

RECOMMANDATION UIT-R S.1327

**CONDITIONS TECHNIQUES D'EXPLOITATION DU SERVICE INTERSATELLITES
ET BANDES CONVENANT À CE SERVICE DANS LA GAMME 50,2-71 GHz**

(Question UIT-R 246/4)

(1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, par la Résolution 643 de la Conférence mondiale des radiocommunications (Genève, 1995) (CMR-95), l'UIT-R est chargée d'effectuer les études nécessaires pour identifier les bandes les plus appropriées pour le service intersatellites (SIS) afin de permettre à la CMR-97 (Genève, 1997), de faire les attributions appropriées à ce service;
- b) que les conditions techniques et opérationnelles applicables au SIS dans la gamme de fréquences 50,2-71 GHz sont exposées dans l'Annexe 2 à la présente Recommandation;
- c) que les systèmes dont il est question dans l'Annexe 2 nécessitent en général des largeurs de bande importantes et sont le plus souvent utilisés pour les liaisons communes à débit élevé des segments spatiaux de certains réseaux;
- d) qu'une utilisation importante du SIS est envisagée dans la gamme de fréquences 50,2-71 GHz;
- e) que dans cette gamme de fréquences, le nombre élevé de liaisons intersatellites pourrait occasionner des brouillages inacceptables au service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) (passive);
- f) qu'aucun système de Terre ou spatial, ne figure actuellement, ou n'est planifié, dans les attributions existantes dans la gamme 65-71 GHz;
- g) que le phénomène d'absorption des ondes radioélectriques dans l'atmosphère pourrait améliorer les conditions de partage avec les stations de Terre d'autres services dans la gamme de fréquences considérée;
- h) que des études ont confirmé qu'un partage est possible entre le SIS et les services de Terre dans la bande 66-71 GHz (voir l'Annexe 3),

recommande

1 de considérer dans la gamme de fréquences 50,2-71 GHz, les bandes suivantes comme les mieux adaptées au SIS:

- 54,25-58,2 GHz, limitée aux réseaux utilisant l'orbite des satellites géostationnaires (OSG), conformément à la Recommandation UIT-R S.1339;
- 59-64 GHz;
- 65-71 GHz;

2 de faire en sorte que les attributions faites au SIS dans cette gamme de fréquences soient des bandes contiguës, de largeur suffisante compte tenu des besoins spécifiques du SIS.

NOTE 1 – La Recommandation UIT-R S.1339 traite des possibilités de partage entre le SIS et les détecteurs passifs installés à bord de satellites dans la gamme de fréquences 50-65 GHz.

NOTE 2 – La Recommandation UIT-R S.1326 traite du partage entre le service fixe par satellite (SFS) et le SIS dans la bande 50,4-51,4 GHz.

NOTE 3 – L'Annexe 1 de la présente Recommandation résume les possibilités de partage entre le SIS et d'autres services dans la gamme de fréquences 50,2-71 GHz.

ANNEXE 1

La présente Annexe résume les possibilités de partage entre le SIS et les services suivants:

- a) Service fixe dans les bandes 50,2-51,4, 54,25-58,2 et 59-64 GHz

Le partage est envisageable dans ces bandes. Toutefois, la bande 50,2-51,4 GHz ne sera peut-être pas assez large pour les besoins du SIS.

b) SFS dans la bande 50,4-51,4 GHz

Des études ont montré qu'un partage entre satellites du SIS OSG et du SFS OSG serait envisageable dans cette bande sous réserve d'applications de techniques de réduction des brouillages. Toutefois, le partage entre d'autres systèmes (par exemple, entre satellites du SFS OSG et non OSG d'une part et satellites du SIS non OSG d'autre part) pourrait être difficile et appelle en tout état de cause un complément d'étude (se reporter à la Recommandation UIT-R S.1326).

c) Service mobile dans les bandes 50,2-51,4, 54,25-58,2, 59-64 et 66-71 GHz

Des études ont montré que le phénomène d'absorption par l'oxygène ainsi que le découplage des antennes se traduisent par un affaiblissement du signal suffisant pour rendre possible le partage avec ces systèmes.

d) SETS (passive) et service de recherche spatiale (passive) dans les bandes 50,2-50,4, 51,4-59, 59-64 et 64-65 GHz

Des études ont montré que des systèmes non OSG utilisant le SIS dans ces bandes peuvent occasionner des brouillages inacceptables. Le partage entre satellites du SIS OSG ou entre systèmes hybrides SIS et SETS (passifs) est envisageable, les conditions de partage étant définies dans la Recommandation UIT-R S.1339. Dans la bande 59-64 GHz, les systèmes du SIS non OSG pourraient aussi causer des brouillages préjudiciables aux détecteurs du SETS (passive), voire éventuellement leur porter préjudice. Il est recommandé que les détecteurs passifs soient informés des risques de brouillage pouvant être causés par des systèmes existants. Il convient également de noter qu'il n'existe pas de besoins concernant le SETS (passive) ou le service de recherche spatiale (passive) dans la bande 64-65 GHz; par conséquent, cette bande peut se prêter aux systèmes du SIS non OSG. Toutefois, cette bande est également attribuée par le biais d'un renvoi au service de radioastronomie et aucune étude de partage n'a été effectuée sur la possibilité de partage entre le SIS et le service de radioastronomie.

e) Service de radionavigation dans la bande 66-71 GHz

Des études ont montré que le phénomène d'absorption par l'oxygène ainsi que le découplage des antennes se traduisent par un affaiblissement du signal qui permettrait d'envisager un partage entre ces systèmes. Toutefois, pour formuler des conclusions définitives, il faudra prévoir un complément d'étude du service de radionavigation.

f) Service mobile par satellite (SMS) dans la bande 66-71 GHz

Des études montrent que le SIS pourrait être source de brouillage pour les récepteurs embarqués du SMS lorsque les satellites des deux services considérés sont placés sur des orbites d'altitudes comparables. Toutefois, un partage dans de telles conditions pourrait être envisagé si l'on appliquait une discrimination de polarisation. D'autres configurations de brouillage potentiel existent puisque l'attribution faite au SMS est bidirectionnelle. Les problèmes de brouillage entre ces systèmes appellent un complément d'étude.

g) Service de radionavigation par satellite dans la bande 66-71 GHz

Des études ont montré que le SIS pourrait occasionner des brouillages aux récepteurs embarqués du service de radionavigation par satellite lorsque les satellites des deux services considérés sont placés sur des orbites d'altitudes comparables. Toutefois, un partage dans de telles conditions pourrait être envisagé si l'on appliquait une discrimination de polarisation. D'autres configurations de brouillage potentiel existent puisque l'attribution faite au service de radionavigation par satellite est bidirectionnelle. Les brouillages entre ces systèmes appellent un complément d'étude.

h) Service de recherche spatiale et SETS dans la bande 65-66 GHz

Cette bande ne sera pas utilisée pour la télédétection passive par détecteurs spatiaux, et il est prévu de l'affecter à la transmission de données dans le sens espace-Terre. Une liaison avec l'UIT-R a fait apparaître qu'il n'existe actuellement aucun plan associé au SETS ou au service de recherche spatiale dans cette bande. Le partage entre réseaux à satellites de ces deux services (espace-Terre) et réseaux du SIS ne devrait pas être difficile.

ANNEXE 2

Caractéristiques des systèmes devant utiliser le SIS au voisinage de 60 GHz

1 La présente Annexe identifie les systèmes exploités ou devant être exploités dans le SIS au voisinage de 60 GHz. Ces systèmes se distinguent tous par une caractéristique spécifique: ils exigent d'importantes largeurs de bande. En général, les utilisateurs du SIS établissent des liaisons communes à haut débit de données pour les segments spatiaux

de leurs réseaux. Ces réseaux sont le plus souvent utilisés par les «clients» du SFS ou encore du SMS. L'utilisateur type dispose, par exemple, d'une liaison téléphonique à 2,4 kbit/s ou d'une liaison de transmission de données à 1,544 Mbit/s, et une seule liaison intersatellites (LIS) de 1 Gbit/s peut accepter jusqu'à 250 000 utilisateurs finals de services vocaux.

2 Besoins estimatifs de largeur de bande pour les systèmes du SIS au voisinage de 60 GHz

Pour estimer la largeur de bande requise pour l'exploitation des systèmes du SIS OSG, on a procédé à une étude des systèmes existants et des systèmes planifiés. A la fin de 1996, on dénombrait dix systèmes du SIS OSG planifiés au voisinage de 60 GHz, représentant 74 satellites et jusqu'à 178 LIS OSG. Un grand nombre des positions planifiées sur l'OSG sont concentrées sur certaines régions d'Europe et des Etats-Unis d'Amérique. Quatre systèmes du SIS non OSG proposés représentent près de 1 000 satellites et près de 8 000 liaisons. La plupart de ces systèmes seraient placés sur des orbites terrestres basses.

2.1 LIS courtes (liaisons courtes)

On estime que les LIS courtes (angle maximal de 10°) imposent jusqu'à 10° d'espacement orbital par rapport aux systèmes du SIS OSG exploitant les mêmes fréquences. Chaque nœud d'une liaison courte nécessite jusqu'à 2 GHz de largeur de bande. Avec une séparation orbitale de 10° entre liaisons courtes exploitant les mêmes fréquences et une séparation orbitale de 2° entre deux satellites OSG adjacents quelconques, il faut probablement multiplier par 5 la largeur de bande unitaire pour ménager aux liaisons courtes du SIS OSG une largeur de bande adéquate, soit 10 GHz au total.

2.2 LIS longues (liaisons longues)

Dans le cas des LIS longues (espacement orbital supérieur à 10°), une séparation orbitale de 2° entre systèmes du SIS OSG partageant les mêmes fréquences est suffisante pour respecter le critère de qualité de fonctionnement, soit $C/I \geq 30$ dB. Dans ces conditions, une largeur de bande de 4 GHz est suffisante pour la réutilisation des fréquences, du fait qu'au moins un système du SIS OSG nécessite, par conception, 4 GHz au minimum. Toutefois, il n'est pas certain qu'un espacement orbital de 2° puisse être maintenu, notamment sur les arcs encombrés de l'OSG. Avec une séparation de 1° entre systèmes, il faudrait une largeur de bande deux fois plus importante, soit 8 GHz.

2.3 Croissance

Notre analyse ne tient pas compte de la croissance des systèmes du SIS OSG. On peut tabler sur un coefficient de croissance de 1,5 pour estimer l'évolution probable du SIS dans un avenir proche (10-20 ans). Sur cette base, les besoins estimatifs de fréquences peuvent être chiffrés à 15 GHz pour les liaisons courtes ou encore à 12 GHz pour les systèmes du SIS OSG à liaisons longues.

2.4 Besoins estimatifs de largeur de bande pour les systèmes du SIS non OSG au voisinage de 60 GHz

La largeur de bande totale nécessaire, selon estimation, pour les systèmes non OSG proposés est de 8,2 GHz. Sur la base d'un facteur de croissance de 1,5, les besoins estimatifs correspondant aux systèmes non OSG atteignent presque 12 GHz.

2.5 Résumé

En raison des espacements orbitaux requis entre systèmes du SIS OSG à LIS courtes et de l'encombrement de certaines parties de l'arc considéré sur l'arc géostationnaire, les besoins estimatifs de fréquences associés à l'utilisation intégrale des systèmes du SIS OSG planifiés et prévisibles se chiffrent à 15 GHz. Dans le cas de systèmes non OSG, on estime qu'il faudrait environ 12 GHz.

3 Autres travaux à prévoir

Etudier les éventuelles relations entre ces valeurs de débit de données et les normes applicables au conduit numérique fictif de référence, afin de définir des principes valables de sensibilité aux brouillages.

TABLEAU 1

Caractéristiques des systèmes OSG

Système OSG	W-1	W-2a ⁽¹⁾	W-2b ⁽¹⁾	W-3	W-4	W-5	W-6	W-7	W-8	W-10
Nombre de satellites	3	4	15	12	17	4	2	2	5	10
Nombre de paires émission/ réception par satellite	2	2	2	2	2-4	2	1	1	2	1
Largeur de bande (GHz)	1	3,2	0,04	0,5	1	1	0,12	0,12	1	2,5
Largeur de bande totale requis (GHz)	2	3,2	0,08	1	4	2	0,24	0,24	2	5,0
Puissance maximale (dBW)		16	-1	8,5	8	11,76	13	13	13	21
p.i.r.e. maximale (dBW)	71,3	75	57	54,5/63,5	68,3	64,78	63,3	62,1	68,7	75
Gain de l'antenne (dBi)	58,5	60,3	58	46/55,5	60,3				55,7	53,5
Diamètre de l'antenne (m)	1,8	2		0,4/1,2	1,8		0,75	0,75	1	1
Température de bruit du système (K)	468,4	800	2 034		630		290	290	330	800
Rapport G/T à la réception (dB(K ⁻¹))			24,9	19/28,5		19,8/25,9	23,4	23,4	27,4	24,5
Valeur maximale de séparation angulaire (degrés) en longitude	145	163	163	141	163	17	34	24	100	106

⁽¹⁾ Dans le système W-2, un nœud quelconque peut communiquer avec les autres nœuds.

TABLEAU 2

Caractéristiques des systèmes non OSG

Système non OSG	LEOSAT 1	W-2c	W-2d	W-9
<i>Paramètres d'orbite</i>				
Nombre de plans	21	10	12	12
Nombre de satellites par plan	44	1	1	6
Période (moyenne) (min)	98,77	718,03	105	113
Inclinaison (moyenne) (degrés)	98,16	63,4	55-110	47
Espacement des nœuds ascendants (degrés)	9,5	Valeurs diverses	Valeurs diverses	30
Excentricité		0,72	Valeurs diverses	0,0013
<i>Paramètres radioélectriques</i>				
Nombre de paires émission/réception par satellite	8	2	2	4
Largeur de bande par faisceau (GHz)	1	3,2	3,2	1,5
Largeur de bande totale requise (GHz)	2	3,2	3,2	3
Puissance maximale (dBW)	7,4	16	16	4
p.i.r.e. maximale (dBW)	55,4	75	75	59,9
Gain de l'antenne (dBi)	48	60,3	60,3	55,9
Diamètre de l'antenne (m)	0,5	2	2	1,2
Température de bruit du système (K)	438	800	800	501
Valeur maximale de séparation angulaire géocentrique (degrés)	19	-	-	30

NOTE 1 – Dans le système W-2, un nœud quelconque peut communiquer avec les autres nœuds.

NOTE 2 – La valeur indiquée est la valeur maximale. Des largeurs de bande moins importantes peuvent également être utilisées.

ANNEXE 3

Attributions envisageables pour le SIS dans la bande 66-71 GHz**1 Introduction**

Le SIS a, dans la bande 54,25-58,2 GHz une attribution coprimaire utilisée par le SETS pour la détection passive. Les détecteurs hyperfréquences installés à bord des satellites en exploitation collectent des données d'environnement et des données climatiques qui sont de plus en plus importantes pour la surveillance de la température de l'atmosphère de la Terre. Les profils de température atmosphérique présentent en effet une importance fondamentale pour la mise en œuvre des modèles de prévision climatologique et pour d'autres données scientifiques importantes.

La communauté mondiale des utilisateurs, comprenant l'Organisation météorologique mondiale, le Système mondial d'observation du climat et le Programme mondial de recherche sur le climat, a défini certains besoins spécifiques en données obtenues par satellite. Ces besoins couvrent divers paramètres atmosphériques (profils de température et de vapeur d'eau, concentration en ozone, traces de gaz radioactifs ou chimiquement actifs) qui ne peuvent être connus qu'à l'aide de détecteurs passifs installés à bord de satellites. Les raies d'absorption de l'oxygène dans la gamme de fréquences 50,2-66 GHz constituent à cet égard une ressource naturelle unique pour la télédétection passive hyperfréquences tous temps dans l'atmosphère. Aucune autre bande de fréquences n'offrirait de solution en la matière.

La bande de fréquences 54,25-58,2 GHz est partagée par les services SETS (passive), fixe, mobile et intersatellites. Diverses études ont déjà montré que des systèmes intersatellites comportant un nombre de satellites en orbites terrestres basses peuvent être à l'origine de niveaux de brouillage inacceptables pour les détecteurs hyperfréquences passifs. Le groupe de coordination des fréquences spatiales (SFCCG) a établi qu'il serait très intéressant de réserver la bande de fréquences adéquate exclusivement aux services passifs et de réattribuer au SIS d'autres fréquences comprises dans la gamme 66-71 GHz (exception faite de la bande 56,9-57 GHz), pour garantir la capacité de procéder à des mesures de température de l'atmosphère et éviter d'avoir à limiter certaines caractéristiques des services actifs. La bande 66-71 GHz offre en effet 5 GHz de largeur de bande (contre 3,95 GHz pour ce qui est de la bande 54,25-58,2 GHz) et devrait donc constituer une solution attrayante en remplacement de l'attribution actuelle.

La présente étude traite des possibilités de partage entre le SIS et tous les services primaires ayant des attributions dans la bande 66-71 GHz.

2 Caractéristiques des systèmes du SIS

Il est difficile de formuler des prévisions générales quant aux caractéristiques des systèmes du SIS qui utiliseraient des fréquences supérieures à 50 GHz. Toutefois, un système déjà en phase de planification avancée peut être pris pour exemple représentatif dans l'évaluation des possibilités de partage. Il s'agit du système LEOSAT-1, qui comprend 924 satellites non OSG en orbite terrestre basse (840 satellites actifs et 84 satellites de réserve). Ce système universel assurera divers services: téléphonie de base, conférences multimédias, télé-médecine, télé-enseignement, visiotéléphonie. Les LIS sont conçues de telle sorte que chaque satellite est connecté aux quatre satellites les plus proches du même plan orbital et à deux satellites des deux plans adjacents (quatre au total). Les transmissions s'effectueront à 56 et 59 GHz, en polarisation circulaire lévogyre et dextrogyre, ce qui permettra de réduire les brouillages mutuels. Les caractéristiques techniques types d'un futur système, pour lequel les informations de l'Appendice 3 du Règlement des radiocommunications ont été soumises à l'UIT en 1995, sont indiquées au Tableau 3.

Chaque satellite est connecté à 8 autres satellites, si bien qu'il faut considérer au total 8 transmissions simultanées. La configuration des liaisons établies entre ces divers satellites est illustrée à la Fig. 1.

Aux fins de la présente étude, nous supposerons que les transmissions effectuées à 56 GHz peuvent être reportées sur des fréquences voisines de 66 GHz, et que les transmissions effectuées à 59 GHz pourraient l'être à 70 GHz. En ce qui concerne l'affaiblissement dans l'atmosphère, le cas «70 GHz» est le plus critique du fait que l'affaiblissement dans un air sec est sensiblement plus important à 66 GHz, de sorte que l'on observe alors à la surface de la Terre des niveaux de signaux brouilleurs moins élevés. Pour rendre compte du cas le plus défavorable, l'étude portera donc essentiellement sur les transmissions effectuées au voisinage de 70 GHz.

TABLEAU 3

Caractéristiques techniques d'un futur système du SIS

Paramètre	Valeur
Fréquences porteuses (GHz)	56 et 59
Puissance par canal (dBW)	7,4
Gain maximal de l'antenne (dBi)	48
Gain minimal de l'antenne (dBi)	-10
p.i.r.e. maximale (dBW)	55,4
Diagramme d'antenne	Recommandation UIT-R S.672
Polarisation	Circulaire, lévogyre et dextrogyre
Largeur de bande par canal (GHz)	1
Débit de données maximal par canal (Gbit/s)	1,24416
Densité maximale de puissance spectrale (dB(W/MHz))	-22,6
Densité de p.i.r.e. maximale (dB(W/MHz))	25,4
Altitude de l'orbite (km)	695-705
Excentricité	0,00118
Inclinaison (degrés)	98,2
Angle d'ascension droit (degrés)	$n \times 9,5$ (n compris entre 0 et 20)
Nombre de plans orbitaux	21
Espacement entre plans (degrés)	9,5
Espacement des satellites d'un même plan (degrés)	9
Nombre de satellites par plan	40 (44)
Période orbitale (min)	98,8

La réattribution des liaisons implique quelques modifications techniques mineures. Pour obtenir à 70 GHz une qualité de fonctionnement des liaisons comparable à ce que l'on observe à 59 GHz, il faut compenser la différence d'affaiblissement dans l'espace, soit 1,5 dB. On peut y parvenir en augmentant légèrement le gain de l'antenne du satellite récepteur ainsi que celui de l'antenne du satellite émetteur. On suppose dans ce cas qu'un gain maximal d'antenne de 49 dBi, au lieu de 48 dBi, suffit. À 70 GHz, la longueur d'onde est de 4,3 mm.

Ces données nous permettent de calculer le diamètre de l'antenne et l'ouverture du faisceau à mi-puissance. Avec un rendement de 60% par hypothèse, le diamètre d'une antenne parabolique de 49 dBi de gain est d'environ 0,5 m à 70 GHz. On obtient alors une ouverture de faisceau à mi-puissance de 0,31° (sur un côté, à 3 dB). Les équations suivantes ont été utilisées dans ces calculs:

$$G_m = 10 \log (110 \eta D^2 f^2) \quad (1)$$

$$\theta_3 = 36,4 (\lambda / D) \quad (\text{sur un côté}) \quad (2)$$

où:

G_m : gain maximal de l'antenne

η : rendement

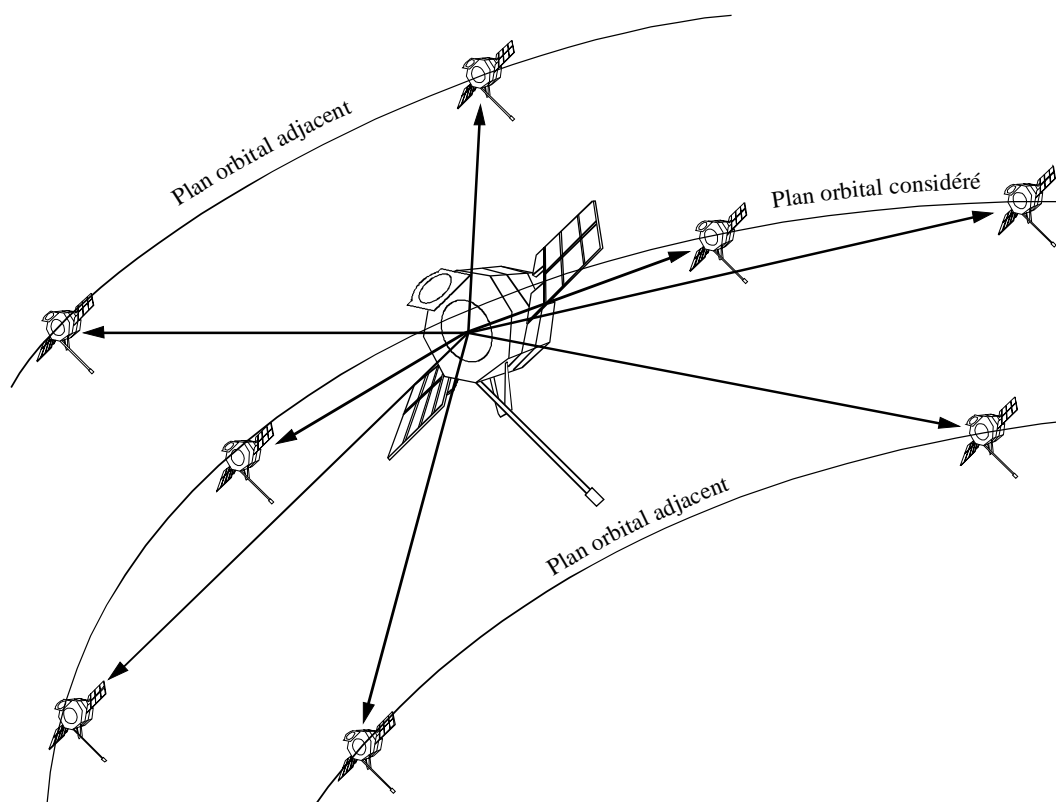
D : diamètre de l'antenne (m)

f : fréquence (GHz)

θ_3 : ouverture du faisceau à mi-puissance (3 dB, sur un côté)

λ : longueur d'onde.

FIGURE 1
Constellations de liaisons réciproques



Liaisons réciproques:

- polarisation circulaire lévogyre à 56 GHz
- polarisation circulaire lévogyre à 59 GHz
- polarisation circulaire dextrogyre à 56 GHz
- polarisation circulaire dextrogyre à 59 GHz

1327-01

Le diagramme de référence de l'antenne est déterminant dans le calcul de la décroissance du gain et donc de la répartition de la puissance surfacique. Le diagramme de rayonnement considéré comme le plus représentatif est celui de la Recommandation UIT-R S.672, qui se caractérise par les équations suivantes:

$$G = \begin{cases} G_m - 3(\theta/\theta_3)^2 & \text{pour } \theta \leq 2,6\theta_3 & (3) \\ G_m - 20 & \text{pour } 2,6\theta_3 < \theta \leq 6,3\theta_3 & (4) \\ G_m - 25 \log(\theta/\theta_3) & \text{pour } \theta > 6,3\theta_3 & (5) \end{cases}$$

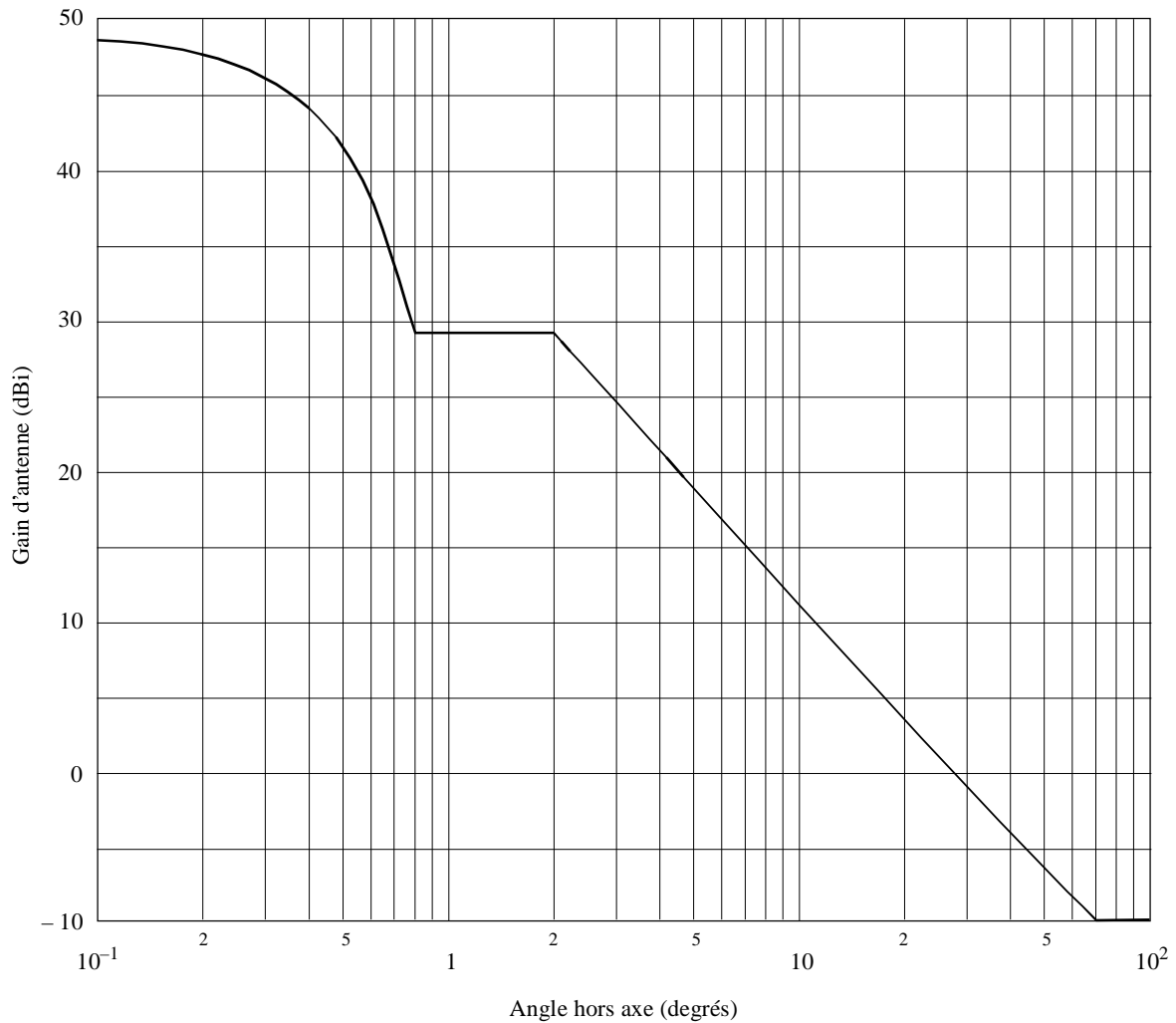
La Fig. 2 illustre le diagramme de référence de gain d'antenne pour une antenne de 0,5 m à 70 GHz. Compte tenu des spécifications du système, on a supposé un gain minimal de -10 dBi.

3 Protection des services affectés

La bande 66-71 GHz est actuellement attribuée à titre primaire aux services mobile, mobile par satellite, de radionavigation et de radionavigation par satellite. Aucune indication d'utilisation n'est spécifiée pour les deux services par satellite, ce qui donne à penser que les bandes n'ont pas encore été associées à des applications. Aucune caractéristique de protection n'est par ailleurs spécifiée dans les documents de l'UIT, si bien qu'il est nécessaire de formuler quelques hypothèses de travail quant à la protection adéquate à prévoir.

FIGURE 2

Contour de gain d'antenne pour des liaisons réciproques



1327-02

Les liaisons des services de Terre et les liaisons espace-Terre peuvent en général être protégées par les limites de puissance surfacique à la surface de la Terre. De telles limites seront d'ailleurs vraisemblablement applicables à l'un des deux services par satellite, ou aux deux services, s'il envisage une exploitation dans le sens espace-Terre. Il y a donc peut-être lieu de spécifier une limite de puissance surfacique convenant à un SIS exploité dans la bande 66-71 GHz.

Le Règlement des radiocommunications ne spécifie aucune limite de puissance surfacique au-dessus de 40,5 GHz. En conséquence, les valeurs les plus proches à considérer sont les limites suivantes, applicables à la bande 31-40,5 GHz:

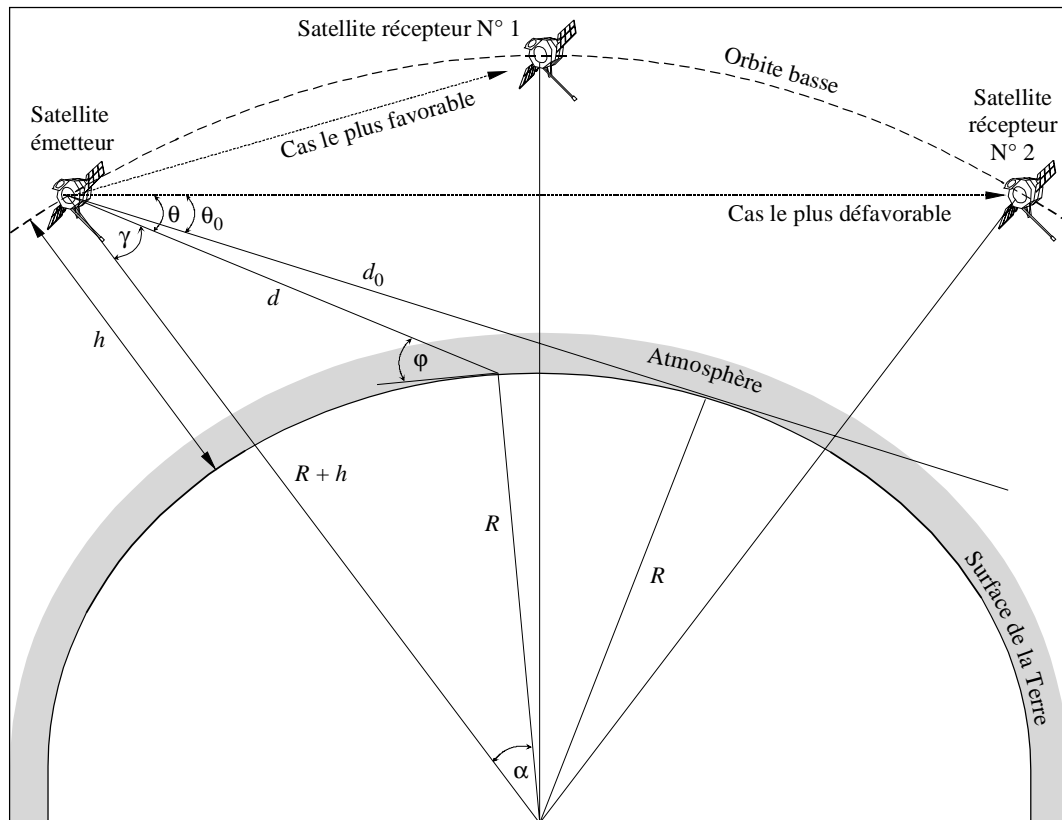
- 115 dB(W/m²): dans toute bande de 1 MHz, pour des angles d'arrivée compris entre 0° et 5° au-dessus du plan horizontal
- 115 + 0,5(θ - 5) dB(W/m²): dans toute bande de 1 MHz, pour des angles d'arrivée compris entre 5° et 25° au-dessus du plan horizontal
- 105 dB(W/m²): dans toute bande de 1 MHz, pour des angles d'arrivée compris entre 25° et 90° au-dessus du plan horizontal.

4 Évaluation des possibilités de partage

La Fig. 1 illustre les diverses constellations de liaisons réciproques. Pour les liaisons sur courte distance, l'angle de décroissance d'antenne par rapport à la surface de la Terre est élevé (par rapport aux liaisons sur plus grande distance). Par ailleurs, pour des transmissions sur courte distance, on peut également réduire le niveau de puissance.

Les deux constellations illustrées à la Fig. 3 représentent respectivement le cas le plus défavorable et le cas le plus favorable pour le calcul des puissances surfaciques à la surface de la Terre. Dans le cas le plus défavorable, le satellite émetteur N° 1 communique avec le satellite récepteur N° 2 le plus distant. L'angle d'émission est plus fermé, par rapport à la Terre, que dans le cas d'une transmission vers le satellite récepteur N° 1, situé dans le même plan. La constellation utilisée pour les émissions à destination de satellites situés dans des plans adjacents est variable, mais, en tout état de cause, elle est moins critique comparée au cas le plus défavorable constitué par une constellation dans le même plan. Dans certaines constellations spécifiques, à proximité des pôles, les distances peuvent être encore inférieures aux distances les plus courtes qui interviennent dans le cas d'une constellation dans un même plan. Les constellations géométriques sont évidentes (voir la Fig. 3). Pour des raisons de clarté, le schéma n'est pas à l'échelle.

FIGURE 3
Configuration géométrique pour les calculs de puissance surfacique



Note 1 - Ce schéma n'est pas à l'échelle.

1327-03

Les calculs de niveau de puissance surfacique à la surface de la Terre seraient relativement simples s'il ne fallait pas tenir compte de l'affaiblissement dû à l'atmosphère. Les principaux facteurs qui déterminent le niveau de puissance surfacique sont la densité spectrale de puissance, le gain résultant de l'antenne vers la surface de la Terre et la distance au point d'impact. Toutefois, aux fréquences élevées, l'affaiblissement dans l'atmosphère, dû à l'air sec (essentiellement de l'oxygène) ainsi qu'à la vapeur d'eau ne peut pas être négligé.

La puissance surfacique, pdf , à la surface de la Terre est donnée par l'équation suivante:

$$pdf = PSD + G - 10 \log(4\pi d^2) - A_a \quad (6)$$

où:

PSD : densité maximale de puissance spectrale

G : contour de gain d'antenne

d : distance à la surface de la Terre

A_a : affaiblissement dû à l'atmosphère.

On trouve dans la Recommandation UIT-R P.676 des équations applicables au calcul de l'incidence de l'air sec et de la vapeur d'eau. L'affaiblissement spécifique γ_o dû à l'air sec pour une pression de 1 013 hPa et une température de 15° C se calcule comme suit:

$$\gamma_o = \left[0,00719 + \frac{6,09}{f^2 + 0,227} + \frac{4,81}{(f - 57)^2 + 1,5} \right] f^2 \times 10^{-3} \quad \text{dB/km} \quad (7)$$

Pour une fréquence voisine de 70 GHz, $\gamma_o = 0,18$ dB/km. Cette valeur est déjà sensiblement inférieure à l'affaiblissement maximal observable à 60 GHz, qui est de plus de 10 dB/km. L'affaiblissement spécifique γ_w dû à la vapeur d'eau pour une pression de 1 013 hPa à une température de 15° C se calcule comme suit:

$$\gamma_w = \left[0,05 + 0,0021 \rho + \frac{3,6}{(f - 22,2)^2 + 8,5} + \frac{10,6}{(f - 183,3)^2 + 9,0} + \frac{8,9}{(f - 325,4)^2 + 26,3} \right] f^2 \rho \times 10^{-4} \quad \text{dB/km} \quad (8)$$

Pour une densité de vapeur d'eau type de $\rho = 7,5$ g/m³ et une fréquence voisine de 70 GHz, $\gamma_w = 0,25$ dB/km.

Il apparaît que l'affaiblissement diminue lorsque l'altitude par rapport à la surface de la Terre augmente. Il convient donc de tenir compte de l'altitude de la station de réception qui subit les brouillages. Pour calculer l'affaiblissement sur le trajet de transmission pour un angle d'élévation spécifique, on peut utiliser les équations suivantes:

$$A_a = \frac{h_o \gamma_o e^{-h_s/h_o} + h_w \gamma_w}{\sin \varphi} \quad \text{dB} \quad \text{pour } 10^\circ < \varphi \leq 90^\circ \quad (9)$$

$$A_a = \frac{\sqrt{R_e}}{\cos \varphi} \left[\sqrt{h_o} \gamma_o F(x_1) e^{-h_s/h_o} + \sqrt{h_w} \gamma_w F(x_2) \right] \quad \text{dB} \quad \text{pour } 0^\circ < \varphi \leq 10^\circ$$

$$F(x_i) = \frac{1}{0,661x_i + 0,339 \sqrt{x_i^2 + 5,51}} \quad \text{pour } i = 1, 2 \quad (10)$$

$$x_1 = \cos \varphi \left[\sin \varphi \operatorname{tg}^2 \varphi \sqrt{\frac{R_e}{h_o}} + \sqrt{\frac{R_e}{h_o} + 2 \frac{h_i}{h_o} + \frac{h_i^2}{2R_e h_o}} \right] \quad (11)$$

$$x_2 = \cos \varphi \left[\sin \varphi \operatorname{tg}^2 \varphi \sqrt{\frac{R_e}{h_w}} + \sqrt{\frac{R_e}{h_w} + 2 \frac{h_i}{h_w} + \frac{h_i^2}{2R_e h_w}} \right] \quad (12)$$

$$h_w = h_{w0} \left[1 + \frac{3,0}{(f - 22,2)^2 + 5} + \frac{5,0}{(f - 183,3)^2 + 6} + \frac{2,5}{(f - 325,4)^2 + 4} \right] \quad \text{km} \quad (13)$$

où:

h_o : hauteur équivalente dans un air sec (6 km)

h_w : hauteur équivalente en présence de vapeur d'eau

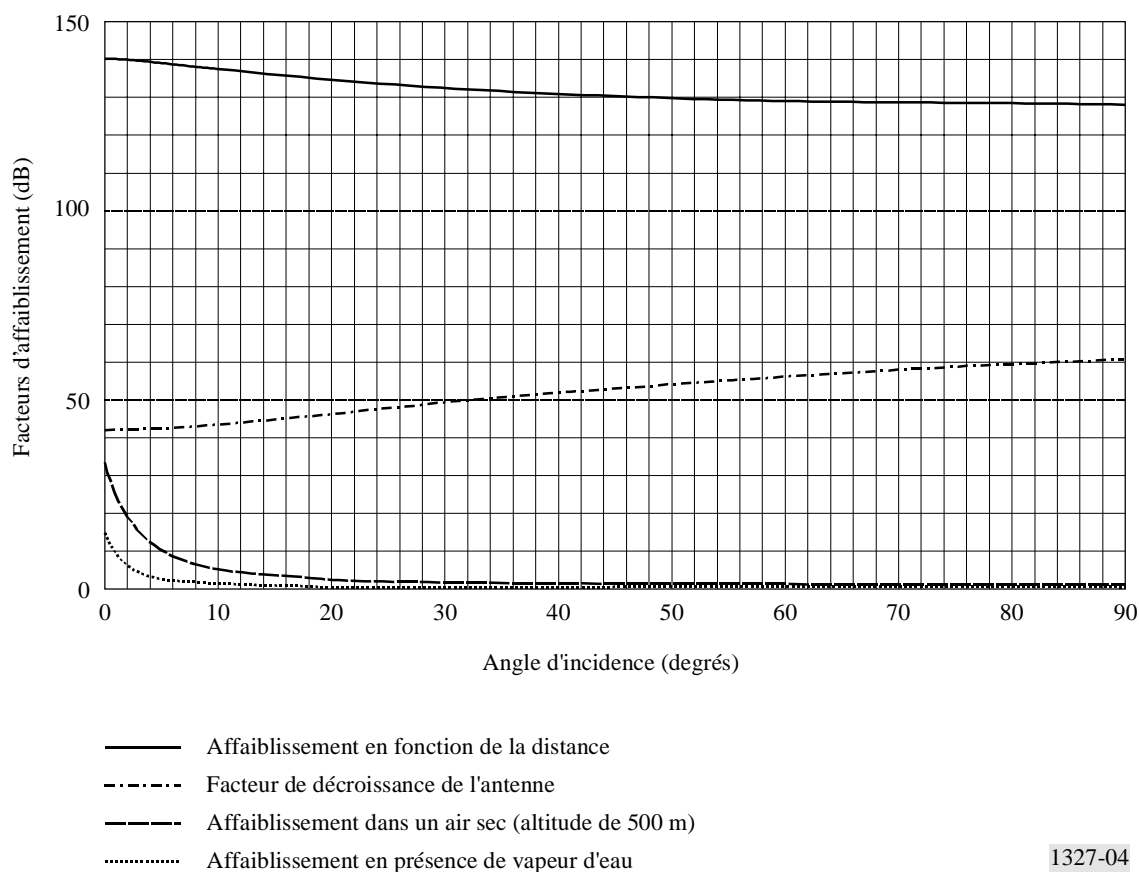
h_{w0} : 1,6 km par temps clair, 2,1 km dans des conditions de précipitations

R_e : rayon effectif de la Terre, compte tenu de la réfraction (8 500 km)

φ : angle d'élévation.

On a établi un programme informatique permettant de calculer les niveaux de puissance surfacique à la surface de la Terre en fonction de tous les facteurs précités pour des angles d'élévation compris entre 0° et 90° . Par conception, ce programme permet de vérifier la sensibilité des résultats en fonction de l'un quelconque des paramètres de travail. Un cas «défavorable» représentatif a été retenu, sur la base d'un certain nombre d'hypothèses «pessimistes». La Fig. 4 permet de comparer les divers facteurs d'affaiblissement.

FIGURE 4
Facteurs de réduction de la puissance surfacique

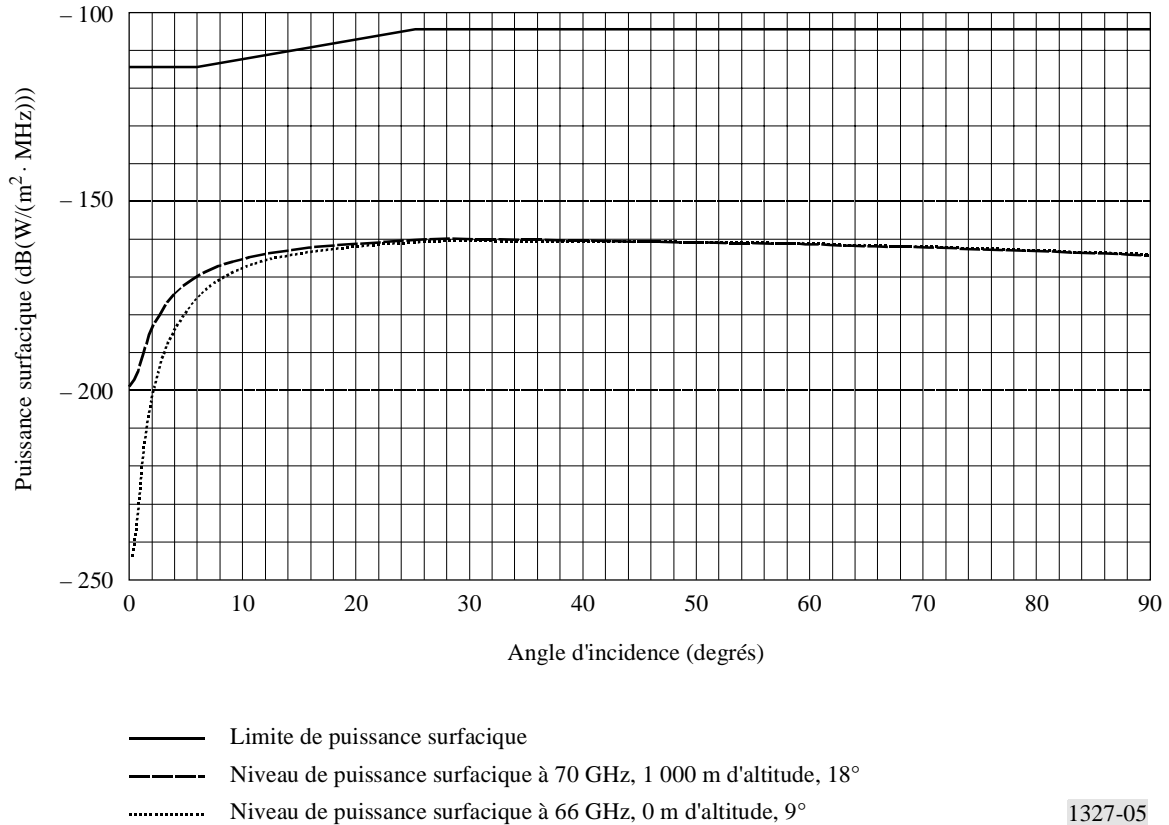


La Fig. 5 indique les valeurs de puissance surfacique observées dans le cas le plus favorable et dans le cas le plus défavorable, pour une constellation de satellites situés dans un même plan, compte tenu de deux altitudes, à savoir 1 000 m au-dessus de la mer d'une part, et niveau de la mer d'autre part, avec des fréquences de travail de 70 et 66 GHz, pour une température de 15°C et une densité de vapeur d'eau de $7,5\text{ g/m}^3$. On constate que les niveaux de puissance surfacique produits à la surface de la Terre sont inférieurs de plus de 50 dB à la limite qui pourrait être spécifiée pour la bande la plus proche au voisinage de 40 GHz.

Un seul satellite LEOSAT 1 ne pourrait en aucune circonstance occasionner des valeurs voisines des limites de puissance surfacique envisageables. Toutefois, il arrive qu'un grand nombre de satellites émettent simultanément. En conséquence, il faut s'intéresser à l'effet cumulatif des systèmes du SIS. On peut calculer la limite supérieure de cet effet cumulatif en tenant compte de la surface illuminée par un satellite et en extrapolant cette valeur compte tenu du nombre total de satellites du système. Un satellite sur orbite terrestre basse placé sur une orbite de 700 km d'altitude illumine environ 5% de la surface de la Terre pour des angles d'incidence allant jusqu'à 0° . En conséquence, 840 satellites actifs, répartis également autour de la planète, avec quatre liaisons pour chaque fréquence d'émission, produisent un effet cumulatif tel que le niveau moyen de puissance surfacique augmente d'environ 22 dB. Cette hypothèse ne tient pas compte des différents plans de polarisation. Par ailleurs, l'hypothèse selon laquelle le niveau de puissance surfacique est constant jusqu'à un angle d'incidence de 0° est très pessimiste, puisque le niveau de puissance surfacique diminue rapidement au-dessous d'environ 10° .

FIGURE 5

Contours de puissance surfacique en fonction de la limite



1327-05

Jusqu'ici, seuls les brouillages causés par le SIS à d'autres services ont été examinés. Mais il se peut que, dans certains cas, les autres services partageant la bande soient à l'origine de brouillages subis par le SIS. A cet égard on peut formuler, pour résumer, les conclusions suivantes:

Mobile et radionavigation:

Les transmissions se produisent en général à la surface de la Terre. L'affaiblissement dans un air sec et l'affaiblissement dû à la vapeur d'eau (voir la Fig. 4), ainsi que la technique de découplage des antennes, pourront se traduire par une réduction du niveau du signal telle que l'on ne pourra absolument pas parler de brouillage préjudiciable.

Mobile par satellite et radionavigation par satellite:

Les risques de brouillage sont possibles pour des systèmes à des altitudes d'orbite comparables à celles d'un système SIS. Toutefois, même dans un tel cas, une bande peut toujours être partagée lorsque les émissions sont faites en opposition de polarisation. En effet, on utilise des antennes à faisceau étroit qui offrent une discrimination de polarisation élevée.

5 Conclusions

Manifestement, il est possible d'envisager un partage entre un service de Terre quelconque et le SIS dans la bande 66-71 GHz, en raison de l'étroitesse des faisceaux d'antennes utilisés et des effets dus à l'atmosphère. La même conclusion s'applique aux systèmes à satellites exploités dans le sens espace-Terre. Les puissances surfaciques produites par un seul satellite du SIS devraient être inférieures de 50 à 80 dB aux limites de puissance actuellement applicables au voisinage de 40 GHz. Par ailleurs, même l'effet d'ensemble d'un très grand nombre de satellites ne relèvera les niveaux cumulatifs de puissance surfacique que d'une valeur comprise entre environ 10 et 20 dB, de sorte que l'on sera encore sensiblement au-dessous des limites de puissance surfacique considérées comme raisonnables.