

## RECOMMANDATION UIT-R SA.1013\*

**Service de recherche spatiale dans l'espace lointain: bandes de fréquences préférées dans la gamme 40-120 GHz**

(Question UIT-R 133/7)

(1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que les fréquences les plus appropriées pour les télécommunications entre la Terre et les vaisseaux spatiaux évoluant dans l'espace lointain sont déterminées en partie par les phénomènes de propagation atmosphérique et interplanétaire;
- b) que le choix des fréquences préférées dépend également des technologies employées;
- c) que les conditions de fiabilité des télécommunications doivent être respectées lorsque les conditions atmosphériques sont défavorables;
- d) que la même fréquence peut être utilisée pour différents vaisseaux spatiaux dont les coordonnées célestes sont différentes, mais que pour des vaisseaux dont les coordonnées célestes sont voisines et qui se trouvent à l'intérieur du faisceau d'antenne de la station terrienne on doit en général utiliser des fréquences différentes;
- e) qu'il est commode et souhaitable d'assurer les fonctions de poursuite et de télémessure sur la même liaison espace-Terre, et les fonctions de poursuite et de télécommande sur la même liaison Terre-espace;
- f) que pour la poursuite Doppler de précision, il est nécessaire de disposer d'une paire de fréquences Terre-espace et espace-Terre en cohérence;
- g) que pour une compensation plus précise des effets des particules chargées sur la vitesse de propagation, il faut utiliser de manière simultanée des liaisons dont les fréquences sont en cohérence et situées dans deux ou plusieurs bandes de fréquences éloignées entre elles;
- h) que les liaisons en phonie et les liaisons vidéo pour les missions habitées en espace lointain pourraient utiliser les bandes de fréquence attribuées aux fonctions de télémessure, de télécommande et de poursuite;
- j) que les gammes de fréquences préférées ont été choisies et sont précisées dans l'Annexe 1;
- k) que l'attribution des bandes au service de recherche spatiale en espace lointain dépend, entre autres, des possibilités de partage avec les autres services,

---

\* La Commission d'études 7 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2003 conformément à la Résolution UIT-R 44.

*recommande*

- 1 que l'on choisisse pour le service de recherche spatiale en espace lointain, entre 40 et 120 GHz, des bandes de fréquences comprises dans les gammes préférées spécifiées au Tableau 1;
- 2 que l'on tienne compte des conditions relatives à la largeur de bande exposées dans la Recommandation UIT-R SA.1015;
- 3 que l'on tienne compte des possibilités de partage avec les autres services (voir la Recommandation UIT-R SA.1016).

## **Annexe 1**

### **Choix des bandes de fréquences dans la gamme 40-120 GHz préférées pour la recherche dans l'espace lointain**

#### **1 Introduction**

Les performances des liaisons entre stations terriennes et stations de l'espace lointain sont influencées par l'atmosphère de la Terre. L'affaiblissement et l'émission par l'atmosphère limitent généralement les fréquences que l'on peut utiliser pour les télécommunications avec l'espace lointain. Il existe néanmoins certaines bandes dans lesquelles l'affaiblissement par l'atmosphère est assez peu important pour que l'on puisse y établir des liaisons entre des stations terriennes et des stations se trouvant dans l'espace lointain. Il y a en outre des bandes qui conviendraient particulièrement bien pour les liaisons entre une station de relais placée sur une orbite autour de la Terre et des stations de l'espace lointain.

La présente Annexe examine le choix des bandes de fréquences préférées pour les télécommunications avec l'espace lointain dans la gamme 40-120 GHz. La question du choix des bandes situées dans la gamme 1-40 GHz qui sont préférées pour la recherche spatiale fait l'objet de la Recommandation UIT-R SA.1012.

#### **1.1 Avantages que présentent les fréquences plus élevées**

Les fréquences radioélectriques supérieures à 40 GHz peuvent présenter des avantages pour les télécommunications avec l'espace lointain: meilleures performances des liaisons, possibilité de plus grande largeur de bande, réduction des erreurs affectant les mesures qui dépendent de la vitesse de propagation, possibilité d'effet d'écran contre les brouillages d'origine terrestre.

##### **1.1.1 Amélioration de la qualité de la liaison**

Pour une puissance d'émission donnée, la puissance reçue via une liaison en espace libre entre des antennes parfaites d'ouverture fixe est proportionnelle au carré de la fréquence. A titre d'exemple pratique de ce phénomène, on peut citer le cas d'un trajet entre un engin spatial dans l'espace lointain et un satellite relais en orbite au-dessus de l'atmosphère terrestre. Si le choix de la fréquence dans la gamme qui est envisagée n'est pas limité par la technique, la fréquence la plus élevée de cette gamme assurera la meilleure qualité de liaison.

En ce qui concerne la transmission à travers l'atmosphère, dans certaines bandes au-dessus de 40 GHz, l'affaiblissement par l'atmosphère est suffisamment faible pour permettre des communications réelles.

On peut mettre à profit les meilleures performances de ces liaisons de fréquence élevée pour des fonctions de commande, de télémesure et de radiométrie. On peut encore profiter de ces performances pour réduire et alléger les antennes et les émetteurs des engins spatiaux.

### **1.1.2 Mesure plus exacte de la phase et du temps de propagation de groupe**

La précision dans la navigation des sondes pour l'espace lointain dépend de la détermination de leur position et de leur vitesse, acquise par des mesures de la phase et du temps de propagation de groupe des signaux que l'on reçoit d'elles. Ces mesures sont influencées par la vitesse de propagation le long du trajet de transmission. Or, cette vitesse dépend de la densité de particules chargées le long du trajet. L'influence de ces particules varie en sens inverse du carré de la fréquence, raison pour laquelle des fréquences plus élevées sont préférables pour la navigation et pour certaines mesures radioélectriques.

### **1.1.3 Effets d'écran contre les brouillages d'origine terrestre**

On pourra avoir avantage à utiliser une station géostationnaire comme relais pour des signaux en provenance ou à destination de sondes évoluant dans l'espace lointain. Les liaisons entre une telle station et les sondes seraient à l'abri des effets perturbateurs de l'atmosphère. On pourrait les protéger des brouillages d'origine terrestre en choisissant des fréquences pour lesquelles l'atmosphère est relativement opaque aux signaux radioélectriques. Il existe de telles fréquences dans la gamme 40-120 GHz.

**1.1.4** Aux fréquences élevées, les bandes attribuées sont en général plus larges, il est ainsi possible d'utiliser des largeurs de bande de transmission plus importantes. On peut donc employer des schémas de codage plus complexes qui permettent de diminuer les taux d'erreur et la sensibilité aux brouillages.

## **1.2 Base du choix des fréquences**

Le choix des fréquences repose sur la qualité des liaisons qui est influencée par les caractéristiques de propagation et les caractéristiques des équipements. Dans les trois paragraphes suivants de la présente Annexe, on examine les facteurs qui influent sur le choix des fréquences. Certains d'entre eux fournissent les renseignements dont on a besoin pour calculer un indice de qualité des liaisons. Cet indice peut s'exprimer par le rapport  $P_r/N_0$  de la puissance totale reçue à la densité spectrale de bruit pour un ensemble donné de conditions de propagation et de caractéristiques du matériel.

## **2 Caractéristiques de la propagation interplanétaire qui dépendent de la fréquence**

Les caractéristiques de la propagation interplanétaire déterminent la qualité des liaisons entre une sonde pour l'espace lointain et un satellite relais situé à l'extérieur de l'atmosphère de la Terre. Ces caractéristiques influent aussi sur la qualité des liaisons entre les stations terriennes et l'espace lointain.

### **2.1 Affaiblissement**

En dehors de l'atmosphère d'une planète, l'absorption par les gaz et la diffusion par les particules de poussière ne provoquent pas d'affaiblissement supérieur à 0,1 dB dans la gamme 40-120 GHz tant que le trajet de propagation reste dans les limites de notre système solaire. L'affaiblissement dans l'espace interplanétaire sera donc considéré comme un facteur négligeable dans le choix des bandes à utiliser de préférence.

## 2.2 Température de bruit du ciel

La température de bruit du ciel vu d'un satellite relais est déterminée par le bruit de fond cosmique (3 K) et par le bruit quantique, comme le montre la courbe A de la Fig. 1, sauf lorsque du bruit provenant de la Terre, d'autres planètes ou du soleil est capté par l'antenne. L'effet de ces sources de bruit est étudié dans la Recommandation UIT-R P.372.

La température de bruit du ciel vu d'un engin spatial est également représentée par la courbe A. Comme la Terre se trouvera généralement dans le lobe principal d'une antenne d'engin spatial pointée vers un satellite relais, elle sera un élément de la température de bruit. Par exemple, d'un engin spatial situé à  $4 \times 10^7$  km de la Terre (minimum de la distance entre la Terre et Vénus), la Terre est vue sous un angle de  $0,018^\circ$ . Si l'ouverture du faisceau de l'antenne de cet engin est limitée par la précision de pointage à un minimum de  $0,15^\circ$ , la Terre n'occupera que moins de 1,5% du lobe principal de l'antenne. L'effet de la température de corps noir de la Terre est réduit dans les mêmes proportions à une valeur qui est faible par rapport à la température de bruit de 600-1500 K d'un système de réception typique d'un engin spatial. (Dans la gamme de fréquences 40-120 GHz, la température du corps noir varie entre 210 et 290 K en fonction de la fréquence et de la longitude du point situé à la verticale de l'engin spatial à la surface de la Terre.)

La température de bruit du récepteur d'un satellite de relais peut être très inférieure à 600 K, mais cela n'a aucune incidence importante sur le choix des bandes de fréquences préférées dans la plage considérée.

Dans cette gamme de fréquences, la température du bruit perçu par une antenne pointée en direction du soleil est de 6000 K. Cette hausse très élevée de la température de bruit du système doit habituellement être évitée et peut donc influencer le calendrier et la conception de certaines missions dans l'espace lointain et des appareils expérimentaux réalisés à cet effet.

## 2.3 Vitesse de propagation

La présence de particules chargées le long du trajet de transmission peut modifier la vitesse de propagation. La Fig. 5 de la Recommandation UIT-R SA.1012 donne un exemple de l'erreur de mesure sur la distance en fonction de la fréquence et de l'angle entre le trajet du rayon et la direction du Soleil vu de la Terre. Bien que les courbes de la figure ne comprennent pas les fréquences supérieures à 32 GHz, la tendance à la diminution des erreurs se poursuit à mesure que les fréquences augmentent. Elle montre bien que, pour déterminer la distance avec le maximum de précision, on a intérêt à utiliser des fréquences élevées.

## 2.4 Scintillation

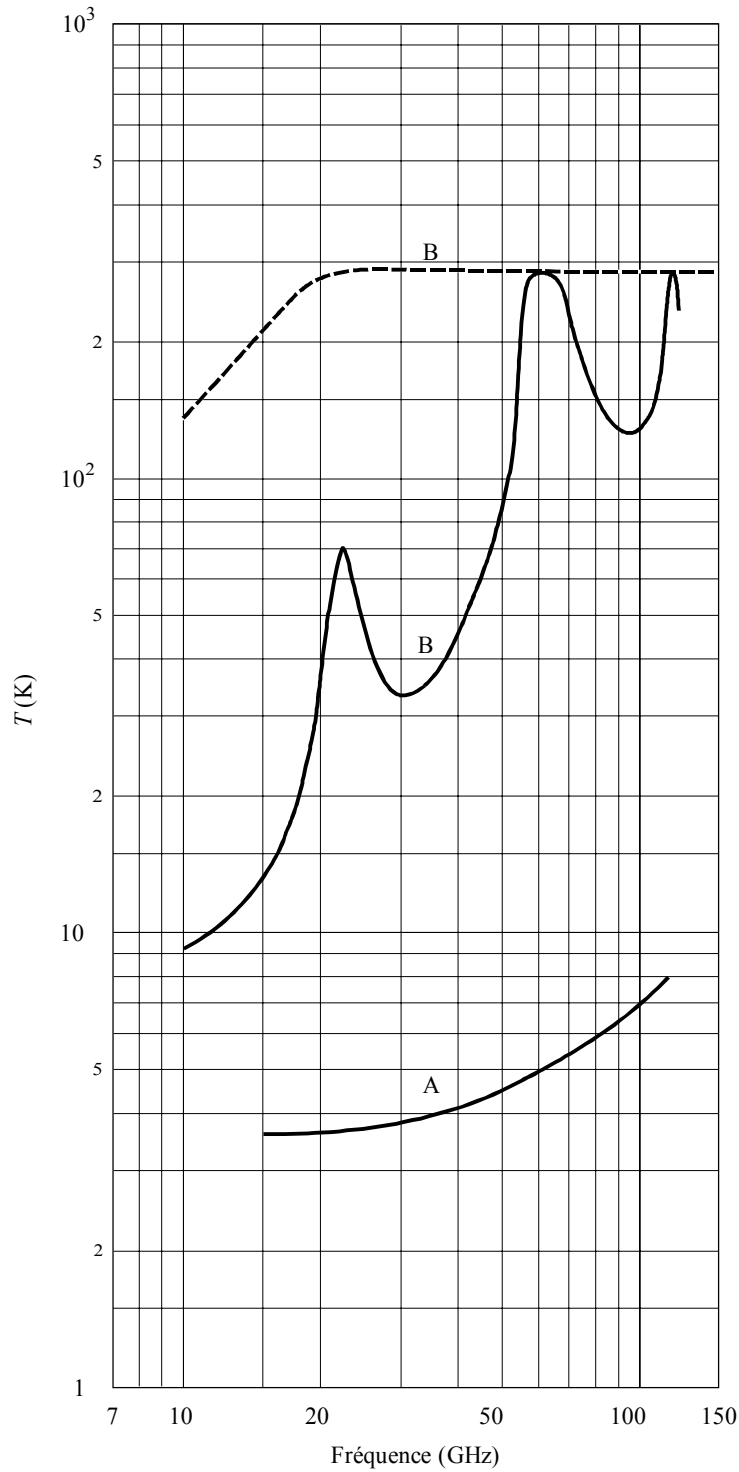
La scintillation d'amplitude et de phase due au plasma solaire peut abaisser la qualité des liaisons lorsque le trajet des rayons passe près du Soleil. L'ampleur de la scintillation diminue quand la fréquence augmente.

## 3 Caractéristiques de la propagation à travers une atmosphère qui dépendent de la fréquence

Les facteurs de propagation interplanétaire examinés ci-dessus affectent les liaisons entre l'espace lointain et une situation relais géostationnaire. Pour les liaisons entre l'espace lointain et la Terre, l'atmosphère joue un rôle dominant dans le choix des fréquences préférées de la gamme 40-120 GHz.

Les atmosphères planétaires peuvent influencer sur les trajets qui rasant ces atmosphères ou qui y pénètrent.

FIGURE 1  
Température de bruit du ciel



Courbes A: vu par la sonde d'espace lointain

B: vu par l'antenne d'une station terrienne sous un angle d'élévation de 30°

- Atmosphère formée de gaz
- - - - - Atmosphère formée de gaz, avec en outre pluie dépassée pendant 0,001% du temps (soit 55 mm/h dans la zone hydrométéorologique J)

### 3.1 Affaiblissement

#### 3.1.1 Affaiblissement dû à l'atmosphère terrestre

L'affaiblissement des ondes qui traversent l'ionosphère de la Terre est négligeable aux fréquences supérieures à 40 GHz, mais l'atmosphère neutre joue un rôle important à ces fréquences. L'affaiblissement de transmission dû à l'atmosphère est représenté sur la Fig. 2 (voir aussi la Recommandation UIT-R P.676). Au-dessus de 40 GHz, c'est sur des fréquences voisines de 90 GHz que les liaisons entre la Terre et l'engin spatial subiraient le minimum d'affaiblissement.

L'affaiblissement dû à des précipitations d'un taux supérieur à quelques mm/h est généralement plus important que celui dû aux gaz de l'atmosphère et il augmente de façon régulière avec la fréquence dans la gamme considérée. Le taux de précipitation pour 0,01% du temps dans la zone hydrométéorologique médiane est supérieur à 30 mm/h (voir la Recommandation UIT-R P.837). Pour une pluie d'une telle intensité, l'affaiblissement des fréquences de la gamme 40-120 GHz est si élevé (voir la Recommandation UIT-R P.838) que les télécommunications entre la Terre et les engins spatiaux dans l'espace lointain sont généralement impossibles, aussi n'en tiendrons-nous désormais aucun compte comme facteur de détermination des fréquences préférées.

Pour les liaisons entre satellite relais et engin spatial, le trajet de propagation en visibilité directe sera parfois obscurci par l'interposition de la Terre ou de quelque portion de l'atmosphère terrestre. D'un satellite géostationnaire, la Terre (non compris l'atmosphère) est vue sous un angle solide de  $17,34^\circ$ . Si l'atmosphère depuis la surface de la Terre jusqu'à une altitude de 100 km était opaque aux ondes radioélectriques, l'angle correspondant à la partie obscure augmenterait de  $0,27^\circ$ . L'effet de l'affaiblissement dû à l'atmosphère sur cet angle est si petit qu'il n'a aucune influence sur le choix des bandes de fréquences préférées.

On peut atteindre le but recherché, à savoir protéger contre les brouillages d'origine terrestre les liaisons entre les sondes de l'espace lointain et un satellite de la Terre, en tirant parti de la forte valeur que présente l'affaiblissement par l'atmosphère dans les régions des 60 et 119 GHz (voir la Recommandation UIT-R P.838). Les raies d'absorption par l'oxygène moléculaire sur ces fréquences sont la cause du niveau d'affaiblissement élevé que l'on observe sur la Fig. 2.

#### 3.1.2 Affaiblissement dû à l'atmosphère d'autres planètes

Du point de vue de l'affaiblissement, la nature de l'atmosphère d'autres planètes est sans influence sur le choix des fréquences de télécommunication dans la gamme 40-120 GHz. Cela ne signifie pas qu'il n'y a pas certaines planètes dont l'atmosphère contient des raies spectrales qui présentent un intérêt scientifique dans cette gamme, par exemple les raies de l'ammoniac.

### 3.2 Température de bruit du ciel dans les stations terriennes

La température de bruit du ciel vu d'une station terrienne est fonction de la fréquence, de l'angle d'élévation et des conditions atmosphériques (voir la Recommandation UIT-R P.372). Les courbes B de la Fig. 1 représentent la température de bruit du ciel par temps clair et par forte pluie.

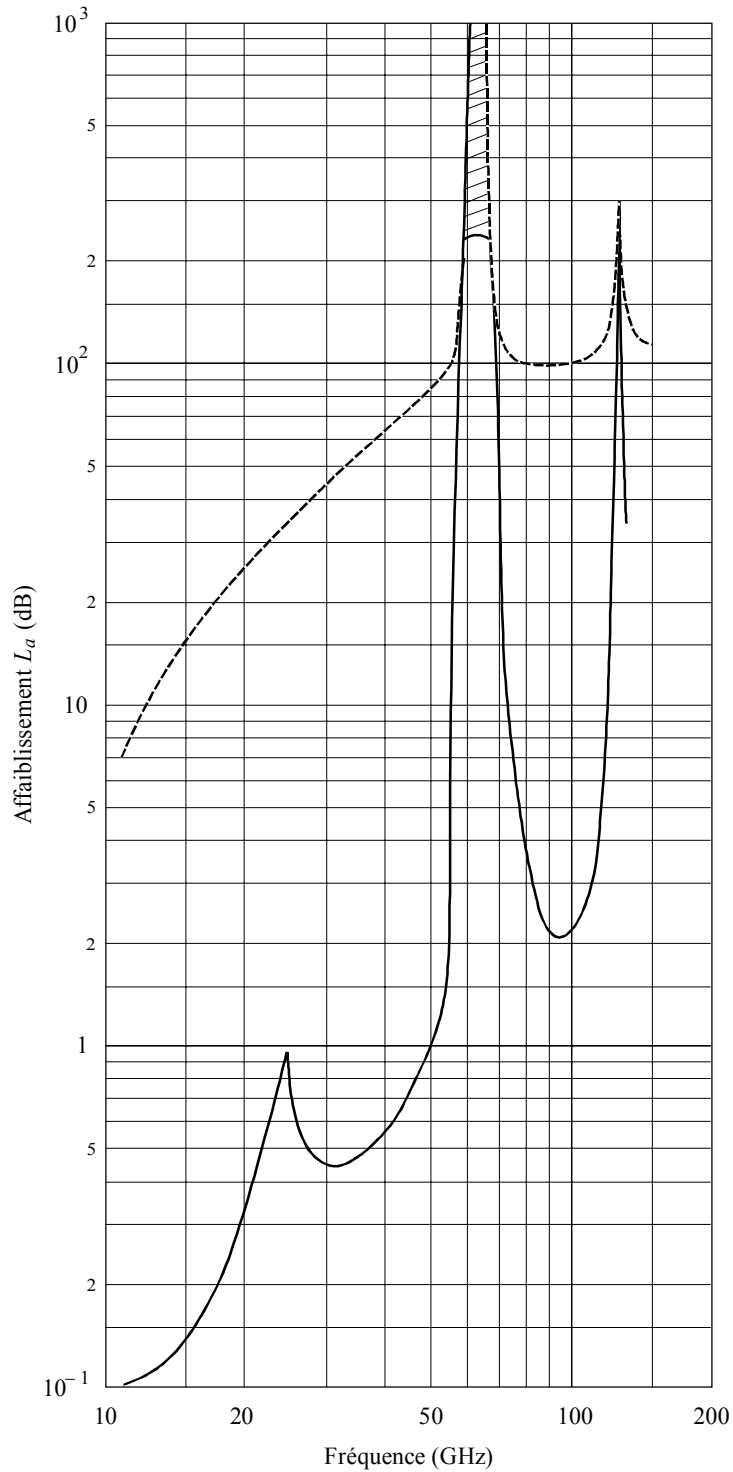
Lorsque l'antenne de la station terrienne est pointée dans la direction du Soleil, la température de bruit est plus élevée.

### 3.3 Scintillation

La scintillation d'amplitude et de phase due à l'atmosphère neutre est étudiée dans la Recommandation UIT-R P.618. Ses effets augmentent avec la fréquence pour une ouverture d'antenne fixe et, à 100 GHz, elle peut provoquer des fluctuations d'amplitude du signal allant de 0,4 à 3,8 dB dans le cas d'une antenne parabolique de 3,7 m de diamètre.

FIGURE 2

Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère et à la pluie pour un angle d'élévation de l'antenne de 30° à une station terrienne



- Atmosphère formée de gaz ( $7,5 \text{ g/m}^3$  de vapeur d'eau à la surface)
- - - Atmosphère formée de gaz, avec en outre pluie dépassée pendant 0,001% du temps (soit 55 mm/h dans la zone hydrométéorologique J)

La scintillation due à l'ionosphère terrestre n'entre pas en ligne de compte pour le choix des fréquences au-dessus de 40 GHz (voir la Recommandation UIT-R P.531) et l'on peut en dire autant pour ce qui est des ionosphères des planètes. Pour certaines missions, la scintillation causée par la couronne solaire pourrait affecter le choix des fréquences.

#### 4 Caractéristiques du matériel qui dépendent de la fréquence

Les caractéristiques du matériel qui déterminent les performances d'une liaison sont notamment la puissance d'émission, les dimensions des antennes, la précision de leur surface et de leur pointage ainsi que la température de bruit du récepteur. Ces caractéristiques dépendent généralement dans une certaine mesure de la fréquence. Dans la gamme 40-120 GHz pour les trajets Terre-espace lointain, l'effet de l'atmosphère sur la qualité des liaisons est si important que les caractéristiques du matériel qui dépendent de la fréquence n'interviennent que de façon négligeable dans le choix des fréquences.

Compte tenu des caractéristiques des polariseurs et des duplexeurs d'ondes, l'émission et la réception simultanée de signaux sur une même antenne imposent un espacement en fréquence pour les liaisons montante et descendante de 8 à 20% environ. Les paires de bandes choisies dans les plages du Tableau 1 doivent tenir compte de cette condition.

TABLEAU 1

##### Bandes de fréquences à utiliser de préférence et leurs applications

Bandes à utiliser de préférence (GHz)	Domaine d'application	Autres conditions <sup>(1)</sup>
56-64	Satellite relais-espace lointain et espace lointain-satellite, avec effet d'écran sur les signaux d'origine terrestre	Paire de bandes de 1 000 MHz de largeur, dans la gamme et espacées d'environ 8-20%
80-100	Espace lointain-Terre et Terre-espace lointain	Paire de bandes de 1 000 MHz de largeur, dans la gamme et espacées d'environ 8-20%
98-110	Satellite relais-espace lointain (liaison associée à une liaison dans la bande 117,7-119,8 GHz)	Largeur de bande de 1 000 MHz, espacée d'environ 8-20% de la bande située dans la gamme 117,7-119,8 GHz
117,7-119,8	Espace lointain-satellite relais, avec effet d'écran sur les signaux d'origine terrestre	Largeur de bande de 1 000 MHz

<sup>(1)</sup> Le pourcentage d'espacement s'applique à une paire de fréquences, une dans chacune des bandes, et non à la largeur des bandes. Par exemple la limite inférieure d'une bande est de 56 GHz, la limite inférieure de l'autre bande doit être entre 1,08 et 1,2 fois 56 GHz.

#### 5 Analyse d'un exemple de qualité des liaisons

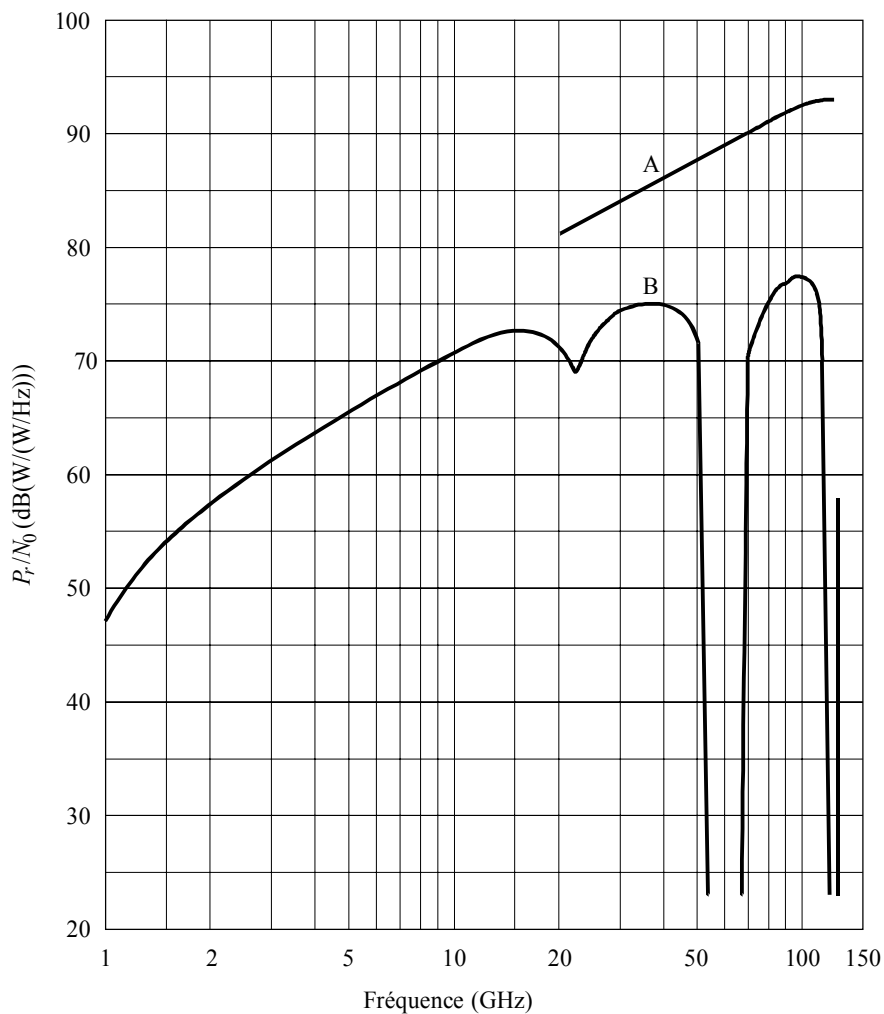
La Fig. 3 représente les performances des liaisons en fonction de la fréquence: la courbe A est valable pour un trajet en espace libre et la courbe B tient compte de l'effet de l'atmosphère de la Terre. L'indice de performance  $P_r/N_0$  (voir le § 1.2 ci-dessus) a été calculé d'après les données des Fig. 1 et 2 et les valeurs des paramètres ci-dessous:

Distance de communication:	$8 \times 10^8$ km
Puissance de l'émetteur de l'engin spatial:	25 W
Antenne de l'engin spatial:	3,7 m
Antenne de la station terrienne:	64 m.



FIGURE 3

Indice de performance  $P_r/N_0$  limité par les phénomènes naturels seulement; deux antennes de diamètre fixe: 3,7 m à la station de l'espace lointain, 64 m à la station de réception



Courbes A: espace lointain vers satellite

B: espace lointain vers station terrestre

D03

On admet que ces antennes sont idéales et que leurs gains sont proportionnels au carré de la fréquence.

Les valeurs ci-dessus ne sont données qu'à titre d'illustration; on pourrait en prendre d'autres et l'on aboutirait à des résultats numériques différents, mais la forme des courbes resterait la même, ainsi que le choix des fréquences qui en découle.

La comparaison entre les courbes A et B montre l'intérêt que l'on a, du point de vue de la qualité des liaisons, à utiliser des fréquences plus élevées lorsque le trajet de transmission est tout entier dans l'espace. C'est la principale raison qui justifie l'établissement d'une station relais sur un satellite voisin de la Terre.

La courbe B montre que des bandes situées dans la gamme 40-120 GHz permettent d'assurer la transmission à travers l'atmosphère et de protéger contre les signaux d'origine terrestre les liaisons entre un satellite relais et des sondes de l'espace lointain.

## 6 Bandes de fréquences préférées

Les bandes de fréquences préférées pour la recherche dans l'espace lointain dans la gamme 40-120 GHz sont indiquées dans le Tableau 1. Elles ont été déterminées d'après:

- les caractéristiques d'affaiblissement et la température de bruit de la propagation dans l'atmosphère;
- la nécessité d'assurer des liaisons entre un satellite relais et une station dans l'espace lointain qui soient protégées contre les signaux d'origine terrestre par un effet d'écran;
- la nécessité d'assurer des liaisons permettant de communiquer entre une station de l'espace lointain d'une part, un satellite relais ou une station terrienne d'autre part.

La faisabilité du partage des bandes et les attributions existantes dans le Règlement des radiocommunications n'ont pas été prises en considération pour le choix des bandes. Les caractéristiques de la scintillation ou de la vitesse de la propagation qui dépendent de la fréquence n'ont pas été retenues comme facteurs déterminants des bandes de fréquences préférées. Ces caractéristiques pourraient influencer l'utilisation de certaines bandes de fréquences allouées pour certaines missions de recherche spatiale, mais c'est la qualité en matière de communication qui a été retenue comme facteur dominant pour le choix des fréquences préférées. On n'a pas non plus tenu compte pour ce choix des caractéristiques du matériel qui dépendent de la fréquence. Les bandes susceptibles d'être allouées resteront sans doute les mêmes pendant bien des années et la technologie du matériel évoluera de telle manière que l'on fasse le meilleur usage de ces fréquences, compte tenu des limites imposées par les phénomènes naturels.

Une paire de liaisons (sonde-satellite terrestre et inversement) peut être placée dans une région où l'affaiblissement est élevé entre 56 et 64 GHz. Un espacement en fréquence d'environ 8 à 20% est nécessaire. Le pic d'absorption à 119 GHz est bien plus étroit, et comme l'espacement doit être d'environ 8 à 20%, une seule liaison de la paire de liaisons bénéficiera de l'effet d'écran maximal. Dans ce cas, l'effet d'écran sur la liaison vaisseau spatial-satellite relais est plus important.

---