

RECOMMANDATION UIT-R SA.364-5*

**FRÉQUENCES ET LARGEURS DE BANDES PRÉFÉRÉES POUR LES SATELLITES
HABITÉS OU NON DU SERVICE DE RECHERCHE SPATIALE,
PROCHES DE LA TERRE**

(Question 132/7)

(1963-1966-1970-1978-1986-1992)

Le CCIR,

considérant

- a) que les fréquences de fonctionnement appropriées et les largeurs de bande de fréquences radioélectriques requises pour les missions de la recherche spatiale au voisinage de la Terre sont déterminées par les facteurs de propagation et les considérations techniques;
- b) que des radiocommunications dans les deux sens doivent être assurées pour de nombreuses missions à proximité de la Terre et sont d'une importance vitale dans les missions faisant appel à des engins spatiaux habités;
- c) que les caractéristiques de fiabilité des télécommunications doivent être respectées lorsque les conditions atmosphériques sont défavorables;
- d) qu'il est pratique et souhaitable d'utiliser une seule liaison pour les fonctions de télécommunications;
- e) que, pour la précision de la poursuite, il est nécessaire d'utiliser une paire de fréquences Terre-espace et espace-Terre en relation cohérente;
- f) que, pour les opérations simultanées d'émission-réception avec une seule antenne, les fréquences Terre-espace et espace-Terre appropriées doivent être espacées d'au moins 7%;
- g) qu'il est nécessaire de recourir aux systèmes de télécommunications par satellite avec relais espace-espace et Terre-espace pour répondre à la croissance et à l'évolution des recherches au voisinage de la Terre du service de recherche spatiale;
- h) qu'il faudra peut-être utiliser des techniques particulières de modulation et de codage des voies pour certaines liaisons, afin de ne pas dépasser les limites de puissance surfacique ou de se prémunir contre les effets dus aux trajets multiples ou aux brouillages,

recommande

1. que, compte dûment tenu de l'objet de la liaison et de la faisabilité du partage, les bandes de fréquences utilisables par les missions au voisinage de la Terre du service de recherche spatiale soient situées dans les gammes de fréquences préférées indiquées au Tableau 1;
2. que la largeur des bandes attribuées correspondant à des fréquences préférées réponde aux différents besoins de largeur de bande énumérés au Tableau 2 pour permettre d'assurer les télécommunications actuelles et futures au voisinage de la Terre avec plusieurs engins spatiaux et dans le cadre de missions multiples, au sein du service de recherche spatiale.

* Cette Recommandation doit être portée à l'attention des Commissions d'études 1, 4, 7, 8, 9, 10 et 11.

Méthode de sélection des bandes de fréquences préférées pour les émissions à destination et en provenance d'engins spatiaux habités ou non du service de recherche spatiale au voisinage de la Terre

1. Historique – Effets de propagation

La présente Annexe traite de la méthode de sélection des fréquences préférées pour les missions au voisinage de la Terre. Cette méthode repose sur les facteurs de propagation et les considérations techniques propres aux fréquences comprises entre 100 MHz et 350 GHz. La qualité de la liaison dépend, de façon cruciale des conditions de propagation qui sont elles-mêmes déterminées avant tout par les gaz atmosphériques et les précipitations. Les paramètres caractérisant ces effets sont issus des documents de la Commission d'études 5. On a calculé les valeurs types de l'affaiblissement et du bruit de ciel par ciel clair et pour des intensités de pluie de 20, 50, 100 et 140 mm/h avec des angles de site de 5° et 20°. Les effets ionosphériques sont le résultat de l'interaction entre l'onde radioélectrique émise, la densité d'électrons libres autour de la Terre (qui varie en fonction de la latitude géomagnétique, du cycle journalier, du cycle annuel et du cycle solaire, etc.) et le champ magnétique terrestre. Au-dessus de 10 GHz, les effets ionosphériques sont généralement faibles et considérés comme négligeables. En l'absence de précipitation, les effets troposphériques n'engendreront pas vraisemblablement des évanouissements profonds dans les systèmes de télécommunications spatiales fonctionnant à des fréquences inférieures à 10 GHz environ. L'affaiblissement des signaux imputable à l'absorption par l'oxygène moléculaire et la vapeur d'eau et l'absorption et la diffusion par la pluie peut avoir une influence très défavorable sur la qualité de transmission de la liaison et, par voie de conséquence, sur le choix des fréquences.

2. Considérations d'ordre technique et relatives à l'exploitation

Les considérations d'ordre technique peuvent se diviser en deux catégories: exigences relatives aux missions et facteurs liés aux équipements.

2.1 Exigences pour le soutien aux missions

2.1.1 Télécommande et télémessure de maintenance

L'exigence fondamentale de toute mission est sa sécurité et son succès. Pour satisfaire à cette exigence, la liaison de télécommande et de télémessure de maintenance doit fonctionner quelle que soit l'orientation de l'engin spatial. Ce résultat ne peut être obtenu qu'avec une antenne de satellite à large faisceau, du type équidirectif; il faut donc envisager l'utilisation d'une telle antenne lorsqu'on choisit les fréquences.

Des largeurs de bande de télécommande de 10 à 50 kHz suffisent pour la plupart des missions, mais des engins spatiaux plus perfectionnés peuvent exiger des largeurs de bande de l'ordre de 500 kHz ou davantage. Pour les liaisons de télémessure de maintenance, les largeurs de bande s'échelonnent entre plusieurs kHz et plusieurs centaines de kHz.

2.1.2 Télémessure de mission

Dans de nombreuses missions, les données de télémessure sont recueillies et mises en mémoire en vue d'une retransmission ultérieure vers la Terre. Pour certaines de ces missions, il risque de n'y avoir qu'une seule occasion de retransmettre les données enregistrées; ces missions doivent donc être opérationnelles quelles que soient les conditions météorologiques. Dans le cas des missions qui ne sont pas soumises à ces contraintes, on peut choisir une fréquence propre à maximiser le débit des données par atmosphère claire.

Les largeurs de bande des liaisons dépendent du degré de complexité de l'engin spatial. Pour les liaisons directes engin spatial vers station terrienne, on peut prévoir des largeurs de bande de 100 kHz à 100 MHz. Pour les satellites relais, les largeurs de bande des liaisons espace-Terre sont comprises actuellement entre 225 MHz et 650 MHz; on prévoit cependant qu'elles devront passer à des valeurs supérieures à 1 GHz pour répondre aux besoins futurs.

* *Note du Directeur du CCIR – Cette Annexe est une version abrégée du Rapport 984 (Düsseldorf, 1990).*

A l'heure actuelle, les largeurs de bande des liaisons espace-espace sont comprises entre 5 et 225 MHz pour les communications d'un satellite utilisateur direct vers un satellite relais. Elles seront beaucoup plus grandes, supérieures par exemple à 1 GHz, pour les communications intersatellites relais.

2.1.3 Poursuite

Le service de recherche spatiale au voisinage de la Terre fait intervenir plusieurs méthodes pour obtenir des informations sur l'orbite des engins spatiaux. Dans les opérations de poursuite du type interférométrique, la prise en compte d'un certain nombre de facteurs (antenne équidirective de bonne qualité sur le satellite, rendement de l'émetteur et ouverture du faisceau d'antenne de la station terrienne) conduit généralement à accorder la préférence à une fréquence inférieure à 1 GHz. Pour les fréquences supérieures à 5 GHz, on a construit des interféromètres plus complexes à antennes mobiles, mais leur application est généralement limitée aux fréquences supérieures à 6 GHz, en raison de l'affaiblissement atmosphérique et du bruit. Les valeurs types de la largeur de bande sont comprises entre plusieurs centaines de Hz et plusieurs kHz.

Les systèmes appliquant la mesure des distances et la mesure de la vitesse de variation des distances doivent subir un minimum de perturbations par les effets ionosphériques et transatmosphériques; ces systèmes fonctionnent dans la gamme de fréquences de 1 à 8 GHz pour la poursuite de précision. Le facteur le plus important dont dépend la largeur de bande maximale nécessaire par voie unidirectionnelle est la valeur requise du pouvoir de résolution en distance. On peut obtenir des pouvoirs de résolution de quelques mètres en appliquant une modulation appropriée avec des largeurs de bande de l'ordre de 1 à 3 MHz.

On a aussi recours à la poursuite par radar; à signaler cependant que l'affaiblissement atmosphérique a généralement pour effet de limiter l'utilisation des fréquences à des valeurs supérieures à 6 GHz environ pour la poursuite par radar primaire. Pour beaucoup de ces systèmes, on peut, en général, se contenter d'une largeur de bande comprise entre 1 et 10 MHz.

On utilise la mesure de distance par bilatération pour obtenir des renseignements précis sur la position d'un satellite relais, afin de pouvoir tenir compte de son mouvement quand on déterminera les paramètres orbitaux du satellite utilisateur. Les liaisons types doivent fonctionner quelles que soient les conditions météorologiques et avoir des largeurs de bande de l'ordre de 5 à 6 MHz.

2.2. Facteurs liés aux équipements

Ces facteurs, qui ont une influence sur la qualité de fonctionnement des liaisons et dont les caractéristiques dépendent jusqu'à un certain point de la fréquence, sont la puissance d'émission, le gain d'antenne (pour une antenne de diamètre déterminé) et la température de bruit des récepteurs. Le gain d'antenne est une fonction du carré de la fréquence, tandis que la puissance d'émission et le bruit du récepteur n'ont qu'une relation indirecte avec la fréquence de fonctionnement. On considère, par conséquent, que leur comportement est uniforme dans une large gamme de fréquences.

Il faut aussi prendre en considération l'existence d'équipements et de systèmes spatiaux existants et éprouvés lorsqu'on fait le choix de bandes de fréquences, afin d'assurer la stabilité de l'exploitation.

En raison des limitations imposées dans la pratique aux diplexeurs, les paires de bandes de fréquences Terre-espace et espace-Terre devraient présenter une séparation d'au moins 7% pour permettre l'émission et la réception simultanées sur une même antenne.

3. Qualité de fonctionnement des liaisons

Dans la présente Annexe, on a considéré l'influence de la propagation sur l'intensité du signal et le bruit du système, dans une équation de base de la liaison; on a aussi établi, comme critère de sélection des fréquences, un indice de qualité de fonctionnement d'une liaison, défini comme le rapport de la puissance du signal reçu à la densité spectrale du bruit (P_r / N_0).

Les analyses de liaison qui suivent sont faites sur la base d'une antenne de station terrienne de diamètre fixe et concernent une antenne de station spatiale de diamètre fixe ou à ouverture de faisceau fixe. Par ailleurs, on a considéré une antenne de station spatiale de diamètre fixe pour tenir compte des cas où l'on utilise une grande antenne sur l'engin spatial, sans restrictions de pointage. Quant à l'antenne à ouverture de faisceau fixe, elle a été considérée pour tenir compte des situations dans lesquelles la précision de pointage détermine l'ouverture de faisceau minimale, ou dans lesquelles une antenne doit assurer une vaste couverture pour permettre des communications quelle que soit l'orientation de l'engin spatial: c'est le cas, par exemple, d'une liaison de télémessure ou de télécommande de secours.

Dans les analyses, on considère les effets des précipitations seulement pour les fréquences inférieures à environ 22 GHz. Les effets de précipitations au-dessus de 22 GHz ne sont pas pris en considération car, même avec de faibles intensités de pluie, ils peuvent fortement dégrader les communications sur les liaisons transatmosphériques. C'est la raison pour laquelle, on se fonde, par hypothèse, sur la seule utilisation par atmosphère claire au-dessus de 22 GHz. Les résultats s'appliquent à un angle de site de 5° qui correspond au «cas le plus défavorable».

On obtient le débit de données maximal en utilisant les bandes de fréquences dans lesquelles P_r/N_0 est maximal compte tenu des conditions météorologiques et des limitations propres aux antennes des stations spatiales. Les bandes de fréquences préférées sont indiquées sous forme concise dans le Tableau 1. Elles sont déduites des courbes normalisées P_r/N_0 données dans la présente Recommandation. On a déterminé la largeur générale des bandes en notant les fréquences qui correspondent à des niveaux situés à 1 dB en dessous environ des crêtes des courbes. On a pris pour hypothèse une forte intensité de pluie pour déterminer la largeur des bandes de fréquences «tout temps» indiquées dans le Tableau 1 afin que les résultats puissent s'appliquer dans le monde entier. Les bandes extérieures à cette gamme de fréquences pourraient convenir dans des zones où les intensités de pluie sont plus faibles.

3.1 Calcul de la qualité de la liaison en fonction de la fréquence

L'indice de qualité de fonctionnement de la liaison, à savoir le rapport de la puissance spectrale du signal reçu à la densité de bruit, est donné par l'équation fondamentale:

$$\text{Error!} \quad \text{dB} \quad (1)$$

où:

P_r : puissance reçue (W)

N_0 : densité spectrale de bruit (W/Hz)

P_t : puissance d'émission (W)

G_t : gain de l'antenne d'émission

L_s : affaiblissement en espace libre

L_a : affaiblissement de transmission dû à l'atténuation atmosphérique par temps clair

L_r : affaiblissement de transmission dû à l'atténuation par la pluie

G_r : gain de l'antenne de réception (dBi)

k : constante de Boltzmann (J/K)

T : température de bruit totale du système (K).

Si l'on admet qu'il n'y a aucune perte du guide d'ondes, T est donné par:

$$T = T_r + T_s + T_g$$

où:

T_r : température de bruit du récepteur (K)

T_s : contribution du ciel (effets atmosphériques et effets des précipitations) à la température de bruit de l'antenne (K)

T_g : contribution du sol à la température de bruit de l'antenne (K).

En isolant dans l'équation (1) les termes fonction de la fréquence, pour une distance donnée entre la station spatiale et la station terrienne, on peut écrire cette équation comme suit:

Cas N° 1: Diamètres fixes des antennes de la station terrienne et de la station spatiale:

$$\text{Error!} \quad \text{dB} \quad (2)$$

Cas N° 2: Diamètre fixe pour l'antenne de la station terrienne. Ouverture de faisceau fixe pour l'antenne de la station spatiale:

$$\text{Error!} \quad \text{dB} \quad (3)$$

Dans les équations (2) et (3), C et C_1 sont des constantes exprimées en dB et les termes entre les accolades sont les termes fonction de la fréquence. Une variation des constantes aura seulement pour effet de translater les courbes P_r/N_0 vers le haut ou vers le bas, sans modifier l'allure générale de ces courbes.

3.2 Application aux missions de la recherche spatiale au voisinage de la Terre

Les températures de bruit du système et du récepteur prises par hypothèse pour les stations spatiales et terriennes sont indiquées dans les Fig. 1 et 2 respectivement. Les températures de bruit sont représentées comme une fonction en escalier compte tenu de l'hypothèse faite que la température de bruit du récepteur ne variera pas de façon significative à la fréquence où il est utilisé et restera relativement constante sur la gamme de fréquences de fonctionnement nominale.

FIGURE 1
Température de bruit du système à satellites (hypothèse)

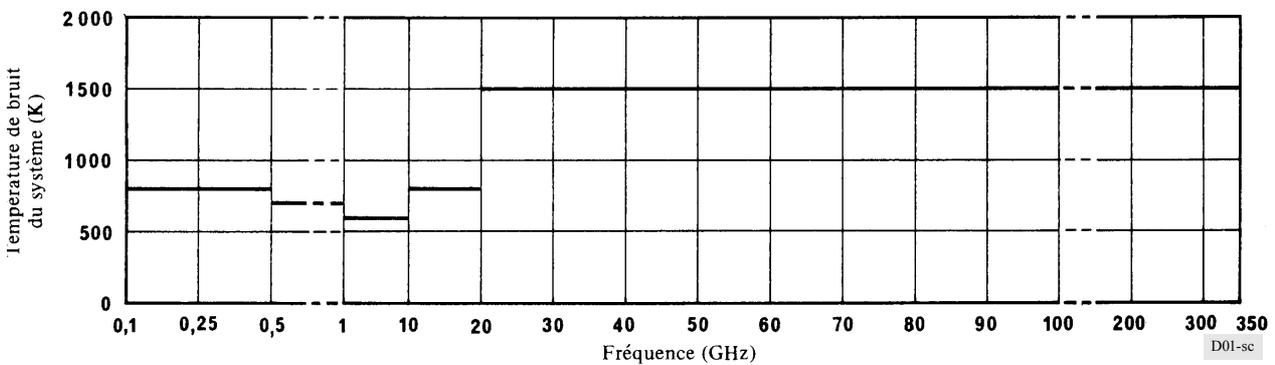
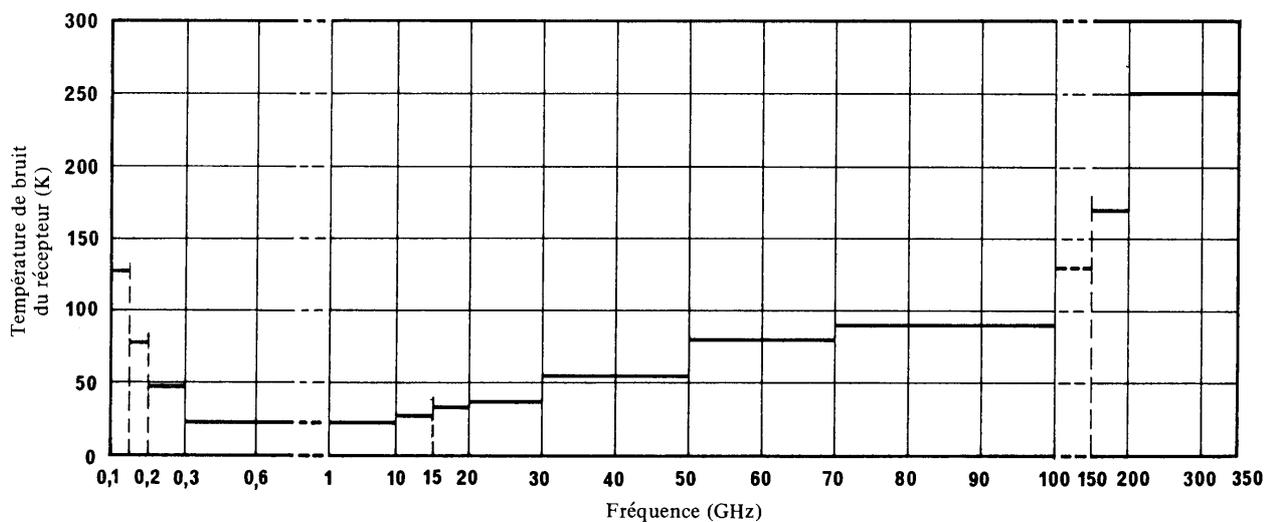


FIGURE 2
Température de bruit du récepteur de la station terrienne (hypothèse)

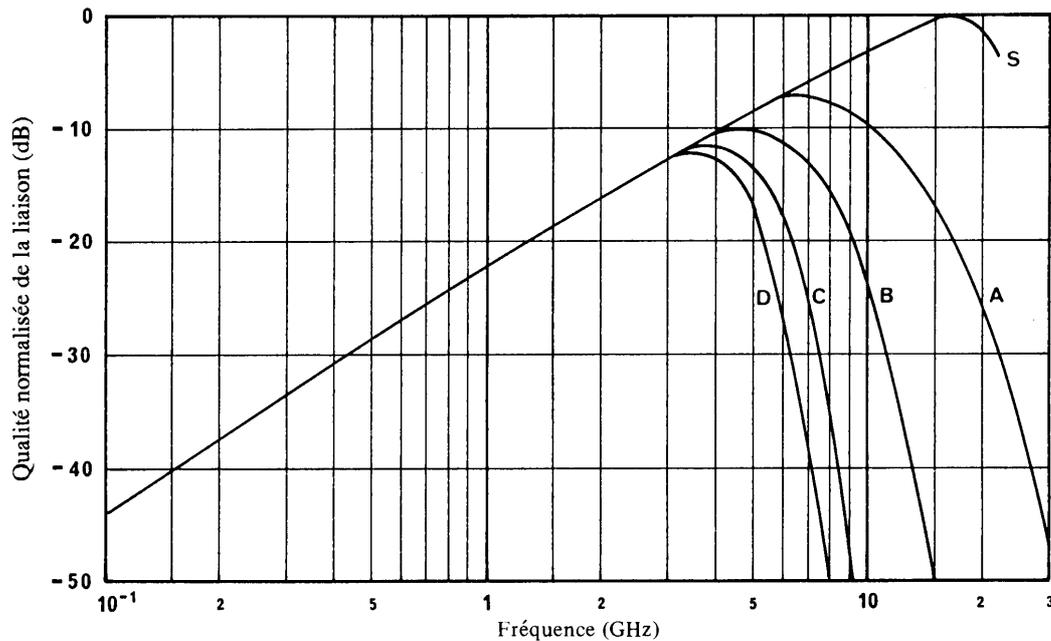


Note 1 – Les valeurs apparaissant dans les Fig. 1 et 2 sont tirées d'un certain nombre de documents techniques. Elles sont caractéristiques d'équipements en service exploités dans des bandes inférieures à 20 GHz environ et sont une extrapolation des résultats obtenus dans les bandes supérieures à 20 GHz.

A partir des éléments ci-dessus, des données de la Commission d'études 5 sur la propagation et des équations du § 3.1, on a calculé un ensemble de valeurs normalisées de la qualité de la liaison pour une propagation dans les deux sens à travers l'atmosphère et en tenant compte des deux cas de restrictions appliquées aux antennes. Les courbes de ces valeurs normalisées sont représentées aux Fig. 3 à 6 pour les fréquences comprises entre 0,1 et 22 GHz et aux Fig. 7 à 10 pour les fréquences comprises entre 22 et 350 GHz.

FIGURE 3

Qualité normalisée de la liaison Terre-espace. Le diamètre d'antenne de la station spatiale est fixe



Courbes A: intensité de pluie = 20 mm/h
 B: intensité de pluie = 50 mm/h
 C: intensité de pluie = 100 mm/h
 D: intensité de pluie = 140 mm/h
 S: atmosphère claire

D03-sc

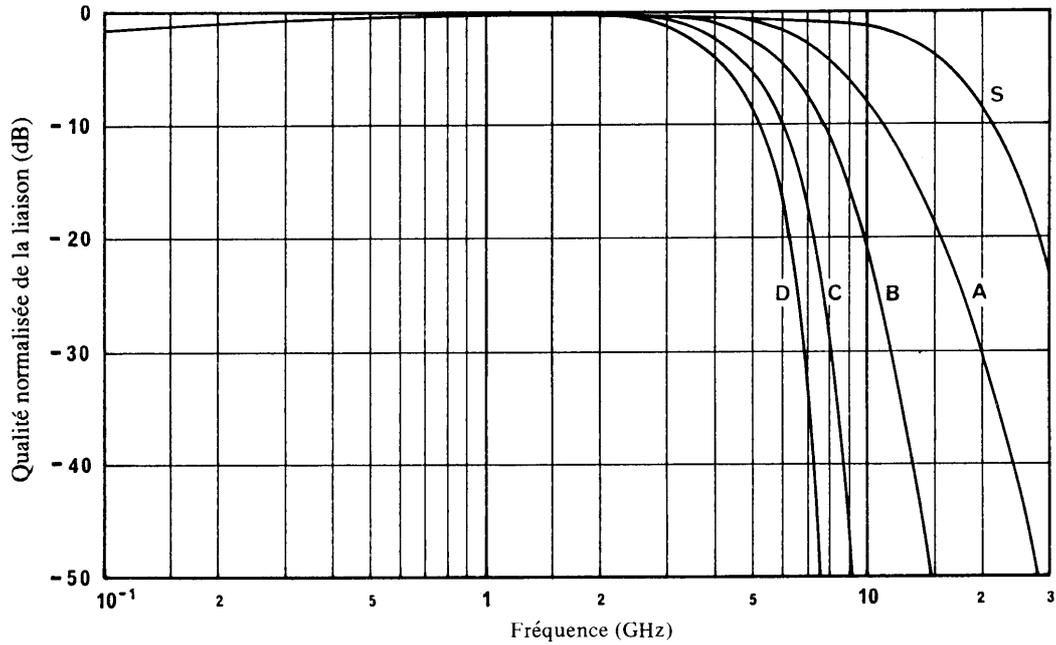
4. Discussion et conclusions

Chacune des Fig. 3 à 6 illustre un ensemble de courbes paramétriques pour des intensités de pluie de 20, 50, 100 et 140 mm/h et par ciel clair. Il ressort de ces figures que la pluie a une forte influence sur la gamme optimale des fréquences qu'elle contracte et décale vers les fréquences basses pour de fortes intensités de pluie. Pour les pays situés dans des régions caractérisées par de fortes intensités de pluie, le choix des fréquences appropriées est crucial s'ils veulent conserver une bonne qualité en dépit des conditions météorologiques défavorables. Pour les fréquences comprises entre 22 et 250 GHz, les Fig. 7 à 10 donnent une série de courbes normalisées de qualité de fonctionnement de la liaison par ciel clair uniquement.

Les caractéristiques importantes des courbes de qualité de fonctionnement de la liaison sont les lieux des maxima et l'influence du temps sur la gamme optimale des fréquences. On a déterminé la gamme optimale des fréquences en notant de part et d'autre d'un maximum de la courbe, les fréquences qui correspondent à une valeur de qualité de fonctionnement de la liaison de 1 dB environ inférieure à la valeur maximale. En effet, on a considéré que la valeur de 1 dB permettait de représenter valablement une portion relativement plate de la courbe autour de son maximum.

FIGURE 4

Qualité normalisée de la liaison Terre-espace. L'ouverture de faisceau de l'antenne de la station spatiale est fixe

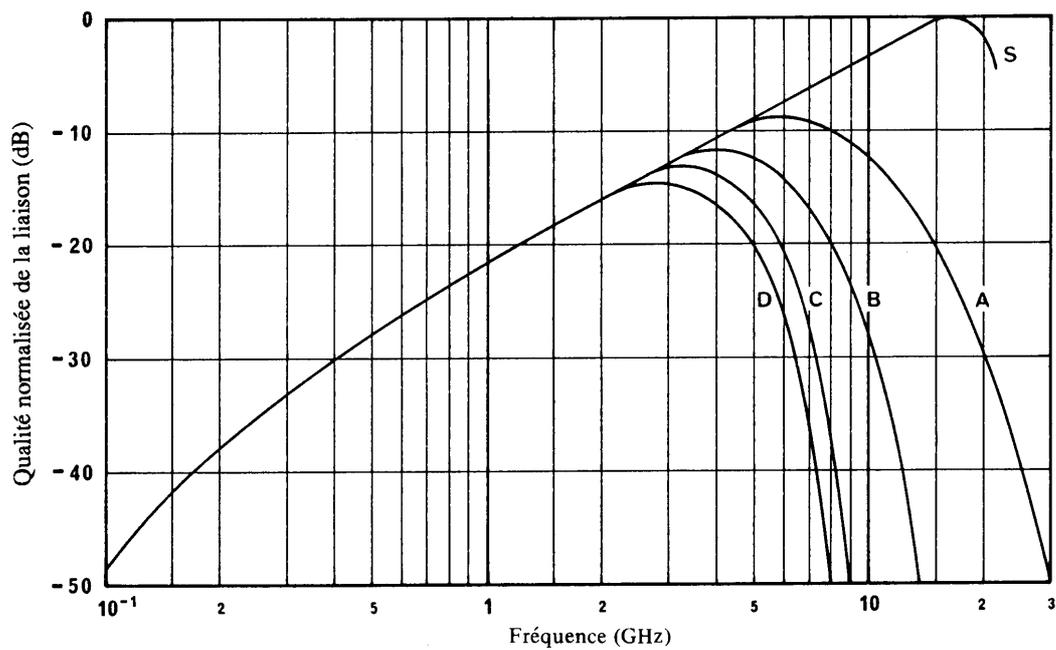


Courbes A: intensité de pluie = 20 mm/h
 B: intensité de pluie = 50 mm/h
 C: intensité de pluie = 100 mm/h
 D: intensité de pluie = 140 mm/h
 S: atmosphère claire

D04-sc

FIGURE 5

Qualité normalisée de la liaison espace-Terre. Le diamètre d'antenne de la station spatiale est fixe

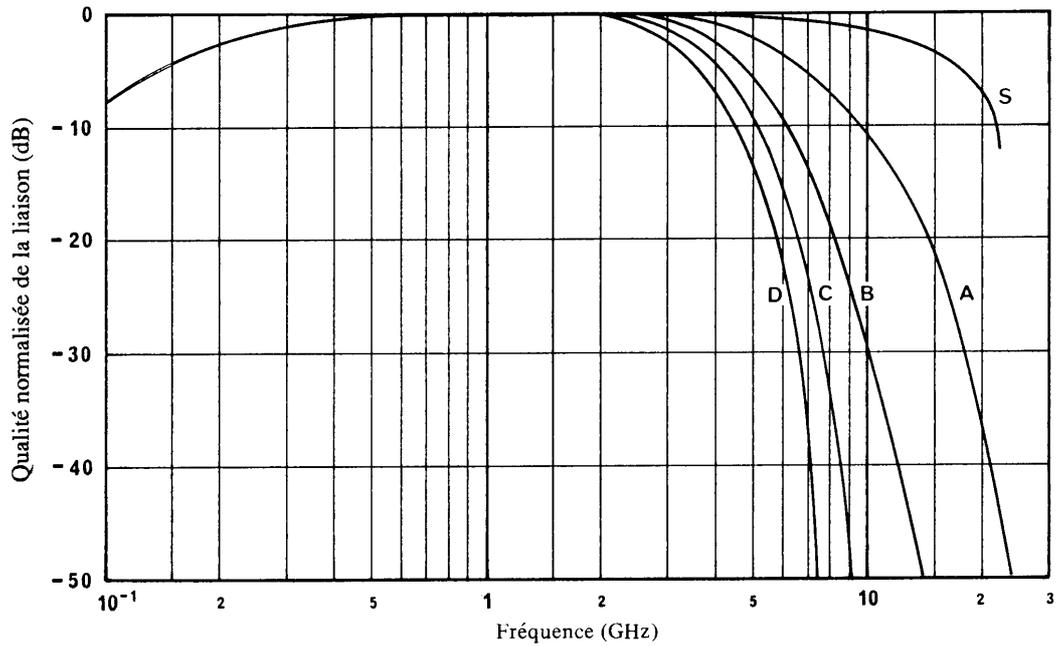


Courbes A: intensité de pluie = 20 mm/h
 B: intensité de pluie = 50 mm/h
 C: intensité de pluie = 100 mm/h
 D: intensité de pluie = 140 mm/h
 S: atmosphère claire

D05-sc

FIGURE 6

Qualité normalisée de la liaison espace-Terre. L'ouverture de faisceau de l'antenne de la station spatiale est fixe

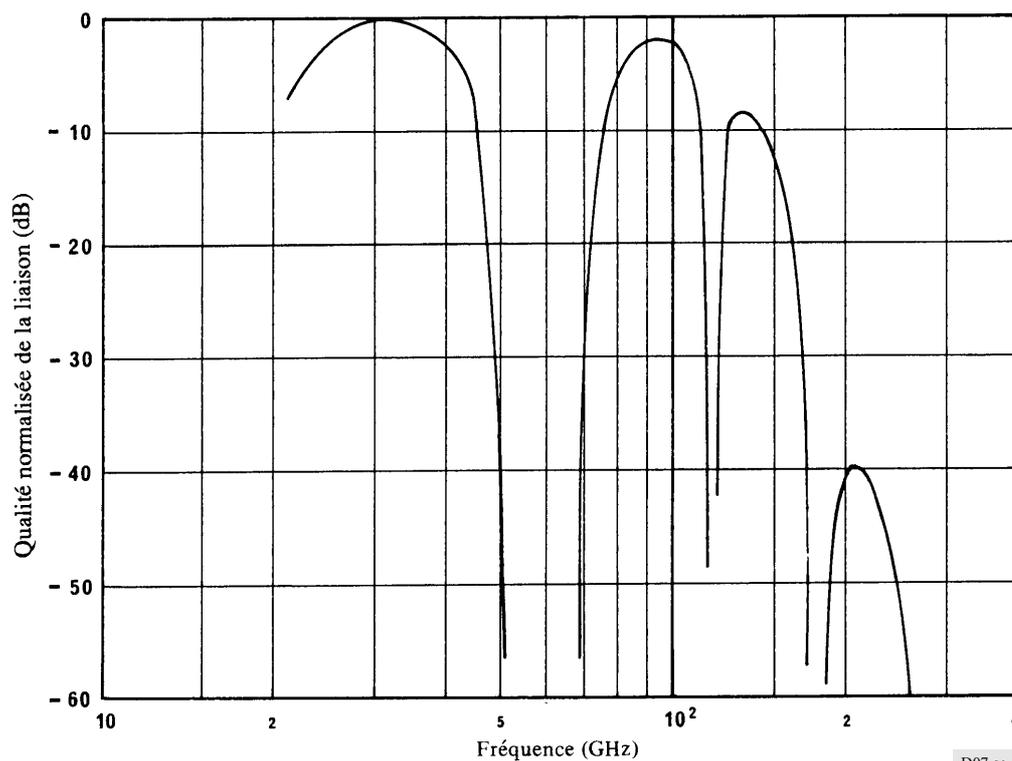


Courbes A: intensité de pluie = 20 mm/h
 B: intensité de pluie = 50 mm/h
 C: intensité de pluie = 100 mm/h
 D: intensité de pluie = 140 mm/h
 S: atmosphère claire

D06-sc

FIGURE 7

Qualité normalisée de la liaison Terre-espace. Le diamètre d'antenne de la station spatiale est fixe



D07-sc

FIGURE 8

Qualité normalisée de la liaison Terre-espace. L'ouverture de faisceau de l'antenne de la station spatiale est fixe

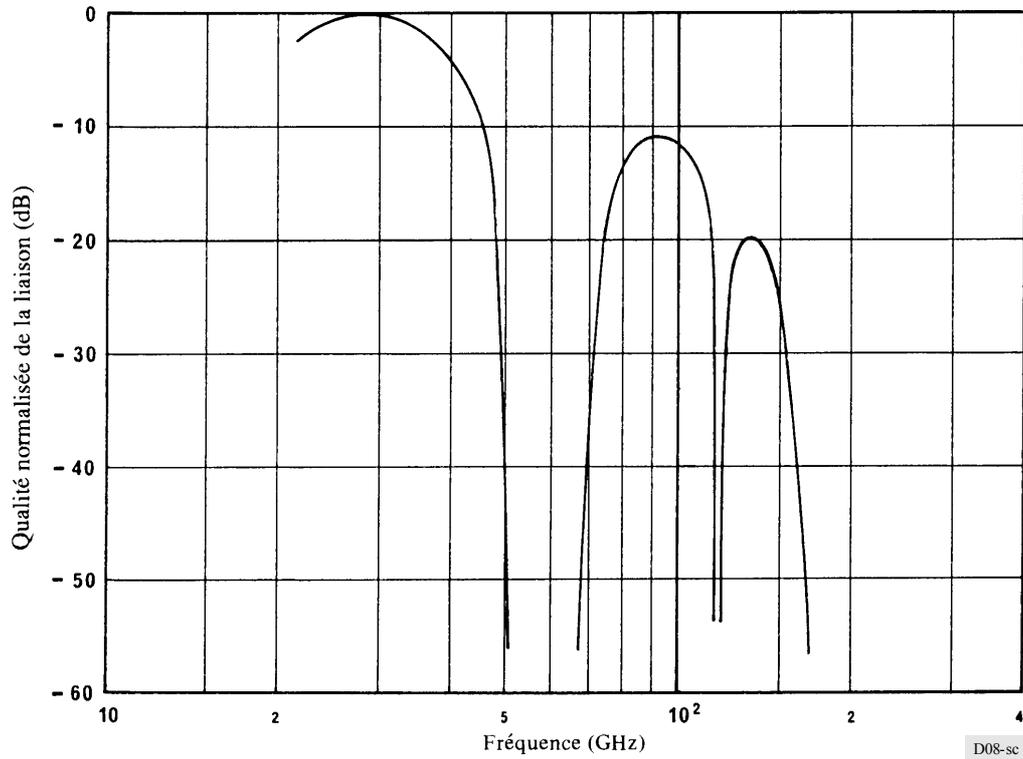


FIGURE 9

Qualité normalisée de la liaison espace-Terre. Le diamètre d'antenne de la station spatiale est fixe

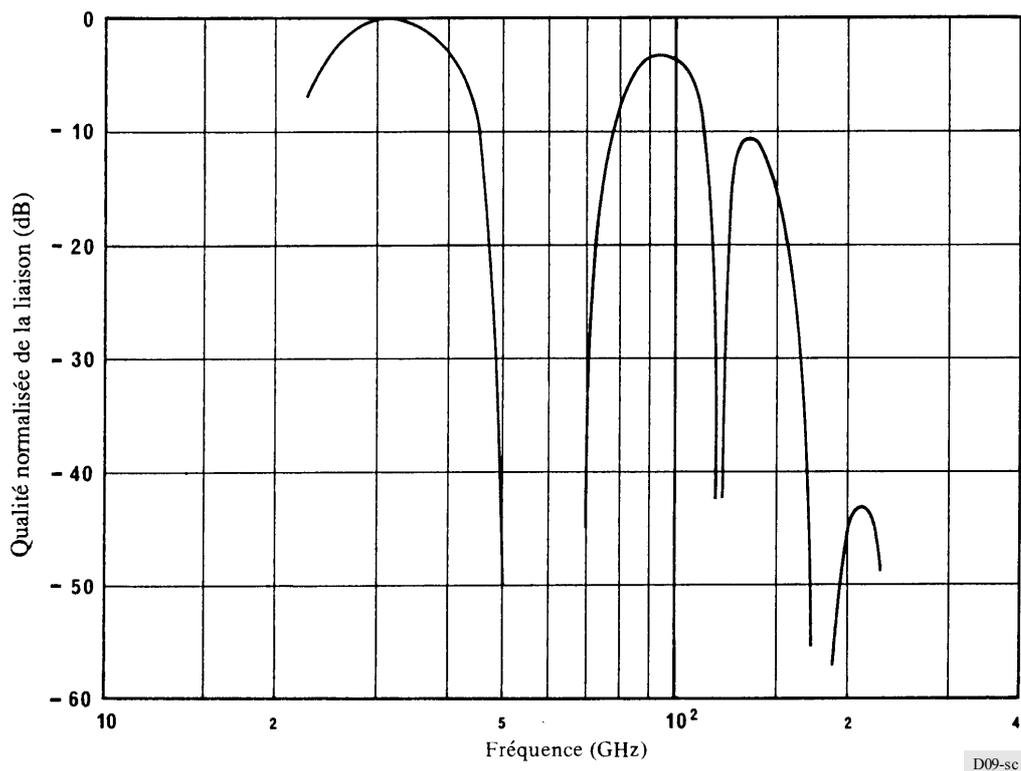
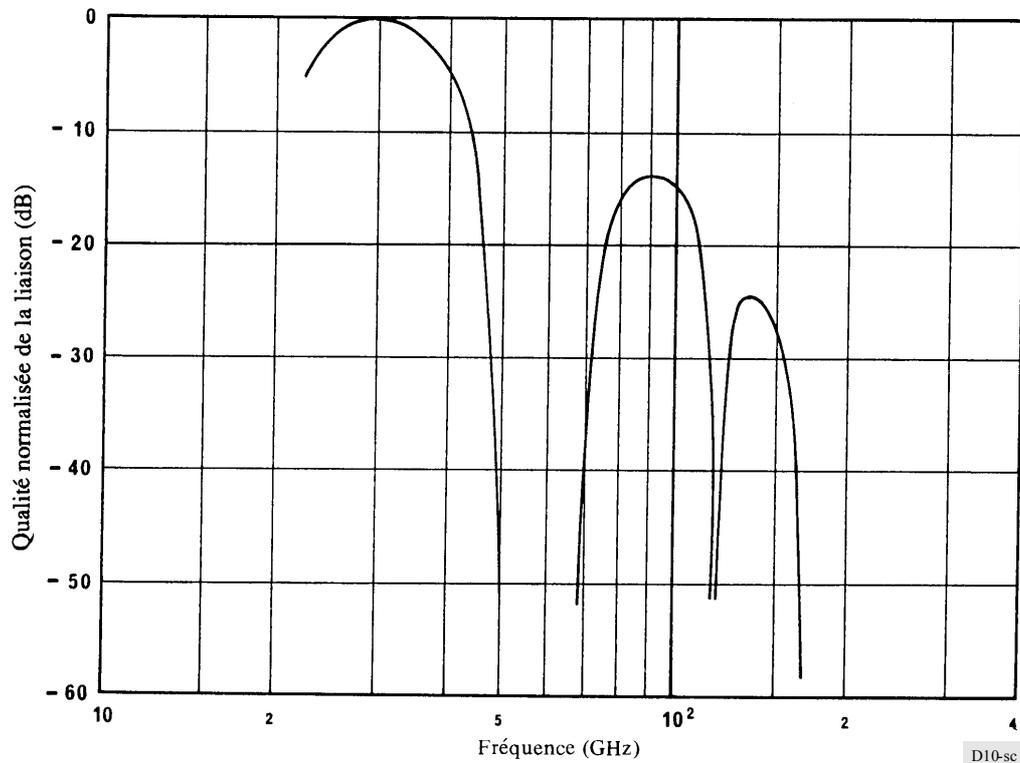


FIGURE 10

Qualité normalisée de la liaison espace-Terre. L'ouverture de faisceau de l'antenne de la station spatiale est fixe



On obtient un débit de données maximal en utilisant les bandes de fréquences dans lesquelles P_r/N_0 est maximal, compte tenu des conditions météorologiques et des limitations applicables aux antennes des stations spatiales. Le Tableau 1 résume les bandes de fréquences préférées pour diverses applications. On a pris pour hypothèse une intensité de pluie élevée pour déterminer la largeur des bandes de fréquences «tout temps» afin que les résultats soient applicables dans le monde entier. Les bandes extérieures à la gamme ainsi définie pourraient convenir dans des zones où les intensités de pluie sont plus faibles.

Les bandes de fréquences optimales pour les liaisons espace-espace sont les bandes affectées par un grand affaiblissement atmosphérique, car on n'a alors aucun problème de brouillages mutuels avec les installations des services de Terre. Ces gammes de fréquences, qui se trouvent dans les creux qui séparent les maxima successifs représentés dans les Fig. 7 à 10, sont situées de part et d'autre des crêtes d'absorption de l'oxygène et de la vapeur d'eau.

Au-dessus d'environ 150 GHz, les communications transatmosphériques sont affectées par un degré élevé d'affaiblissement du signal lorsque l'angle de site est réduit. Toutefois, la gamme des fréquences supérieures à 150 GHz peut être envisagée pour des liaisons transatmosphériques lorsque l'angle de site est suffisamment important.

Les largeurs de bande énumérées dans le Tableau 1 visent à identifier les gammes de fréquences préférées d'un point de vue technique. La présence d'une bande dans ce Tableau ne signifie pas forcément qu'on disposera d'une marge ou d'une largeur de bande suffisante pour la liaison. De même, l'absence d'autres fréquences dans le Tableau n'exclut pas obligatoirement des opérations dans les bandes correspondantes, si des considérations de partage des fréquences et les limitations imposées aux équipements actuels imposent l'utilisation de ces bandes.

Les largeurs de bande de liaisons particulières types énumérées dans le Tableau 2 visent à refléter les largeurs de bande de liaisons utilisables dans l'état actuel de la technique. La présence d'une largeur de bande de liaison dans le Tableau n'indique pas forcément la bande de fréquences dans laquelle la liaison particulière doit être effectuée; elle ne doit pas limiter non plus le nombre des liaisons pouvant être nécessaires pour assurer le fonctionnement d'un engin spatial particulier ou d'un système de mission quelconque.

TABLEAU 1

Bandes de fréquences préférées et utilisation de ces bandes

Fréquence (GHz)	Sens de transmission	Remarques
0,3-2,5 0,1-3,0	E-T T-E	Liaison «tout temps», optimale également quand des communications doivent être établies quelle que soit l'orientation de l'engin spatial.
0,3-10 0,1-10	E-T T-E	Liaison à utiliser par atmosphère claire optimale dans les cas où l'engin spatial doit être équipé d'une antenne à ouverture de faisceau large ou fixe.
2-4 2-5	E-T T-E	Liaison «tout temps», utilisable avec des antennes directives.
2-3 13,5-23	E-E E-E	Bandes nécessaires pour assurer des communications espace-espace avec les équipements et les techniques spatiaux existants et éprouvés. Nécessaires également pour assurer la continuité du service jusqu'à ce que d'autres bandes se révèlent pratiquement et techniquement utiles.
12-20 14-20 28-35 27-32 85-100 127-137	E-T T-E T-E E-T T-E et E-T T-E et E-T	Liaison utilisable par atmosphère claire, optimale pour les engins spatiaux équipés d'une antenne à gain élevé ou moyen
54-70 117-120 178-188 318-328	E-E E-E E-E E-E	Bandes assurant une protection maximale des liaisons espace-espace, par atmosphère claire, contre le brouillage des systèmes de Terre, optimales pour des antennes d'engin spatial à gain élevé ou moyen.

TABLEAU 2

Largeurs de bande de liaisons particulières types et leurs utilisations

Utilisation	Sens de transmission	Largeur de bande type	Remarques
Télécommande	T-E	10-500 kHz	
Télémesure de maintenance	E-T	5-500 kHz	
Télémesure	E-T (direct)	100 kHz-100 MHz	Satellite direct vers Terre
Télémesure	E-T (relais)	225-650 MHz	Satellite relais vers la station terrienne: données venant d'un ou plusieurs satellites utilisateurs
Télémesure	E-E	5-225 MHz	Satellite utilisateur vers satellite relais
Télémesure	E-E	> 1 GHz	Satellite relais vers satellite relais
Poursuite	E-T	500 Hz-500 kHz	Interférométrie
Poursuite	T-E	1-3 MHz	Systèmes de mesure de distance et de vitesse radiale
Poursuite	T-E	1-10 MHz	Radar
Poursuite	T-E	5-6 MHz	Mesure de distance par bilatération