)*cos(az0-azs)+sin(e0)*sin(es));
end_sa:
return sa;
}
}
/*-----*/
/* programme principal */
/*-----*/
void main()
{
    double lonsat[]={-174,-171,-170,-167.5,-164.2,-160,-139,-62,-49,
                    -46,-44,-41,-32,-16, -
12,9,10.6,16.4,16.8,20.4,21.5,47,59,77,80,85,89,90.75,95,113,121,133,160,167,171,176.8,177.5};
    const int nsat=sizeof lonsat / sizeof lonsat[0];
    double sa[sizeof lonsat / sizeof lonsat[0]];
    char str[1];
    double ilat,latd,latm,lats,rlat;

```

```

double  ilon,lond,lonm,lons,rlon;
double  az0d,az0,e0d,e0,h0m,h0,h1m,h1;
double  slon,samin;
int      isat;

pi=4.0*atan(1.0);          /* constante circulaire      */
rd=180.0/pi;              /* conversion radians/degres */
dr=pi/180.0;              /* conversion degres/radians */
/* ----- Saisie des parametres ----- */
printf("Parameters of the fixed service station \n");
input_NS:
printf("Hemisphere of the station : northern or southern (N/S) ? \n");
scanf("%s",&str);
if(*str=='N' || *str=='n') ilat=1;
else if(*str=='S' || *str=='s') ilat=-1;
else goto input_NS;
input_LAT:
printf("LAT : latitude (degree,minute,second) ? \n");
scanf("%le,%le,%le",&latd,&latm,&lats);
latd=ilat*(latd+latm/60.0+lats/3600.0); rlat=fabs(latd*dr);
input_EW:
printf("Longitude : east or west (E/W) ? \n");
scanf("%s",&str);
if(*str=='E' || *str=='e') ilon=1.0;
else if(*str=='W' || *str=='w') ilon=-1.0;
else goto input_EW;
input_LON:
printf("LON : longitude (degree,minute,second) ? \n");
scanf("%le,%le,%le",&lond,&lonm,&lons);
lond=ilon*(lond+lonm/60.0+lons/3600.0);rlon=lond*dr;
input_AZ:
printf("AZ0 : antenna azimuth, clockwise from the North (degree) ?\n");
scanf("%le",&az0d); az0=az0d*dr;
input_E0:
printf("E0 : antenna elevation (degree) ? \n");
scanf("%le",&e0d); e0=e0d*dr;
input_ALT:
printf("H0 : antenna altitude (m) ? \n");
scanf("%le",&h0m); h0=h0m/1000.0;
printf("H1 : horizon altitude (m) ? \n");
scanf("%le",&h1m); h1=h1m/1000.0;
if(h1>h0) {printf("h1<=h0"); goto input_ALT;}

/* ----- Calculs ----- */
bending(h0,h1);
samin=1000.0;
for(isat=0;isat<nsat;isat++){
    slon=dr*lonsat[isat];
    sa[isat]=sangle(slon,ilat,rlat,rlon,az0,e0,h0);
    if(sa[isat]<samin) samin=sa[isat];
}
/* ----- Afficher la separation angulaire ----- */

```

```

printf("\nParameters of the fixed service station \n");
printf(" latitude   : %7.2f (degree) \n",latd);
printf(" longitude  : %7.2f (degree) \n",lond);
printf(" antenna azimuth : %7.2f (degree) \n",az0d);
printf(" antenna elevation : %7.2f (degree) \n",e0d);
printf(" antenna altitude : %7.0f (m) \n",h0m);
printf(" horizon altitude : %7.0f (m) \n",h1m);
printf("\nGeostationary data relay satellites \n");
printf(" No. Longitude Separation angle \n");
for(isat=0;isat<nsat;isat++){
    printf("%5d %7.2f %7.2f \n",
        isat+1,lonsat[isat],sa[isat]);
}
printf("Minimum separation angle = %7.2f (degree) \n",samin);
}

```

Annexe 3

Réduction des brouillages par affaiblissement de diffraction

1 Introduction

Dans certaines circonstances, le blocage de zones de Fresnel réduit la densité spectrale de p.i.r.e. des émissions d'une station du service fixe en direction des positions orbitales des SRD. La grande majorité des systèmes hertziens fixes point à point exploités dans la bande des 26 GHz sont installés en milieu urbain, où des bâtiments bloquent souvent le trajet de transmission entre l'émetteur de la station du service fixe et la position orbitale du SRD. Notons ici que le bâtiment à l'origine de l'obstruction n'est pas nécessairement celui sur lequel est montée l'antenne de réception de la station du service fixe.

On montre que cette occultation est sensible à de faibles variations de lieu de la station d'émission du service fixe, si bien qu'un faible déplacement de cette station peut réduire considérablement le risque de brouillage. En outre, on montre également que l'occultation est sensible aux faibles variations de position, dues aux fluctuations orbitales normales, du SRD, de sorte que les brouillages causés par une succession de configurations potentiellement préjudiciables des satellites en orbite basse, des émetteurs de station fixe et des SRD varient sensiblement: en d'autres termes, un phénomène de brouillage intense peut être suivi d'un brouillage acceptable.

La présente Annexe illustre, à l'aide d'un exemple simplifié, les différents affaiblissements de diffraction pouvant résulter de l'occultation de zone de Fresnel.

2 Calculs de base de l'affaiblissement de diffraction

La Recommandation UIT-R P.526 expose les méthodes et formules de base qui permettent de calculer les valeurs d'affaiblissement de diffraction. Le § 4 de cette Recommandation considère l'affaiblissement de diffraction en fonction de l'étendue du blocage des zones de Fresnel, ainsi que des caractéristiques de l'obstacle faisant écran. Les valeurs d'affaiblissement observées représentent en fait la somme de deux composantes:

- a) l'affaiblissement de diffraction sur un obstacle modélisé en arête en lame de couteau;
- b) une composante résultant directement des caractéristiques physiques de l'obstacle réel, différentes de l'arête en lame de couteau modélisée.

Le résultat combiné peut dépasser considérablement le seul effet de diffraction sur une arête en lame de couteau.

La composante a), à savoir l'arête en lame de couteau modélisée, fait l'objet du § 4.1 de la Recommandation UIT-R P.526, qui donne des formules de calcul de l'affaiblissement de diffraction à l'aide d'une grandeur scalaire sans dimension spécifiant la portée du blocage de la 1^{ère} zone de Fresnel; la Fig. 4 de la présente Recommandation (identique à la Fig. 7 de la Recommandation UIT-R P.526) est une représentation graphique de l'affaiblissement de diffraction résultant en fonction de cette grandeur scalaire sans dimension. Par exemple, on observe un affaiblissement de diffraction de 6 dB lorsque la moitié de la 1^{ère} zone de Fresnel est occultée; les valeurs d'affaiblissement correspondantes dans les cas d'occultations sur 1/4, 3/4 et 4/4 de la zone de Fresnel, sont respectivement de 2, 10 et 14 dB. Avec une occultation étendue à la totalité de la 2^{ème} zone de Fresnel, l'affaiblissement de diffraction passe à 22 dB.

La composante b), soit la contribution additionnelle à l'affaiblissement de diffraction due à des caractéristiques physiques différant du modèle d'arête en lame de couteau, fait l'objet des § 4.2 à 4.5 de la Recommandation UIT-R P.526.

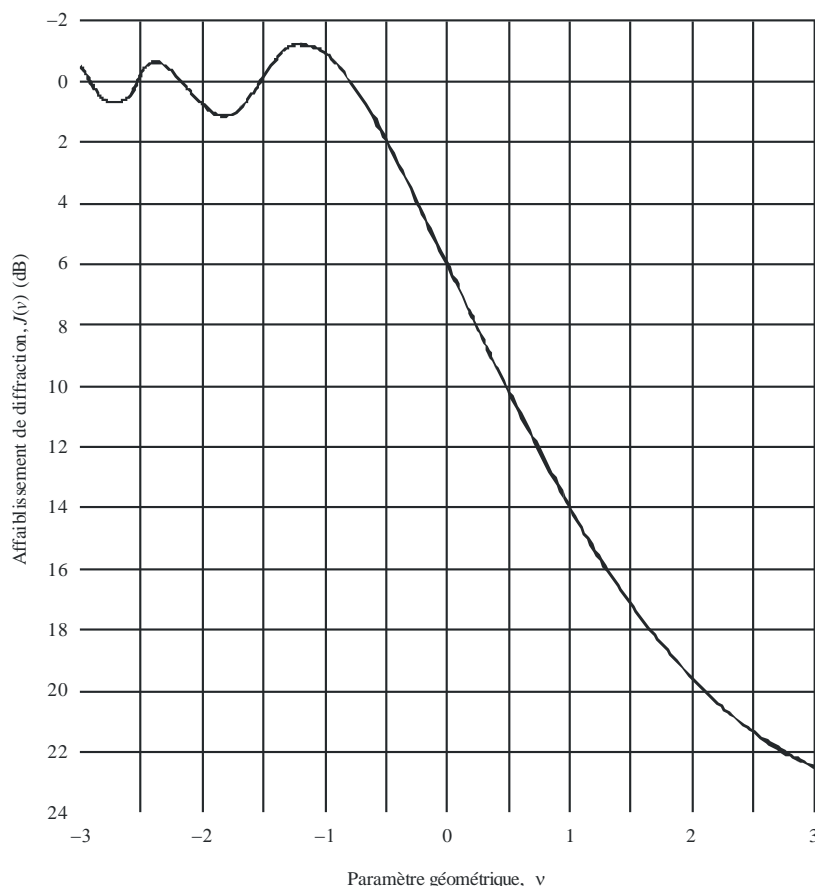
Le § 4.3 de la Recommandation UIT-R P.526 traite du cas d'un obstacle unique de sommet arrondi, applicable aux configurations dans lesquelles la forme du sommet du bâtiment qui bloque le trajet en direction de la position orbitale du SRD peut être ainsi modélisée. La méthode exposée peut être appliquée au calcul du surcroît d'affaiblissement dû à la forme et à la profondeur de l'obstacle.

3 Exemples d'affaiblissement de diffraction

Une première analyse simplifiée reposant sur les méthodes de calcul exposées dans la Recommandation UIT-R P.526 nous permettra d'appréhender la signification des variations d'affaiblissement de diffraction, qui peuvent être exploitées pour assouplir les limites de densité spectrale de p.i.r.e. applicables aux émissions des stations du service fixe en direction des positions orbitales des SRD.

FIGURE 4

Affaiblissement de diffraction sur une arête en lame de couteau
(voir la Recommandation UIT-R P.526)



F1249-04

On suppose que la station du service fixe est à l'horizon vue par le SRD, et dirigée vers lui. Les émissions de la station du service fixe vers le satellite sont partiellement bloquées par un obstacle situé au niveau de l'antenne de réception du service fixe, ou à proximité. L'obstacle est modélisé sous forme d'arête en lame de couteau unique, comme illustré à la Fig. 5. La station d'émission est située au point P_1 et le SRD récepteur au point P_2 . La distance de la station d'émission à l'obstacle qui est à l'origine de la diffraction est appelée d_1 . La distance par rapport au SRD est si grande qu'elle est considérée comme négligeable dans le calcul de l'affaiblissement de diffraction. On appelle h la hauteur de l'obstacle au-dessus du trajet direct. L'angle de diffraction, θ , est exprimé en radians et son signe est le même que celui de h (on suppose que θ est inférieur à 0,2 rad, soit 12°).

On utilise une grandeur scalaire sans dimension v qui permet de calculer, à partir de la Fig. 4, le champ résultant, basée sur la configuration géométrique exposée plus haut, et sur λ la longueur d'onde. La formule suivante est établie à partir de l'équation (14) de la Recommandation UIT-R P.526.

$$v = \theta \sqrt{\frac{2d_1}{\lambda}} \quad (12)$$

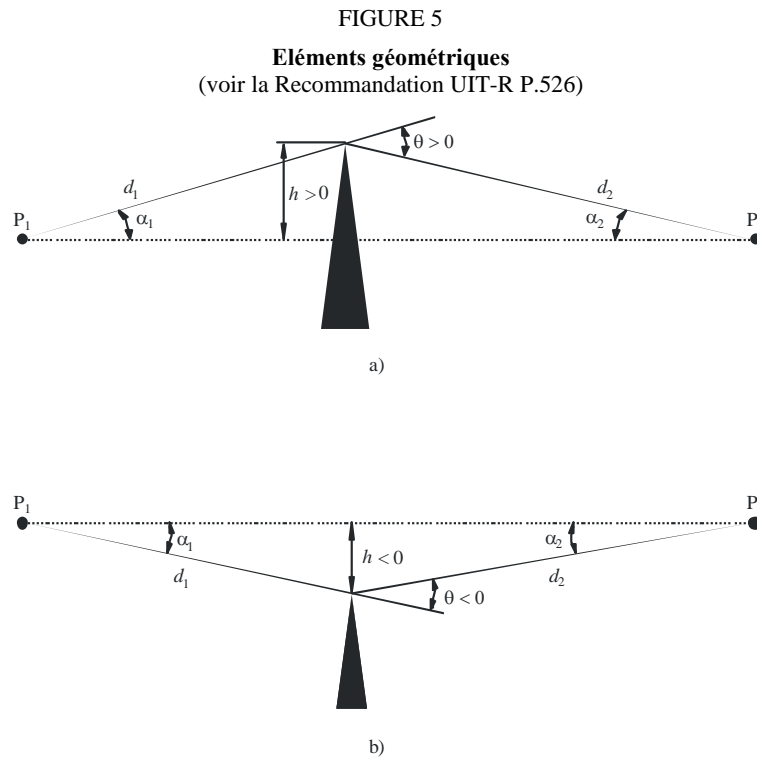
Un exemple donnera les limites de la valeur de l'affaiblissement du signal émis auquel on peut s'attendre en présence du blocage de zone de Fresnel.

On suppose que l'obstacle est un bâtiment situé à 4 km de l'antenne émettrice. Le sommet de ce bâtiment constitue un obstacle en arête en lame de couteau. L'antenne émettrice a un gain de 40 dB,

une largeur de faisceau de $1,64^\circ$ à 3 dB, et le trajet vers l'antenne de réception n'est pas obstrué. On suppose également que le faisceau de l'antenne émettrice est également réparti au-dessus et au-dessous du sommet du bâtiment. Pour une fréquence d'exploitation de 26 GHz, l'équation (12) donne:

$$v = 833 \theta \quad (13)$$

Lorsque $\theta = 0$, le paramètre v est nul pour un angle hors axe de 0° . Dans la configuration de la Fig. 4, on observe alors un affaiblissement de diffraction de 6 dB pour une antenne de réception de SRD située au-delà de l'obstacle sur la ligne droite passant par les trois points représentés par l'antenne d'émission, le sommet de l'obstacle et l'antenne de réception proprement dite.



α_1 et α_2 : angles séparant, à partir d'une extrémité, le sommet de l'arête et l'extrémité opposée

F.1249-05

Toutefois, si le sommet de l'obstacle est à $0,0017$ rad soit $0,1^\circ$, au-dessus de la ligne tracée entre l'antenne d'émission de la station du service fixe et le SRD (ce qui signifie soit que l'obstacle est plus élevé de 7 m, soit que l'antenne d'émission du service fixe est montée 7 m plus bas) alors $v = 1,45$, et l'affaiblissement de diffraction passe à 16,5 dB.

En revanche, si le sommet de l'obstacle est situé 7 m au-dessous du trajet de brouillage, $v = -1,45$, et l'affaiblissement de diffraction donné par le modèle en arête en lame de couteau entraînerait un renforcement du signal d'environ 1 dB.

4 Variabilité de l'affaiblissement de diffraction dans les phénomènes de brouillages occasionnés aux SRD

Dans le présent exemple, on évalue la variation du niveau de brouillage occasionné à un SRD placé sur une orbite inclinée de $0,1^\circ$ par une station du service fixe située à 45° de latitude nord. On suppose

que le SRD est situé sur la droite reliant la station d'émission du service fixe, le sommet de l'obstacle en forme d'arête en lame de couteau et le satellite lui-même. Le SRD se trouve sur sa position orbitale nominale, c'est-à-dire sur le plan équatorial. Dans cette configuration, le niveau théorique de brouillage est de -6 dB par rapport aux conditions de propagation en espace libre, comme nous l'avons vu plus haut.

Lorsque l'orbite présente un angle d'inclinaison fini, mais réduit, la latitude et la longitude du point sous-satellite sur une période de 24 h sont données par les équations suivantes:

$$\varphi_s = i \sin(\omega_e t) \quad (14a)$$

$$\Delta\lambda_s = \frac{i^2}{4} \sin(2\omega_e t) \quad (14b)$$

où:

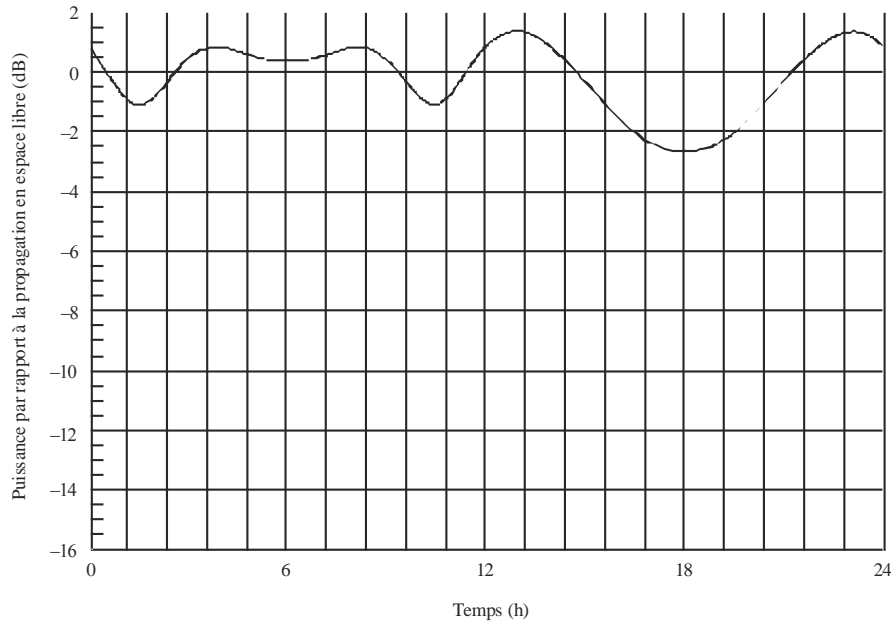
- φ_s : latitude du point subsatellite correspondant au SRD
- $\Delta\lambda_s$: augmentation de longitude de ce point
- i : angle d'inclinaison du plan orbital du satellite
- ω_e : vitesse de rotation de la Terre
- t : temps écoulé.

La variation diurne de la puissance de brouillage reçue par le SRD peut être évaluée à l'aide de l'équation (13) en fonction de la variation de l'angle d'élévation. On suppose que le sommet de l'obstacle est parallèle au plan horizontal local.

Pour déterminer l'effet d'une divergence de position nominale du SRD, on analyse deux cas. Dans le premier cas, on suppose que la position nominale du satellite est à $0,1^\circ$ au-dessus de la ligne reliant l'antenne d'émission du service fixe et l'arête du bâtiment qui fait obstruction, et dans le second cas, à $0,1^\circ$ au-dessous de cette ligne. Ces écarts sont largement compris dans la moitié de l'ouverture du faisceau à 3 dB ($1,64^\circ$). On suppose par ailleurs que la station du service fixe est située à 45° de latitude nord et que le plan orbital du SRD est incliné de $0,1^\circ$ par rapport au plan équatorial. La variation diurne du niveau de la puissance brouilleuse reçue par le SRD par rapport à des conditions de propagation en espace libre est indiquée aux Fig. 6 et 7 pour ces deux cas. La Fig. 6 fait apparaître que les variations diurnes de la puissance brouilleuse sont relativement faibles, tandis qu'elles sont comprises entre environ $-9,5$ et -21 dB dans le second cas (Fig. 7).

FIGURE 6

Variation diurne du niveau de la puissance brouilleuse reçue par un SRD sur orbite inclinée de $0,1^\circ$, avec un décalage de position orbitale de $0,1^\circ$ dans le plan d'élévation et une station du service fixe située à 45° de latitude nord



F.1249-06

5 Méthodes de conception et d'installation des liaisons du service fixe propres à accroître l'efficacité des mesures de réduction des brouillages par affaiblissement de diffraction

Il découle du *recommande* 2.4 de la présente Recommandation qu'il y a lieu de s'efforcer de promouvoir des méthodes de conception et d'installation des liaisons du service fixe propres à bloquer au mieux les trajets de brouillage risquant d'affecter les SRD, de telle sorte que les niveaux des émissions brouilleuses du service fixe soient effectivement réduits en raison du phénomène d'affaiblissement par diffraction.

Cet objectif, qui découle du souci de rendre le partage possible entre le service fixe et les SRD, est tout à fait conforme avec l'objectif interne du service fixe: limiter les brouillages afin de raccourcir les espacements nécessaires pour la réutilisation des fréquences aussi bien en milieu urbain que dans les grandes banlieues où sont installées la grande majorité des applications du service fixe dans la bande des 26 GHz et où seront installés la grande majorité des systèmes en projet. A cette fin, on montera de préférence les antennes des stations du service fixe sur les murs des bâtiments plutôt que sur les toits, et lorsqu'un montage sur un toit s'avérera nécessaire, on recherchera un point de fixation aussi bas que possible.

La généralisation de ces méthodes garantit l'obtention des plus fortes valeurs pratiquement envisageables d'affaiblissement de diffraction non seulement sur les éventuels trajets de brouillage interne dans le service fixe mais également sur les trajets potentiels de brouillage entre le service fixe et les SRD. Mais, en tout état de cause, des améliorations sont toujours possibles; en effet, on pourrait:

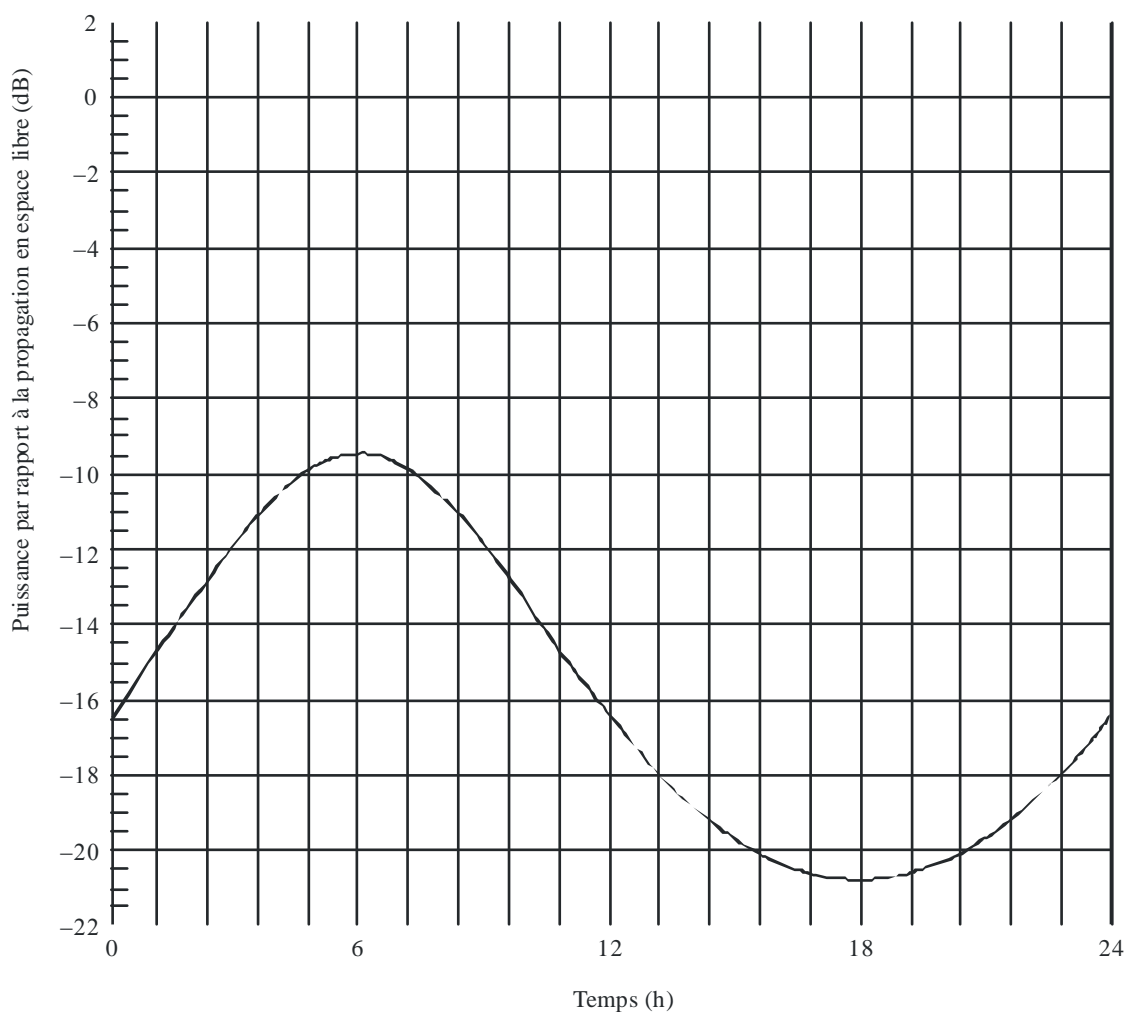
- procéder à une diffusion efficace d'informations pertinentes sur le problème des risques de brouillage;

- proposer des instructions simples et faciles à suivre pour rendre maximal l'affaiblissement de diffraction sur les trajets de brouillage éventuels, dans les configurations dans lesquelles les émissions du service fixe, sans intervention de ce type, dépasseraient la limite recommandée de densité spectrale de p.i.r.e.

Du point de vue des brouillages, la configuration la plus défavorable est représentée par le montage d'une antenne du service fixe sur une tour, car dans ce cas, l'affaiblissement de diffraction pouvant être obtenu est négligeable, à moins que le trajet de brouillage potentiel ne soit occulté derrière la tour par un obstacle naturel ou artificiel. Lorsqu'il n'est pas possible de les éviter pour des raisons d'exploitation, de telles liaisons à fort potentiel de brouillage devront être établies avec précaution dans tous les cas où les émissions du service fixe risqueraient de dépasser la limite recommandée de densité spectrale de p.i.r.e. En pareil cas, il importera également de fournir des instructions simples et faciles à suivre pour faciliter le respect des critères établis.

FIGURE 7

Variation diurne du niveau de la puissance brouilleuse reçue par un SRD sur orbite inclinée de $0,1^\circ$, avec un décalage de position orbitale de $-0,1^\circ$ dans le plan d'élévation et une station du service fixe située à 45° de latitude nord



6 Résumé et conclusions

Dans les vastes configurations typiques des systèmes point à point du service fixe exploités dans la bande des 26 GHz, le choix des emplacements et des configurations, qui permet de réduire les brouillages dans le service en exploitant le phénomène d'affaiblissement de diffraction, présente une grande importance. L'exploitation de ce phénomène permet également de réduire les brouillages potentiels entre services, par exemple les brouillages causés par des stations d'émission point à point du service fixe qui rayonnent vers un récepteur de SRD géostationnaire poursuivant lui-même un satellite en orbite terrestre basse. Si la configuration statique de brouillage dans un même service se prête aisément à la simple analyse exposée dans la Recommandation UIT-R P.526, les brouillages entre services posent un problème beaucoup plus complexe.

L'analyse simplifiée qui précède avait donc pour objet de faire comprendre l'importance de l'occultation de zones de Fresnel, phénomène qui pourrait permettre d'assouplir les limites de densité spectrale de p.i.r.e. applicables aux émissions des stations point à point du service fixe rayonnées vers les positions orbitales des SRD. Cette analyse nous a permis d'illustrer les variations diurnes de l'affaiblissement de diffraction, qui dépendent de la position nominale du SRD considéré, selon le trajet direct entre l'antenne d'émission du service fixe et l'antenne de réception. Dans les exemples considérés, la valeur nominale peut correspondre à la valeur en espace libre ou avoir un niveau pouvant être de 16,5 dB inférieur à l'espace libre. On constate donc que le niveau admissible de p.i.r.e. dans le cas de stations du service fixe présentant l'occultation de zones de Fresnel devrait être déterminé au coup par coup, selon l'emplacement, compte tenu donc de la configuration géographique et géométrique du trajet entre la station du service fixe et le SRD.

On notera que lorsque la station placée sur l'orbite des SRD se trouve dans le faisceau principal de l'antenne d'émission de la station point à point du service fixe tout en étant occultée par un bâtiment ou un autre élément de topographie, une autre partie de l'arc d'orbite géostationnaire est généralement visible sans aucune obstruction dans le faisceau principal de l'antenne du service fixe, de sorte que la station point à point du service fixe est toujours visée par les dispositions du *recommande* 3.
