

## RECOMMANDATION UIT-R SF.358-5\*

**VALEURS MAXIMALES ADMISSIBLES DE LA PUISSANCE SURFACIQUE PRODUITE  
À LA SURFACE DE LA TERRE PAR DES SATELLITES DU SERVICE FIXE  
PAR SATELLITE UTILISANT LES MÊMES BANDES DE FRÉQUENCES QUE  
LES FAISCEAUX HERTZIENS EN VISIBILITÉ DIRECTE AU-DESSUS DE 1 GHz**

(1963-1966-1974-1982-1993-1995)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que certaines bandes de fréquences sont utilisées en partage entre les systèmes du service fixe par satellite (SFS) et les faisceaux hertziens en visibilité directe;
- b) que, de ce fait, il faut faire en sorte que les émissions des satellites ne causent pas de brouillages non acceptables aux faisceaux hertziens en visibilité directe;
- c) que l'on peut assurer une protection satisfaisante des faisceaux hertziens contre les émissions des satellites en imposant des limites convenables à la puissance surfacique produite à la surface de la Terre dans une certaine largeur de bande de référence;
- d) que, néanmoins, la limitation de la puissance surfacique produite à la surface de la Terre devrait être telle qu'il n'en résulte pas de restrictions excessives dans la conception des systèmes du SFS;
- e) que, pour les systèmes du SFS, on peut utiliser des méthodes de dispersion de l'énergie de la porteuse afin de réduire la densité spectrale de puissance radioélectrique des émissions des satellites;
- f) que les calculs effectués à l'occasion d'études récentes montrent que l'on peut généralement augmenter les limites de la puissance surfacique en fonction de la fréquence, tout en continuant à assurer une protection satisfaisante aux faisceaux hertziens en visibilité directe,

*recommande*

**1** que, dans les bandes de fréquences de la gamme 2,5-27,5 GHz partagées entre les systèmes du SFS et les faisceaux hertziens en visibilité directe, la puissance surfacique produite à la surface de la Terre par l'émission d'un satellite, y compris celle provenant d'un satellite réflecteur, pour toute méthode et toute condition de modulation ne dépasse pas les valeurs suivantes:

**1.1** dans la bande de 2,5 à 2,690 GHz, dans n'importe quelle bande de 4 kHz:

|                              |                       |  |
|------------------------------|-----------------------|--|
| -152                         | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour $\theta \leq 5^\circ$             |
| -152 + 0,75 ( $\theta - 5$ ) | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour $5^\circ < \theta \leq 25^\circ$  |
| -137                         | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour $25^\circ < \theta \leq 90^\circ$ |

**1.2** dans la bande de 3,4 à 7,750 GHz, dans n'importe quelle bande de 4 kHz:

|                             |                       |  |
|-----------------------------|-----------------------|--|
| -152                        | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour $\theta \leq 5^\circ$             |
| -152 + 0,5 ( $\theta - 5$ ) | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour $5^\circ < \theta \leq 25^\circ$  |
| -142                        | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour $25^\circ < \theta \leq 90^\circ$ |

**1.3** dans la bande de 8,025 à 11,7 GHz, dans n'importe quelle bande de 4 kHz:

|                             |                       |  |
|-----------------------------|-----------------------|--|
| -150                        | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour $\theta \leq 5^\circ$             |
| -150 + 0,5 ( $\theta - 5$ ) | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour $5^\circ < \theta \leq 25^\circ$  |
| -140                        | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour $25^\circ < \theta \leq 90^\circ$ |

\* 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.

1.4 dans la bande de 12,2 à 12,75 GHz, dans n'importe quelle bande de 4 kHz:

|                             |                       |      |                                   |
|-----------------------------|-----------------------|------|-----------------------------------|
| -148                        | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour | $\theta \leq 5^\circ$             |
| -148 + 0,5 ( $\theta - 5$ ) | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour | $5^\circ < \theta \leq 25^\circ$  |
| -138                        | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour | $25^\circ < \theta \leq 90^\circ$ |

1.5 dans les bandes de 17,7 à 19,7 GHz, 22,55 à 23,55 GHz, 24,45 à 24,75 GHz et 25,25 à 27,5 GHz, dans n'importe quelle bande de 1 MHz:

|                             |                       |      |                                   |
|-----------------------------|-----------------------|------|-----------------------------------|
| -115                        | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour | $\theta \leq 5^\circ$             |
| -115 + 0,5 ( $\theta - 5$ ) | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour | $5^\circ < \theta \leq 25^\circ$  |
| -105                        | dB(W/m <sup>2</sup> ) | pour | $25^\circ < \theta \leq 90^\circ$ |

$\theta$  étant l'angle d'arrivée de l'onde radioélectrique au-dessus du plan horizontal (degrés);

2 que les valeurs susmentionnées des puissances surfaciques et des angles d'arrivée soient celles obtenues dans des conditions de propagation en espace libre;

3 qu'à titre indicatif, on utilise, pour l'application de la présente Recommandation, les renseignements donnés à l'Annexe 1.

NOTE 1 – Les limites définitives applicables dans les bandes de fréquences partagées sont indiquées dans le Tableau S21-4 de l'Article S21 du Règlement des radiocommunications (RR). L'étude de la question se poursuit, ce qui pourrait amener des changements aux limites recommandées.

NOTE 2 – Conformément au numéro S21.16.4 du RR, les limites de puissance surfacique de la bande de 17,7 à 27,5 GHz s'appliquent, jusqu'à ce que celles-ci soient modifiées par une Conférence mondiale des radiocommunications compétente.

NOTE 3 – La Recommandation UIT-R SF.1005 traite des valeurs maximales admissibles de la puissance surfacique à respecter dans les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz, qu'une future Conférence mondiale des radiocommunications pourrait attribuer au SFS pour une utilisation bidirectionnelle sur la base du partage avec le service fixe.

## ANNEXE 1

### **Protection des faisceaux hertziens de Terre en visibilité directe contre les brouillages dus aux émissions de stations spatiales du service fixe par satellite dans les bandes de fréquences partagées entre 1 et 27,5 GHz**

#### **1 Introduction**

Les émissions des stations spatiales peuvent causer des brouillages aux faisceaux hertziens de Terre fonctionnant dans des bandes partagées. L'énergie non désirée susceptible de produire ces brouillages peut pénétrer à des degrés divers dans le lobe principal ou dans les lobes latéraux des antennes des stations de Terre des faisceaux hertziens.

On pourrait certes calculer le brouillage dû aux émissions d'une station spatiale donnée qui affecte un seul faisceau hertzien, mais le calcul du brouillage cumulatif dû à de nombreuses stations spatiales qui affecte chacun des nombreux faisceaux hertziens existants ou à établir est pratiquement impossible. Par conséquent, étant donné que les caractéristiques des faisceaux hertziens en visibilité directe sont relativement uniformes, on s'est rendu compte qu'on peut protéger les faisceaux hertziens de Terre en imposant des restrictions générales aux émissions des stations spatiales.

Ces restrictions s'expriment sous la forme de valeurs maximales admissibles de la puissance surfacique dans une largeur de bande de référence, produite à la surface de la Terre par les émissions d'une station spatiale quelconque, dans l'hypothèse d'une propagation en espace libre.

Pour déterminer les valeurs maximales admissibles de la puissance surfacique, on prend pour objectifs les critères suivants:

- les valeurs maximales admissibles doivent être choisies suffisamment basses pour éviter que ne soient dépassées les limites maximales recommandées pour le brouillage des faisceaux hertziens de Terre existants ou futurs qui utilisent les mêmes fréquences;
- elles doivent être choisies suffisamment élevées pour permettre le fonctionnement satisfaisant des systèmes de radiocommunications spatiales.

## **2 Méthode pour déterminer la valeur maximale admissible de la puissance surfacique**

### **2.1 Critères de brouillage**

Pour déterminer les valeurs maximales admissibles de la puissance surfacique, on s'est servi des niveaux maximaux admissibles du brouillage dans une voie téléphonique tels qu'ils sont spécifiés dans la Recommandation UIT-R SF.357 pour des faisceaux hertziens en visibilité directe fonctionnant en téléphonie multivoie à modulation angulaire analogique. Pour ces systèmes qui fonctionnent en général au-dessous d'environ 15 GHz, on a montré qu'il convient d'adopter une largeur de bande de référence de 4 kHz lorsqu'on considère l'effet des signaux brouilleurs agissant à l'entrée des récepteurs des stations de Terre du circuit fictif de référence de l'UIT.

Les valeurs maximales admissibles spécifiées dans la Recommandation UIT-R SF.357 suffisent pour la protection de systèmes de ce genre transmettant des signaux de télévision.

La Recommandation UIT-R SF.615 indique les niveaux de brouillage maximal admissibles des faisceaux hertziens numériques causé par les stations du SFS. Les effets des limites de puissance surfacique sur la conception des faisceaux hertziens numériques sont étudiés au § 6 ci-après.

Comme il a été prouvé que les signaux numériques sont affectés par la puissance de brouillage totale dans la largeur de bande occupée et que les largeurs de bande utilisées dans la pratique seront vraisemblablement élevées, on a adopté une largeur de bande de référence de 1 MHz.

### **2.2 Modèles de systèmes**

Pour évaluer les effets de brouillage d'émissions de stations spatiales sur des faisceaux hertziens en visibilité directe, il est nécessaire d'établir des modèles appropriés pour les systèmes spatiaux et pour les systèmes de Terre, en tenant compte du développement et du perfectionnement prévisibles de l'un et l'autre type.

#### **2.2.1 Paramètres de modèles de faisceaux hertziens de Terre en visibilité directe**

Les caractéristiques techniques de modèles de faisceaux hertziens en visibilité directe sont énumérées à l'Appendice 1.

Dans les systèmes qui transmettent des signaux de téléphonie multivoie à modulation angulaire analogique, on peut admettre que la puissance de bruit thermique et la puissance de brouillage (avant comme après détection) sont additives sur tous les trajets de transmission isolés que comprend le système. Cette hypothèse n'est pas valable pour des systèmes qui transmettent les signaux numériques.

#### **2.2.2 Paramètres d'un modèle d'orbite pour systèmes spatiaux**

Seules les caractéristiques des stations spatiales d'émission sont concernées. Etant donné qu'un faisceau hertzien de Terre donné est en relation géométrique invariable avec une station spatiale installée à bord d'un satellite géostationnaire, on peut s'attendre que les conditions de brouillage soient les plus critiques dans le cas qui doit être pris comme hypothèse où une ou plusieurs stations spatiales géostationnaires se trouvent dans les faisceaux principaux de stations de réception de Terre appartenant à un système de faisceaux hertziens.

C'est pourquoi on a conclu que le meilleur modèle de système spatial doit comprendre les stations spatiales d'émission qui sont situées sur la totalité de la portion d'orbite géostationnaire visible d'un système de Terre et qui sont uniformément espacées les unes des autres (deux cas, représentant des brouillages de sévérité différente, correspondant à des espacements angulaires géocentriques de 3° et 6°).

Les effets de brouillage des émissions des stations spatiales non géostationnaires sont étudiés au § 4.

### 2.3 Influence de l'angle d'arrivée sur les valeurs maximales admissibles de la puissance surfacique

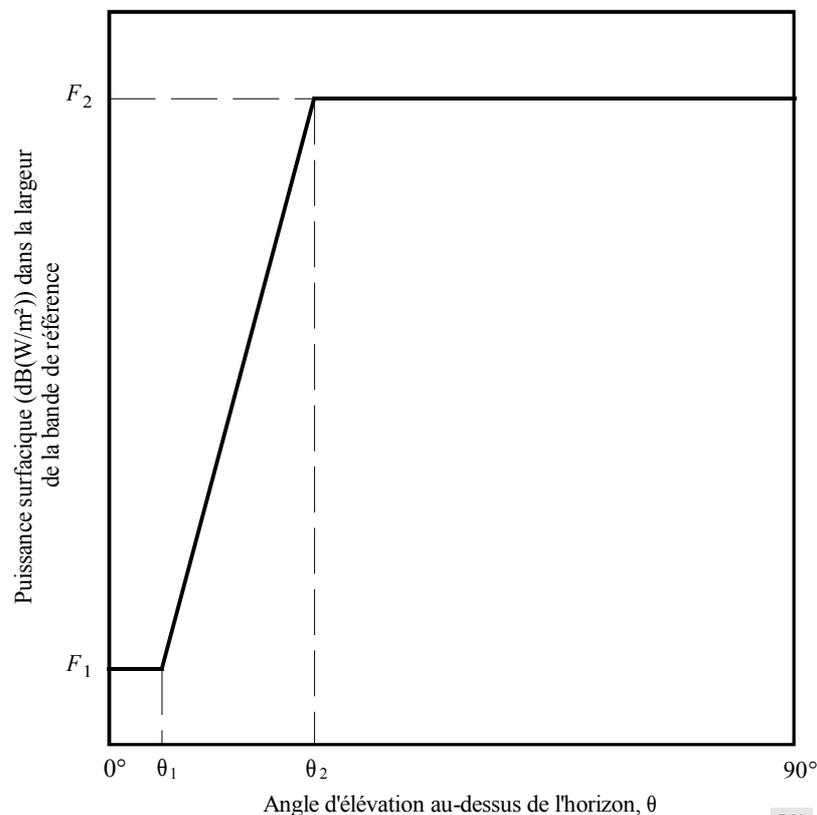
Normalement, les antennes des stations de faisceaux hertziens sont pointées dans une direction presque horizontale. Il s'ensuit que, normalement aussi, elles sont plus sensibles à un flux de puissance de brouillage qui arrive tangentiellement (ou presque) à la surface de la Terre. A mesure que cet angle d'arrivée augmente, le diagramme de rayonnement de l'antenne du faisceau hertzien assure une discrimination croissante. Il en résulte que la valeur maximale admissible pour la puissance surfacique augmente aussi avec l'angle d'arrivée du signal brouilleur. Pour déterminer la valeur tolérable de cette augmentation, on a tenu dûment compte des caractéristiques de certains types d'antenne de faisceau hertzien; c'est ainsi que les antennes du type périscope ont une faible discrimination dans les lobes latéraux jusqu'à  $90^\circ$  par rapport à l'axe du faisceau principal.

Il ressort des diverses études réalisées que, pour ce qui est de la protection des faisceaux hertziens, on peut admettre la relation générale représentée à la Fig. 1 entre la valeur maximale admissible de la puissance surfacique et l'angle d'arrivée du signal brouilleur. En général, la puissance surfacique plus élevée admissible aux grands angles d'arrivée est également intéressante pour les systèmes du SFS équipés d'antennes à faisceau étroit. Toutefois, comme la puissance surfacique d'un satellite ne doit pas dépasser la valeur maximale, quel que soit l'angle d'arrivée, on ne peut pas toujours réaliser des antennes de satellite qui mettent entièrement à profit l'assouplissement de cette limite aux grands angles d'élévation.

Dans la présente Recommandation, on a choisi la valeur  $5^\circ$  pour l'angle d'arrivée  $\theta_1$  (Fig. 1). La raison en est que des angles d'élévation de  $2^\circ$  ou  $3^\circ$  ne sont pas rares pour les antennes des faisceaux hertziens et que  $\theta_1$  doit avoir une valeur suffisamment grande pour permettre une protection efficace de ces faisceaux hertziens. D'un autre côté, des angles  $\theta_1$  inférieurs à  $5^\circ$  ont un effet minimal sur la conception des systèmes à satellites. Par exemple, l'angle d'inclinaison d'un satellite géostationnaire par rapport à la surface terrestre est de  $8,688^\circ$  pour l'angle d'arrivée de  $0^\circ$ ; il est de  $8,655^\circ$  pour un angle d'arrivée de  $5^\circ$  (voir la Fig. 2). La différence de  $0,033^\circ$  est petite (0,4% de l'angle d'inclinaison). Le choix de  $\theta_1 = 5^\circ$  est donc un choix raisonnable.

FIGURE 1

Limite de la puissance surfacique en fonction de l'angle d'arrivée



## 2.4 Analyse des brouillages

Si l'on connaît bien, ou si l'on peut prévoir assez bien les caractéristiques des faisceaux hertziens en visibilité directe, un complément d'étude s'impose pour la forme spécifique et les niveaux absolus de la courbe générale de puissance surfacique représentée à la Fig. 1. On peut définir les limites spécifiques en fonction des caractéristiques suivantes:

- le domaine d'accroissement (c'est-à-dire les valeurs réelles des valeurs maximales admissibles de la puissance surfacique pour les angles d'élévation de petites et de grandes valeurs, soit respectivement les niveaux de  $F_1$  et  $F_2$  de la Fig. 1);
- le taux d'accroissement (c'est-à-dire la pente, en dB/degré de la droite entre les angles d'élévation  $\theta_1$  et  $\theta_2$  de la Fig. 1);
- les valeurs des angles d'arrivée  $\theta_1$  et  $\theta_2$ ;
- les conséquences de la variation des limites du maintien en position nord-sud.

La méthode appliquée pour ces analyses statistiques est exposée à l'Appendice 1.

## 2.5 Influence de la fréquence sur les valeurs maximales admissibles de la puissance surfacique

Quand la fréquence passe de 4 à 27,5 GHz environ, il faut tenir compte des facteurs suivants pour déterminer les valeurs maximales admissibles de la puissance surfacique:

- les températures de bruit des systèmes de réception des modèles de faisceaux hertziens de Terre doivent s'élever avec la fréquence. Par suite des restrictions imposées en pratique à l'ouverture du faisceau, il n'est pas vraisemblable que les gains des antennes dépassent notablement les valeurs maximales appliquées actuellement aux fréquences inférieures. L'évanouissement, notamment aux fréquences supérieures à 10 GHz, est dû de plus en plus à l'absorption par les précipitations pendant de petits pourcentages du temps. Quand l'évanouissement est dû à une précipitation, il existe vraisemblablement une certaine corrélation entre l'affaiblissement du signal utile et celui du signal brouilleur, en particulier si c'est le faisceau principal qui est intercepté. La valeur maximale admissible pour la puissance surfacique se trouve ainsi augmentée. En revanche, les faisceaux hertziens peuvent être munis de lignes d'alimentation dont les pertes sont moins élevées, ce qui correspond à une diminution de la valeur maximale admissible de la puissance surfacique. L'influence nette de ces facteurs est que les valeurs maximales admissibles de la puissance surfacique ne sont que légèrement supérieures dans la gamme de 10 à 15 GHz à ce qu'elles sont aux fréquences inférieures à 10 GHz;
- aux fréquences supérieures à 15 GHz environ, les systèmes de Terre fonctionnent en principe en modulation numérique. On ne peut plus appliquer alors la même loi d'addition des brouillages que pour les systèmes qui transmettent des signaux analogiques à modulation angulaire, mais comme les systèmes numériques sont généralement moins sensibles au brouillage, ils bénéficient d'un assouplissement important des valeurs maximales admissibles pour la puissance surfacique. En outre, à ces fréquences, les évanouissements sont dus principalement aux précipitations, et il existe une corrélation non négligeable entre le signal utile et le signal brouilleur. Enfin, l'absorption atmosphérique sur le trajet de brouillage d'une station spatiale est parfois notable, en particulier aux faibles angles d'arrivée, et notamment dans le cas des interceptions par le faisceau principal.

## 3 Limites de la puissance surfacique

Sur la base des considérations ci-dessus, on estime que les stations spatiales risquent peu de causer des brouillages inacceptables aux faisceaux hertziens en visibilité directe en deçà des limites suivantes:

- dans la bande de fréquences comprise entre 1 et 27,5 GHz environ (les bandes de fréquences partagées entre le service fixe et le SFS sont indiquées à l'Article 8 du RR), partagée entre des systèmes du SFS et des faisceaux hertziens de Terre en visibilité directe, la puissance surfacique maximale produite à la surface de la Terre par une station spatiale quelconque, quelles que soient les conditions et les méthodes de modulation, ne doit pas dépasser les valeurs indiquées au Tableau 1.

TABLEAU 1

**Limites de la puissance surfacique\***

| Gamme de fréquences (GHz) | Limite de la puissance surfacique (dB(W/m <sup>2</sup> )) |                                  |                                   |  |
|---------------------------|---|----------------------------------|-----------------------------------|--|
|                           | $\theta \leq 5^\circ$ <sup>(1)</sup>                      | $5^\circ < \theta \leq 25^\circ$ | $25^\circ < \theta \leq 90^\circ$ | Largeur de bande de référence                                  |
| 1,7-2,5 <sup>(2)</sup>    | -154  | $-154 + 0,5 (\theta - 5)$        | -144                              | } Bande quelconque de 4 MHz<br><br>} Bande quelconque de 1 MHz |
| 2,50-2,69                 | -152  | $-152 + 0,75 (\theta - 5)$       | -137                              |  |
| 3-8                       | -152  | $-152 + 0,5 (\theta - 5)$        | -142                              |  |
| 8-11,7                    | -150  | $-150 + 0,5 (\theta - 5)$        | -140                              |  |
| 11,7-15,4                 | -148  | $-148 + 0,5 (\theta - 5)$        | -138                              |  |
| 15,4-27,5                 | -115  | $-115 + 0,5 (\theta - 5)$        | -105                              |  |

\* Conformément au numéro S21.16.4 du RR, les limites de puissance surfacique dans la bande de 17,7 à 27,5 GHz s'appliquent jusqu'à ce que celles-ci soient modifiées par une Conférence mondiale des radiocommunications compétente.

(1)  $\theta$ : angle d'arrivée de l'onde (en degrés au-dessus du plan horizontal).

(2) Aucune bande de fréquences n'est actuellement allouée au SFS entre 1,7 et 2,5 GHz dans le RR.

#### 4 Brouillage dû à des stations spatiales non géostationnaires

Dans le cas des systèmes qui utilisent des stations spatiales d'émission situées sur des orbites disposées d'une façon aléatoire, et pour autant que ces stations ne constituent pas une population très dense dans l'espace, les brouillages qui pénètrent dans les lobes principaux des antennes de faisceaux hertziens ne sont que passagers; statistiquement, cette contribution de brouillage est suffisamment petite pour être acceptable.

Des études des brouillages que risquent de causer des stations spatiales sur orbites elliptiques inclinées de 12 h et fonctionnant dans la bande des 4 GHz ont montré que les limites de la présente Recommandation seraient suffisantes.

D'après les résultats d'une étude d'un modèle possible, les brouillages que risquent de causer les stations spatiales sur orbite circulaire basse aux faisceaux hertziens MRF dans la bande partagée des 2 GHz produisent des niveaux de bruit inférieurs aux critères définis dans la Recommandation UIT-R SF.357. D'autres études sur les brouillages causés à d'autres types de système sont nécessaires.

Les conclusions relatives aux orbites disposées de façon aléatoire s'appliquent très vraisemblablement aux autres orbites inclinées – moyennant les mêmes réserves – pour autant que les projections de ces orbites sur la surface terrestre ne se répètent pas à intervalles de temps trop rapprochés. Il se peut que des stations spatiales placées sur des orbites équatoriales non géostationnaires produisent globalement, en raison du caractère systématique de leur mouvement relatif, des brouillages excessifs au détriment des faisceaux hertziens de Terre, l'intensité des brouillages tenant à l'occurrence de nombreuses contributions de brouillage dans les lobes principaux des antennes. Il convient de noter cependant à ce propos que lorsqu'on choisit l'emplacement des stations de faisceaux hertziens on ne tient pas compte des satellites utilisant de telles orbites: exiger qu'on en tienne compte imposerait une contrainte inacceptable.

#### 5 Influence des limites de la puissance surfacique sur le fonctionnement des systèmes spatiaux

On trouvera ci-après une brève estimation de la capacité des systèmes spatiaux, dont les émissions satisfont aux limites inférieures indiquées de l'Article 521, à assurer leurs fonctions.

On considère les caractéristiques indiquées au Tableau 2 comme représentatives de stations terriennes de réception relativement simples.

TABLEAU 2

**Caractéristiques de stations terriennes de réception**

| Bandes de fréquences (GHz) | Diamètre d'antenne (m) | Gain d'antenne (dBi) | Température de bruit du système de réception (K) |
|----------------------------|------------------------|----------------------|--|
| 4                          | 7,5                    | 47                   | 500  |
| 12                         | 6,0                    | 55                   | 700  |
| 20                         | 4,5                    | 57                   | 1 000  |

En se plaçant dans les conditions de propagation en espace libre et en supposant que la puissance surfacique a la valeur maximale admissible pour les petits angles d'élévation, on peut comparer la densité de puissance reçue avec la densité de puissance du bruit thermique à l'entrée du récepteur de la station terrienne. En supposant encore qu'il s'agit d'une modulation angulaire à grande excursion ou d'une modulation numérique (avec une caractéristique spectrale respectivement gaussienne et en cosinus carré), il faut soustraire 4 dB environ du rapport porteuse/densité du bruit et il reste les valeurs du rapport porteuse/bruit non dégradé indiquées au Tableau 3.

TABLEAU 3

**Valeurs du rapport porteuse/bruit non dégradé**

| Bandes de fréquences (GHz) | Puissance de la porteuse | Puissance du bruit | Rapport porteuse/bruit (dB) |
|----------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------------|
| 4                          | -137,5 dB(W/4 kHz)       | -165,5 dB(W/4 kHz) | 24                          |
| 12                         | -137,0 dB(W/4 kHz)       | -164,0 dB(W/4 kHz) | 23                          |
| 20                         | -104,5 dB(W/MHz)         | -138,5 dB(W/MHz)   | 30                          |

Aux fréquences inférieures à 15 GHz environ, où l'on utilise des signaux à modulation angulaire à grande excursion, il apparaît que la marge ainsi obtenue est tout à fait suffisante. Aux fréquences supérieures à 15 GHz dans les systèmes numériques, ces valeurs du rapport porteuse/bruit ne sont utiles que marginalement pour les caractéristiques admises du système.

Dans certains cas, il peut être souhaitable d'adopter des valeurs supérieures pour le rapport signal/bruit. Les limites maximales de la puissance surfacique correspondant aux angles d'élévation plus grands atteignent des valeurs considérables quand il s'agit de stations spatiales équipées d'antennes à faisceau étroit (voir l'Appendice 2).

## **6 Effet des limites de puissance surfacique sur la conception des faisceaux hertziens numériques**

Les brouillages provenant de stations spatiales fonctionnant aux fréquences inférieures à 10 GHz entraînent une légère augmentation de la dégradation de qualité due au seul bruit thermique. Etant donné que l'on s'est fondé sur les systèmes analogiques pour établir les limites admissibles de puissance surfacique et sur la Recommandation UIT-R SF.615 pour définir la dégradation admissible, on peut s'attendre à certaines contraintes pour la conception des faisceaux hertziens numériques comme le montre de l'Article 521 où l'on étudie l'utilisation des angles d'évitement de l'orbite.

## 7 Autres considérations

Les considérations qui précèdent sont fondées sur la marge de brouillage admise dans la Recommandation UIT-R SF.357, sur l'hypothèse que cette marge de brouillage est à mettre entièrement au compte de stations spatiales d'émission et que le nombre effectif des antennes de station de Terre pointées sur l'orbite des satellites géostationnaires (OSG) est petit et ne s'écarte que raisonnablement de la valeur adoptée dans les modèles statistiques.

Si l'on décidait d'utiliser de façon facultativement interchangeable les assignations de fréquence pour les trajets montants et descendants des systèmes spatiaux, une partie de la marge de brouillage de la Recommandation UIT-R SF.357 devrait être attribuée au brouillage provenant des stations terriennes, ce qui entraînerait une diminution correspondante de la puissance surfacique admissible produite par les stations spatiales.

Par ailleurs, les études mentionnées au § 2.3 ont été faites sur la base des diagrammes de rayonnement d'antenne du type décrit dans la Recommandation UIT-R F.699. Ces diagrammes conviennent aux ouvertures rayonnantes circulaires parfaitement symétriques. Toutefois, quelques types d'antennes de faisceau hertzien de Terre ne présentent pas des diagrammes de rayonnement circulairement symétriques et on peut admettre que leurs diagrammes sont semblables aux diagrammes de référence de la Recommandation UIT-R F.699 seulement dans le plan horizontal. Etant donné que les brouillages en provenance des stations spatiales sont reçus dans tous les plans, des études complémentaires sont nécessaires. Des études ont porté récemment sur des diagrammes à trois dimensions d'un cornet réflecteur pyramidal. Les conclusions de ces études sont semblables à celles des études précédentes. En particulier, les limites mentionnées en Article 521 permettent de protéger efficacement les faisceaux hertziens, mais un petit nombre de systèmes, très sensibles, peuvent subir un brouillage dépassant le brouillage admissible.

Il convient de noter que si l'on évite de pointer les faisceaux principaux des antennes de stations de Terre à moins de  $1^\circ$  de l'OSG, on peut réduire considérablement la possibilité de brouillages provenant de stations spatiales.

### APPENDICE 1

#### DE L'ANNEXE 1

## **Détermination des limites de la puissance surfacique dans la bande de fréquences comprise entre 1 et 10 GHz**

### 1 Introduction

Pour étudier l'effet qu'exercent les différentes limites de la puissance surfacique sur la possibilité de partage des fréquences entre les stations spatiales d'émission de satellite géostationnaire pour diverses limites de maintien en position nord-sud, et les faisceaux hertziens de Terre en visibilité directe, plusieurs administrations ont adopté une méthode statistique.

### 2 Méthode d'évaluation

Pour les calculs, on a supposé des faisceaux hertziens situés de manière aléatoire, d'une longueur comparable à celle du circuit fictif de référence de l'UIT. On a fait varier la latitude moyenne ainsi que, dans certains cas, l'azimut de bout en bout du système et l'on a admis certaines distributions de l'angle d'élévation et de l'azimut du faisceau principal de la station de Terre autour de l'azimut moyen du système.

On a calculé, pour diverses limites admises de la puissance surfacique, le brouillage global causé aux modèles de systèmes de Terre par des satellites présentant un espacement angulaire de  $3^\circ$  et de  $6^\circ$  et maintenus en position nord-sud dans des limites différentes, produisant chacun la puissance surfacique totale, pour tous les angles d'arrivée.

Les valeurs absolues de la puissance surfacique ont été choisies de manière à:

- pouvoir tolérer un accroissement raisonnable aux angles d'arrivée les plus élevés;
- pouvoir justifier l'exploitation de stations spatiales non géostationnaires et géostationnaires ayant les mêmes limites de puissance surfacique;
- faire en sorte que la puissance maximale admissible de brouillage spécifiée dans la Recommandation UIT-R SF.357 ne soit dépassée que pour une faible fraction ( $\approx 10\%$ ) des systèmes de Terre de «grande sensibilité» et pour une fraction un peu moins élevée des systèmes de «sensibilité moyenne».

### 3 Modèles de systèmes

Les caractéristiques techniques représentant les faisceaux hertziens qui ont servi aux analyses sont données dans le Tableau 4 ci-après.

TABLEAU 4  
Paramètres admis pour des modèles de faisceaux hertziens

| Fréquence (GHz)   | 2,5                | 4                   | 4                  |
|---|--------------------|---------------------|--------------------|
| Type du système   | Grande sensibilité | Sensibilité moyenne | Grande sensibilité |
| Longueur du bond (km)                                     | 60                 | 50                  | 50                 |
| Gain d'antenne (dBi)                                      | 38                 | 40                  | 42                 |
| Pertes dans la ligne d'alimentation (dB)                  | 3                  | 3                   | 3                  |
| Température de bruit du système de réception (K)          | 750                | 1 750               | 750                |
| Puissance de bruit thermique dans la voie par bond (pW0p) | 25                 | 25                  | 10 et 25           |

On a admis pour les antennes des stations de Terre les diagrammes de rayonnement ayant la forme générale:

$$\begin{aligned}
 G(\varphi) &= G_1 - 25 \log \varphi & \text{dB} & & \text{pour } \varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_1 & (1) \\
 &= G_2 & \text{dB} & & \text{pour } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ &
 \end{aligned}$$

$\varphi$  étant l'angle (degrés) par rapport à l'axe du faisceau principal.

### 4 Résultats des calculs

Les calculs indiquent que les limites de la puissance surfacique indiquées à l'Article 521 de l'Annexe 1 suffiraient à protéger convenablement les systèmes de faisceaux hertziens de sensibilité moyenne, mais que, dans certains cas, elles dépasseraient les valeurs spécifiées dans la Recommandation UIT-R SF.357 pour les systèmes de grande sensibilité.

Les calculs montrent aussi que le niveau total de brouillage causé au service fixe, en fonction de la précision du maintien en position nord-sud, est très peu affecté par l'utilisation d'orbites inclinées. Il faut toutefois noter que la méthode statistique employée ici pour étudier l'influence des brouillages causés au service fixe par le SFS est une méthode adaptée au SFS sur orbites équatoriales; dans le cas d'orbite inclinée, il peut être nécessaire de prendre en compte des éléments dépendant du temps pour déterminer l'indisponibilité du service fixe.

### 5 Influence de la variation dans le temps du niveau du signal utile et du signal brouilleur

On a tenu compte, dans une certaine mesure, de la variation dans le temps que peuvent subir à la fois le signal utile et le signal brouilleur. Par exemple, les calculs fondés sur l'hypothèse que les évanouissements de Rayleigh se produisent pendant 1/3 du mois montrent que les limites de puissance surfacique indiquées dans le Tableau 1 pour la gamme de fréquences de 3 à 8 GHz introduiraient un bruit de 50 000 pW0p dans une voie téléphonique d'un modèle de système de faisceaux hertziens à 4 GHz pendant approximativement 0,003% à 0,02% du temps, selon la latitude du système. On a admis que le modèle de système de faisceaux hertziens bénéficiait d'une protection de 1:1 par diversité de commutation tous les cinq bonds; on a en outre admis que le modèle de système à satellite comportait des satellites espacés de 3°, chacun produisant la puissance surfacique admissible pour tous les angles d'arrivée.

## APPENDICE 2

## DE L'ANNEXE 1

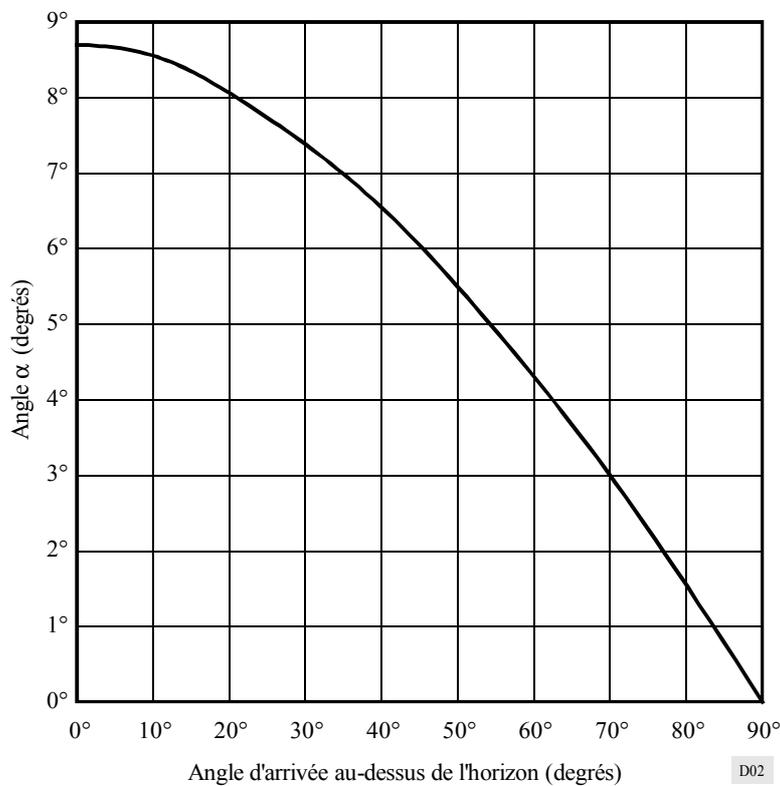
**Utilisation d'antennes à faisceau étroit sur des satellites géostationnaires**

Pour tirer parti de l'augmentation de la puissance surfacique permise pour les grands angles d'élévation, il faut équiper le satellite d'une antenne à faisceau étroit orientée vers la Terre. Lorsqu'un faisceau étroit n'est pas dirigé vers la projection du satellite (et se trouve donc au voisinage de l'horizon), des précautions particulières doivent être prises pour que les émissions du satellite restent dans les limites de la puissance surfacique pour tous les angles d'élévation.

Ces précautions consistent essentiellement à illuminer la surface de la Terre en utilisant une puissance surfacique plus faible que la limite correspondante admissible au centre du faisceau afin de s'assurer que les émissions arrivant sous tous les angles d'élévation restent dans les limites de la puissance surfacique.

La Fig. 2 permet de voir quelle est la relation entre l'angle formé par la droite satellite-centre de la Terre et la droite joignant le satellite à un point de la surface de la Terre (angle  $\alpha$ ) et l'angle d'arrivée correspondant des émissions du satellite au-dessus de l'horizon. La Fig. 3 présente des diagrammes types pour le faisceau principal d'antennes de satellite. Trois ouvertures de faisceau différentes sont indiquées au Tableau 5.

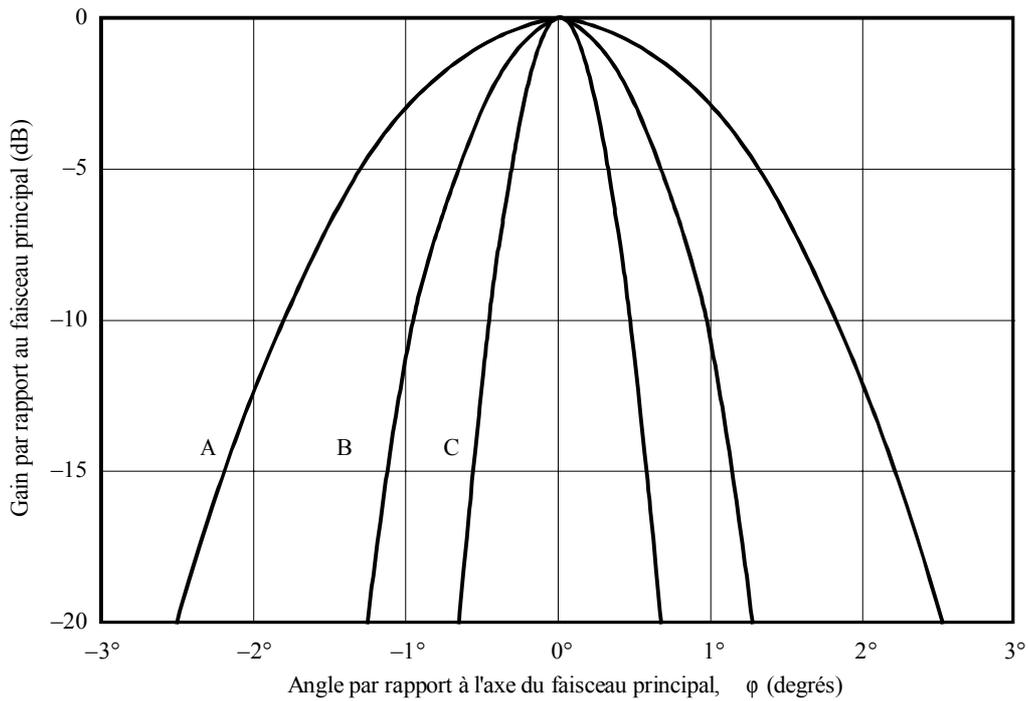
FIGURE 2

**Angle  $\alpha$  en fonction de l'angle d'arrivée au-dessus de l'horizon**

D02

FIGURE 3

Diagrammes types pour le faisceau principal d'antennes de satellite



A:  $\varphi_0 = 2^\circ$   
 $D = 2,6 \text{ m}$       B:  $\varphi_0 = 1^\circ$   
 $D = 5,2 \text{ m}$       C:  $\varphi_0 = 0,5^\circ$   
 $D = 10,4 \text{ m}$

D03

TABLEAU 5

Ouvertures de faisceau d'antenne

| Ouverture à 3 dB (degrés) | Diamètre de l'antenne à 4 GHz (m) |
|---------------------------|-----------------------------------|
| 2                         | 2,6                               |
| 1                         | 5,2                               |
| 0,5                       | 10,4                              |

Les diagrammes du faisceau principal ont la forme générale:

$$10 \log (G/G_0) = -12 (\varphi/\varphi_0)^2 \quad \text{dB} \quad (2)$$

où:

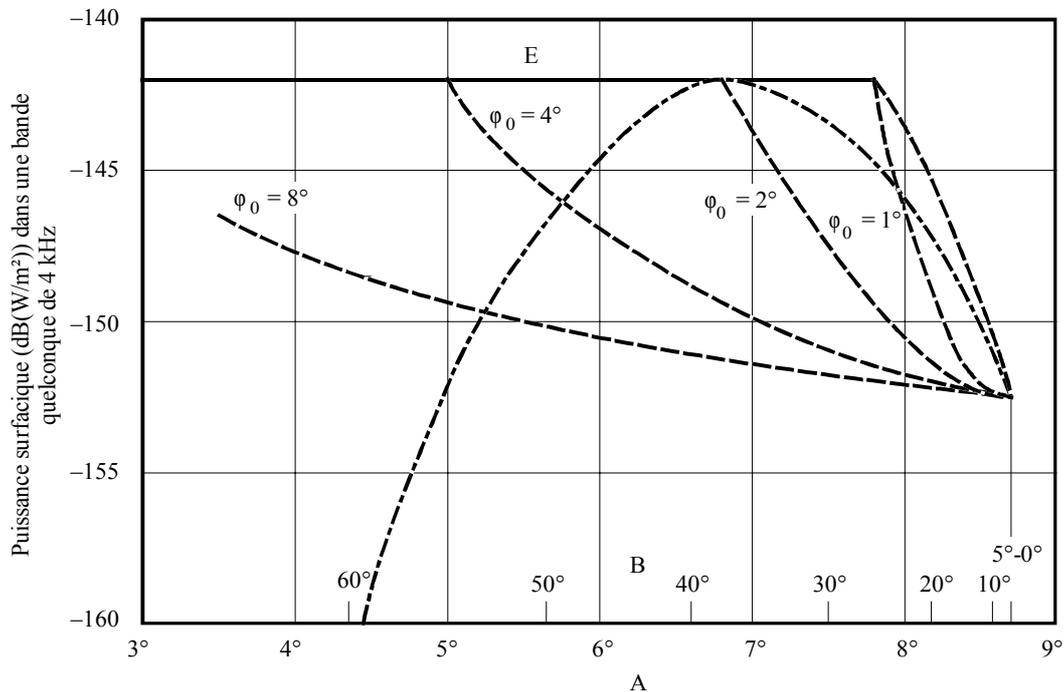
$\varphi$ : angle par rapport à l'axe du lobe principal

$\varphi_0$ : largeur du faisceau entre les points à demi-puissance.

La courbe en trait plein de la Fig. 4 indique la puissance surfacique maximale au centre du faisceau, qui satisfait aux limites pour tous les angles d'élévation. Une antenne de satellite dont l'ouverture de faisceau à demi-puissance est de  $0,5^\circ$  peut s'adapter aux variations rapides de la limite de la puissance surfacique pour les petits angles d'arrivée lorsque l'émission se rapproche de l'horizon. Les faisceaux de satellite plus larges, pointés près de l'horizon, sont limités par la courbe de puissance surfacique à l'horizon.

FIGURE 4

Puissance surfacique maximale au centre du faisceau pour laquelle la courbe E n'est pas dépassée



- Lieu des centres des faisceaux d'antennes de différentes ouvertures pour lesquelles on atteint la limite imposée par la courbe E
- Exemple de faisceau à ouverture de  $2^\circ$  qui satisfait aux conditions imposées par la courbe E
- E: limite de la puissance surfacique pour la bande de 3 à 8 GHz
- A: échelle de l'angle formé par la droite satellite-centre de la Terre et la droite joignant le satellite à un point de la surface de la Terre
- B: échelle de l'angle d'arrivée au-dessus de l'horizon

D04

La Fig. 4 indique les lieux des centres de faisceau d'antennes de satellite, pour des ouvertures différentes. Il est à remarquer que, pour un faisceau d'ouverture donnée, la puissance surfacique au centre du faisceau doit être limitée, comme ces courbes l'indiquent, de façon qu'aucune partie du faisceau ne dépasse la limite marquée par la courbe en trait plein.

Il ressort de ces courbes que les réalisateurs de systèmes à satellites ne seront peut-être pas en mesure de tirer pleinement avantage de l'augmentation admise pour la puissance surfacique sur chaque satellite et pour tous les angles d'arrivée.

### APPENDICE 3 DE L'ANNEXE 1

## Utilisation des angles d'évitement de l'orbite dans la conception des faisceaux hertziens numériques

### 1 Introduction

La Recommandation UIT-R SF.615 autorise en fait 10% de dégradation des performances dans un conduit numérique fictif de référence (CNFR) résultant des brouillages causés par les systèmes du SFS. Parallèlement, l'Article S21 du RR ainsi que la présente Recommandation spécifient les puissances surfaciques admissibles des stations spatiales du SFS dans diverses bandes.

Le présent Appendice examine les conséquences de la nécessité, pour les récepteurs de faisceaux hertziens, d'éviter le pointage vers l'orbite dans les bandes au-dessous de 15 GHz utilisées en partage avec le SFS. Il fournit une méthode pouvant être utilisée pour déterminer les contraintes d'évitement de l'orbite à prendre en compte lors de la conception des faisceaux hertziens numériques.

## 2 Modèle d'analyse des faisceaux hertziens numériques

Pour les besoins de cette analyse, on se basera sur les paramètres suivants de faisceaux hertziens numériques:

- Bande de fréquences: 4 GHz
- Largeur de bande: 20 MHz
- Antenne:
 

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| parabolique, de 4 m de diamètre |   |
| gain:                           | 42 dBi  |
| diagramme:                      | $35 - 25 \log X$ dBi      pour $1,8 \leq X < 25$<br>0 dBi                            pour $X \geq 25$<br>où $X$ est l'angle par rapport à l'axe principal |
- Latitude: 50° N

Pour déterminer la dégradation totale des performances causée par le flux de brouillage constant provenant des stations spatiales, il est nécessaire de calculer la puissance de brouillage à chaque station réceptrice. Elle est déterminée par les paramètres ci-dessus et par le décalage angulaire entre l'antenne de réception et l'orbite.

On peut sans commettre d'erreur notable classer les stations de la façon suivante:

- Catégorie A: stations de faisceaux hertziens dont l'angle d'évitement de l'orbite est réduit, à savoir de 2 à 10°.
- Catégorie B: stations de faisceaux hertziens dont l'angle d'évitement de l'orbite est grand, c'est-à-dire supérieur à 10°.

Les stations de la catégorie A peuvent être simulées de manière prudente par une station pointant dans une direction à 2° de l'orbite, et les stations de la catégorie B par une station dont l'angle de pointage est à 10° de l'orbite. Pour obtenir une plus grande précision, il faudrait davantage de catégories et des variations angulaires plus petites. Cependant, pour illustrer le principe, les valeurs ci-dessus sont suffisantes.

Supposons que  $Q$  soit le nombre de stations dans un conduit numérique fictif de référence de catégorie A et  $(1 - Q)$  celui de stations de la catégorie B. Dès lors on peut, comme le montrent les paragraphes qui suivent, déterminer la dégradation totale dans un conduit numérique fictif de référence et établir son rapport avec la valeur recommandée (Recommandation UIT-R SF.615). Cela donnera la valeur  $Q$ .

## 3 Puissance du brouillage reçue

Lorsque l'on suppose que l'espacement orbital entre satellites est de 3° et que les valeurs limites de puissance surfacique indiquées par l'Article S21 du RR sont respectées, on trouve que la puissance du brouillage total reçue aux stations de la catégorie A est:

$$Pr_A / 4 \text{ kHz} = -158,1 \text{ dB(W/4 kHz)}$$

Si l'on suppose que le signal brouilleur en provenance du satellite est une porteuse de télévision à 2 MHz de dispersion d'énergie, la puissance du brouillage total dans la bande de 20 MHz du récepteur est:

$$Pr_A = -131,1 \text{ dB(W/20 MHz)}$$

Les stations de la catégorie B ont une discrimination d'antenne d'au moins  $25 \log 10/2 = 17,5$  dB et dès lors la puissance totale maximale reçue est:

$$Pr_B = -175,6 \text{ dB(W/4 kHz)} \text{ ou } -148,6 \text{ dB(W/20 MHz)}$$

#### 4 Dégradation des performances due au brouillage

On suppose que le brouillage causé par la station spatiale est un brouillage continu, qui n'est pas sujet à des renforcements par trajets multiples. Pour cette raison, il se traduira par une réduction de la marge contre les évanouissements de la liaison hertzienne concernée, et dès lors par la dégradation de ses performances. La puissance de bruit thermique dans un récepteur type ( $T = 750$  K) est:

$$N_0 = -126,8 \text{ dB(W/20 MHz)}$$

Si l'on suppose que le brouillage est assimilable à du bruit, et pour un rapport brouillage/bruit thermique donné  $I/N_0$ , les performances sont dégradées par un facteur  $x_p$  donné par:

$$x_p = 1 + 10^{(I/N_0)/10} \quad (3)$$

Pour une station de la catégorie A, le rapport  $I/N_0$  est de  $-4,26$  dB et pour une station de la catégorie B, il est de  $-21,8$  dB. A partir de l'équation (3), on obtient  $x_p = 1,38$  pour les stations de la catégorie A et  $x_p = 1,007$  pour les stations de la catégorie B.

Si l'on suppose que le système comporte  $n$  stations, et vu que 10% de la dégradation totale est due au brouillage provenant de satellites, la dégradation dans chaque station due au bruit thermique seul est donnée par:

$$P_{0T} = \frac{0,9 P_0}{n}$$

où:

$P_0$ : dégradation totale admissible en pourcentage de temps (voir la Recommandation UIT-R F.594).

Ensuite, pour  $nQ$  récepteurs de la catégorie A et  $(1 - Q)n$  récepteurs de la catégorie B, la dégradation totale  $P_0$  est:

$$\begin{aligned} P_0 &= P_{0T} \times 1,38 \times nQ + P_{0T} \times 1,007 \times (1 - Q)n \\ &= 0,9 P_0 (0,38 Q + 1,007) \end{aligned}$$

Dès lors,  $Q = 27\%$ .

#### 5 Examen des résultats

L'analyse prudente ci-dessus montre qu'environ 27% des récepteurs de Terre dans un conduit numérique fictif de référence peuvent avoir un angle de pointage qui s'écarte de  $2^\circ$  à  $10^\circ$  de l'orbite géostationnaire, si les stations restantes pointent à un angle supérieur à  $10^\circ$ . Le pays dont les trajets prédominants sont d'est en ouest devrait en tenir compte.

Il faut noter que dans l'analyse ci-dessus, la largeur de bande de dispersion d'énergie nécessaire est de 2 MHz. Il est possible que des systèmes futurs nécessitent des p.i.r.e. plus élevées et dès lors des dispersions d'énergie plus larges, par exemple, de 4 MHz. L'augmentation de 3 dB qui en résulterait au niveau du brouillage modifierait les 27% ci-dessus en 13%.

#### 6 Conclusion

Le présent Appendice a montré comment la tolérance de 10% pour le brouillage du SFS, précisée dans la Recommandation UIT-R SF.615, peut être prise en compte dans la conception des faisceaux hertziens numériques. Elle montre qu'un maximum de 27% de stations d'un système donné peuvent pointer leur antenne à un angle s'écartant de  $2^\circ$  à  $10^\circ$  de l'orbite géostationnaire. En fait, vu les hypothèses prudentes dans l'établissement des catégories ci-dessus, ce pourcentage peut être augmenté dans la plupart des systèmes utilisés. Même dans le cas de futures p.i.r.e. des satellites plus élevées, ces restrictions resteront raisonnables.