

RECOMMANDATION UIT-R SA.1012*

Bandes de fréquences préférées pour la recherche dans l'espace lointain dans la gamme 1-40 GHz

(Question UIT-R 133/7)

(1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les fréquences les plus adaptées aux télécommunications entre la Terre et les engins spatiaux en espace lointain sont en partie déterminées par des phénomènes de propagation atmosphérique et de propagation interplanétaire;
- b) que les techniques utilisées ont également une influence sur le choix des fréquences préférées;
- c) que les exigences de fiabilité des télécommunications doivent toujours être satisfaites en présence d'effets atmosphériques préjudiciables;
- d) que la même fréquence peut être utilisée pour des engins spatiaux situés à différentes coordonnées célestes, mais que différents engins spatiaux situés à proximité des mêmes coordonnées et dans l'ouverture du faisceau d'antenne d'une même station terrienne nécessiteront habituellement des fréquences différentes;
- e) qu'il est pratique et souhaitable d'assurer des fonctions de télémessure et de poursuite sur la même liaison espace-Terre et des fonctions de télécommande et de poursuite sur la même liaison Terre-espace;
- f) qu'il faut, pour la poursuite de précision par effet Doppler, une paire cohérente de fréquences de liaison Terre-espace et espace-Terre;
- g) qu'il faut, pour étalonner plus exactement les effets des particules chargées sur la vitesse de propagation, utiliser simultanément des liaisons à des fréquences cohérentes dans deux ou plusieurs bandes nettement séparées;
- h) que les liaisons téléphoniques et vidéo associées aux engins spatiaux habités en espace lointain pourraient utiliser les bandes de fréquences attribuées aux fonctions de télémessure, de télécommande et de poursuite;
- j) que des bandes de fréquences préférées ont été définies (voir l'Annexe 1);
- k) que la faisabilité des attributions de bandes à la recherche dans l'espace lointain dépend, entre autres conditions, du partage avec d'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 qu'entre 1 et 40 GHz, les bandes attribuées à la recherche dans l'espace lointain soient choisies parmi les bandes de fréquences préférées qui sont indiquées dans le Tableau 3;
- 2 qu'il soit tenu compte du contenu du § 6 de l'Annexe 1 et des prescriptions relatives à la largeur de bande contenues dans la Recommandation UIT-R SA.1015;
- 3 que l'on envisage la faisabilité d'un partage avec d'autres services (voir la Recommandation UIT-R SA.1016).

Annexe 1**Sélection dans la gamme 1-40 GHz de bandes de fréquences préférées pour la recherche dans l'espace lointain****1 Introduction**

La performance de la liaison de télécommunication, les caractéristiques de l'équipement et les besoins de la mission déterminent les bandes de fréquences qui sont préférées pour la recherche dans l'espace lointain. La présente Annexe présente une analyse destinée à la sélection de bandes de fréquences préférées. On trouvera dans la Recommandation UIT-R SA.1014 des informations sur les conditions générales d'une mission et sur les caractéristiques des équipements; on trouvera dans la Recommandation UIT-R SA.1015 des informations sur les largeurs de bande requises.

L'identification de bandes de fréquences préférées a pour but de servir de base technique pour les attributions de bandes, à partir desquelles le concepteur pourra choisir les fréquences de fonctionnement répondant le mieux aux besoins de chaque mission.

2 Critères pour la sélection des bandes de fréquences préférées

Pour chaque fonction de télécommunication, à savoir la télémessure de maintenance et scientifique, la télécommande, la poursuite et la science radioélectrique, il existe une ou plusieurs bandes de fréquences permettant d'obtenir les meilleurs résultats possibles. Ceux-ci peuvent être exprimés sous forme de taux d'erreur le plus faible, d'exactitude de mesure la plus élevée, de débit de données maximal, de fiabilité optimale de la liaison ou d'une combinaison de ces paramètres. La meilleure qualité de fonctionnement possible à un moment donné avec un système particulier dépend des caractéristiques de propagation des ondes radioélectriques.

Un indice approprié de qualité optimale est le rapport de la puissance du signal reçu à la densité spectrale de puissance du bruit, P_r/N_0 . La bande de fréquences qui assure le rapport P_r/N_0 le plus élevé pour un système et pour des conditions de propagation donnés est considérée comme étant la bande de fréquences préférée.

Pour la présente Annexe, l'analyse de la variation du rapport P_r/N_0 en fonction de la fréquence est conforme à la Recommandation UIT-R SA.1017. Les données qui en résultent permettront d'identifier les gammes de fréquences offrant la meilleure qualité de liaison dans les conditions choisies.

3 Caractéristiques d'équipement relatives à l'analyse de la qualité de la liaison

3.1 Considérations relatives aux antennes

Les stations terriennes utilisées pour la recherche dans l'espace lointain utilisent généralement de grandes antennes paraboliques orientables, qui sont très onéreuses et construites en petit nombre. Le concepteur d'une mission n'est généralement pas libre d'envisager, lorsqu'il choisit des fréquences, divers diamètres d'antenne de station terrienne. C'est pourquoi cette analyse part du principe que l'antenne de la station terrienne a un diamètre fixe. Le gain et l'ouverture de faisceau de cette antenne varieront selon la fréquence.

Pour les stations spatiales, le concepteur peut envisager un grand choix de types et de tailles d'antenne. L'analyse tient compte de cette possibilité en considérant deux cas: une antenne parabolique à réflecteur de diamètre fixe et dont l'ouverture et le gain sont fonction de la fréquence, et une antenne dont la largeur de faisceau (ou le gain) ne varie pas avec la fréquence.

Le cas du diamètre fixe peut être considéré dans la gamme de fréquences à étudier si le diamètre est assez faible (et que le faisceau à la fréquence la plus élevée est assez ouvert) pour que la précision de pointage de l'antenne n'impose pas de contrainte à l'ouverture minimale du faisceau.

Le cas de l'ouverture de faisceau fixe (gain fixe) se présente lorsque la précision de pointage de l'antenne détermine l'ouverture de faisceau minimale, ou lorsque l'antenne doit assurer une très vaste couverture afin de permettre la communication quelle que soit l'orientation de la station spatiale. Un exemple de ce cas d'ouverture de faisceau fixe est une antenne équidirective.

L'analyse de liaison effectuée dans la présente Annexe part de l'hypothèse qu'une antenne de diamètre fixe pour station spatiale a un rendement de 60% et un gain qui croît en proportion directe du carré de la fréquence. Dans le cas de l'ouverture (gain) fixe du faisceau, on admet que le gain a une valeur de 0 dBi et est indépendant de la fréquence.

La valeur de gain d'antenne de station terrienne utilisée dans cette analyse est extraite de la Recommandation UIT-R SA.1014.

3.2 Puissance d'émission

En ce qui concerne les émetteurs des stations spatiales, la puissance de sortie RF dépend de l'importance de la puissance primaire qui peut être fournie par l'engin spatial; elle est également limitée par l'efficacité de l'émetteur. Dans le cas des stations terriennes, ces limites sont beaucoup moins importantes.

Dans l'analyse des performances qui fait l'objet de cette Annexe, on considère que la puissance d'émission est indépendante de la fréquence.

3.3 Température de bruit des équipements de réception

La température de bruit du système de réception d'une station spatiale est régie par le préamplificateur d'entrée et par le filtre de présélection qui y est associé. Les pertes dans les lignes d'alimentation des antennes introduisent un bruit relativement faible. La température de bruit de station spatiale utilisée dans la présente Annexe est représentative des valeurs obtenues actuellement avec des composants à semi-conducteurs, non refroidis.

Dans les stations terriennes, on n'est pas limité rigoureusement par des considérations de dimensions, de poids ou de complexité: il faut utiliser le récepteur le plus sensible. On utilise couramment des préamplificateurs de type MASER à refroidissement cryogénique. L'analyse de liaison présentée dans cette Annexe part du principe que les températures de bruit des stations terriennes sont conformes aux valeurs indiquées dans la Recommandation UIT-R SA.1014.

4 Considérations relatives à la propagation

L'analyse de la qualité des liaisons nécessite la formulation d'hypothèses relatives aux conditions de propagation. L'une des plus critiques est le taux de précipitation et l'affaiblissement qui en résulte. Dans le cas des systèmes de réception à faible bruit couramment utilisés pour la recherche dans l'espace lointain, surtout les récepteurs des stations terriennes, une augmentation même faible de l'affaiblissement dû à la pluie se traduit par une réduction significative du rapport P_r/N_0 . Cela parce que l'augmentation du bruit du ciel dépasse de plusieurs ordres de grandeur la température de bruit du récepteur et, par conséquent, prédomine dans la température de bruit globale du système.

L'analyse de cette Annexe part de l'hypothèse d'un taux de précipitation de 10 mm/h (quantité dépassée 0,1% du temps sur une station terrienne proche de Madrid).

Bien que ce taux n'entraîne qu'un affaiblissement de 1 dB par rapport au cas d'une atmosphère claire à une fréquence de 8,4 GHz et à un angle d'élévation de 30°, il s'ensuit une dégradation de 5,8 dB du rapport P_r/N_0 dans le sens espace-Terre. En raison de la sensibilité de l'indice de qualité du système (exprimé par le rapport P_r/N_0) aux petites variations d'affaiblissement sur le trajet de propagation, les courbes de qualité (performances) indiquées ci-après sont fortement influencées par le taux de précipitation supposé.

5 Résultats de l'analyse de qualité de transmission

La variation du rapport P_r/N_0 (voir les Fig. 1 à 4) a été déterminée par la méthode de la Recommandation UIT-R SA.1017 pour l'ensemble suivant de caractéristiques d'équipement et de conditions d'exploitation, pris comme hypothèse:

Distance de communication:	8×10^8 km
Diamètre de l'antenne de station terrienne:	70 m
Puissance d'émission de station terrienne:	100 kW
Diamètre de l'antenne de station spatiale:	3,7 m
Puissance d'émission de station spatiale:	25 W

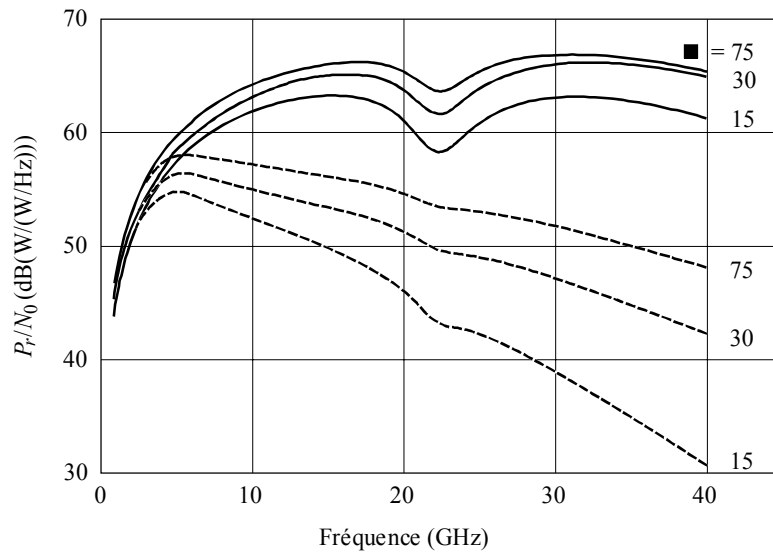
Les caractéristiques importantes des courbes de qualité sont l'emplacement des maxima et les effets de la variation d'angle d'élévation et des conditions météorologiques. Les valeurs absolues du rapport P_r/N_0 dépendent des paramètres de liaison pris comme point de départ. Différentes hypothèses concernant la distance de communication, les caractéristiques d'antenne et la puissance d'émission se traduiront par des valeurs absolues différentes mais sans changement de l'allure des courbes.

Les figures montrent des courbes pour temps clair et temps pluvieux ainsi que pour des angles d'élévation de 15°, 30° et de 75° au-dessus de l'horizon des antennes de station terrienne. Les Figures 1a), 2a), 3a) et 4a) montrent les limitations imposées par l'équipement type des stations terriennes et spatiales pour la recherche dans l'espace lointain.

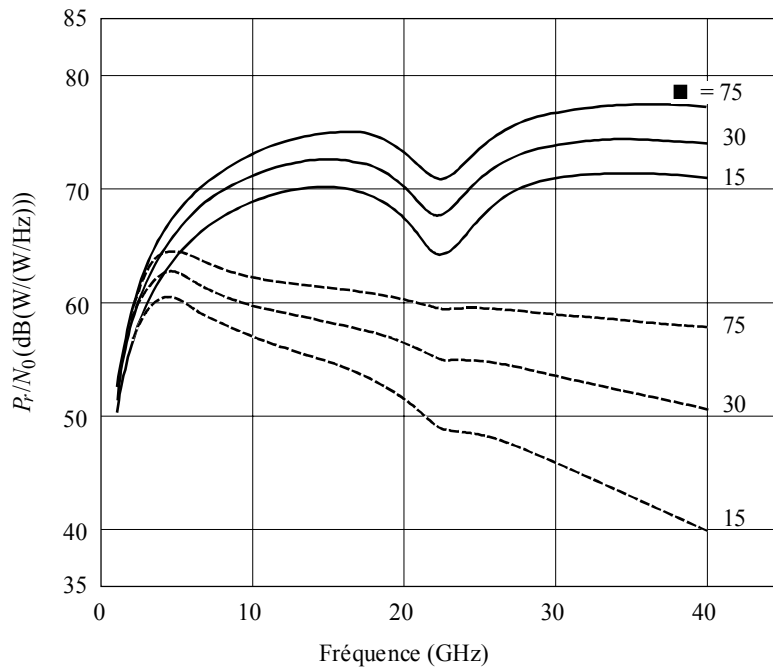
Les Fig. 1b), 2b), 3b) et 4b) supposent l'utilisation d'antennes parfaites et de récepteurs sans bruit. Ces courbes montrent une qualité qui n'est limitée que par les phénomènes naturels. La comparaison des graphes a) et b) de chaque figure montre la marge d'amélioration possible de la qualité de liaison grâce à une amélioration des qualités de l'équipement.

Les Tableaux 1 et 2 montrent les gammes de fréquences optimales pour une configuration d'antenne et une condition climatique données. La sélection des gammes de fréquences a été effectuée sur la base du critère de qualité (P_r/N_0) à 1 dB environ du niveau maximal offert.

FIGURE 1
Performances sur la liaison espace-Terre (P_r/N_0)



a) Performances possibles sur les liaisons telles qu'elles sont limitées par les caractéristiques des équipements et par les phénomènes de propagation naturels



b) Performances idéales sur les liaisons telles qu'elles sont limitées par les phénomènes de propagation naturels seulement

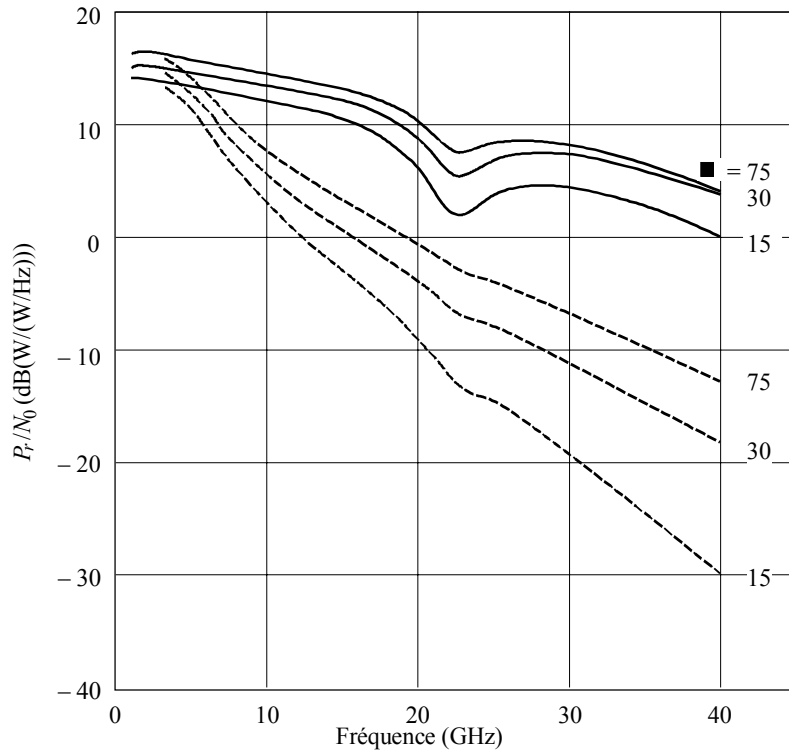
Antennes de diamètre fixe pour la station terrienne et la station spatiale

———— Atmosphère claire, 7,5 g/m³ de vapeur d'eau

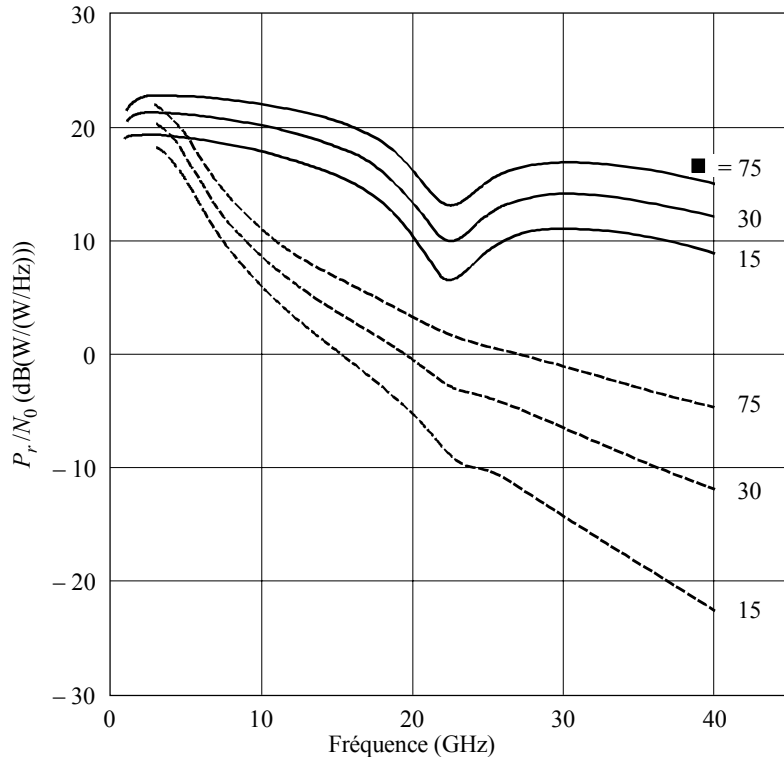
- - - - - Atmosphère et pluie, 10 mm/h

■ Angle d'élévation (degrés) de l'antenne de la station terrienne

FIGURE 2
Performances sur liaison Terre-espace (P_r/N_0)



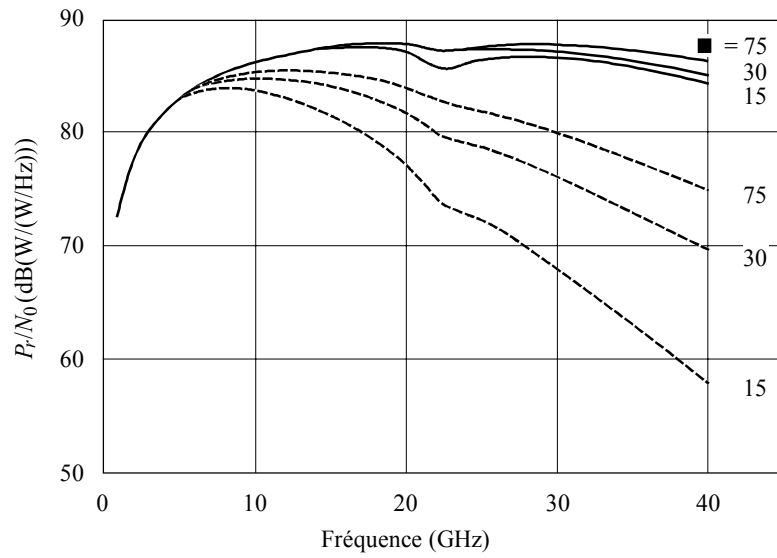
a) Performances possibles sur les liaisons telles qu'elles sont limitées par les caractéristiques des équipements et par les phénomènes de propagation naturels



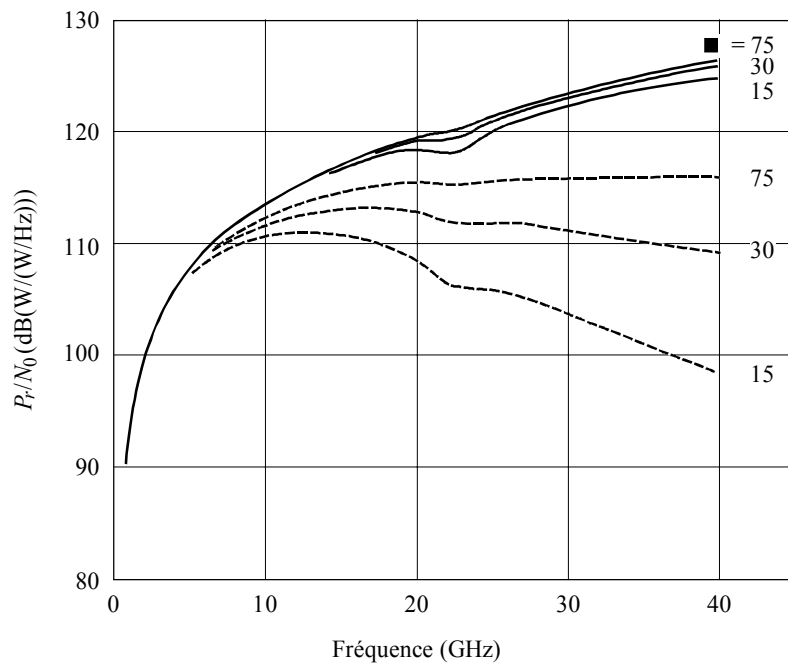
b) Performances idéales sur les liaisons telles qu'elles sont limitées par les phénomènes de propagation naturels seulement

- Antennes de diamètre fixe pour la station terrienne et gain fixe pour la station spatiale
- Atmosphère claire, 7,5 g/m³ de vapeur d'eau
 - - - Atmosphère et pluie, 10 mm/h
 - Angle d'élévation (degrés) de l'antenne de la station terrienne

FIGURE 3
Performances sur la liaison Terre-espace (P_r/N_0)



a) Performances possibles sur les liaisons telles qu'elles sont limitées par les caractéristiques des équipements et par les phénomènes de propagation naturels



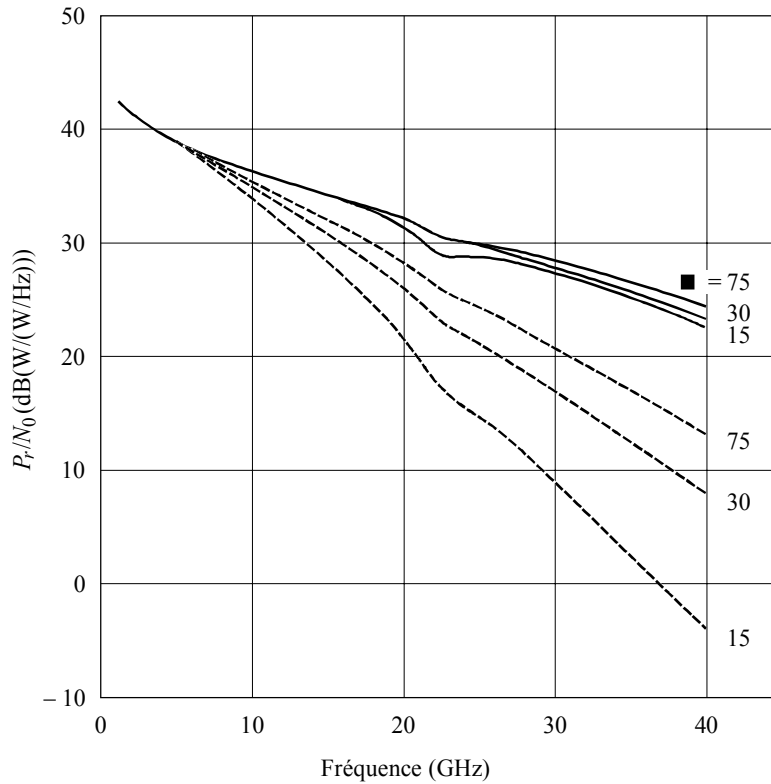
b) Performances idéales sur les liaisons telles qu'elles sont limitées par les phénomènes de propagation naturels seulement

Antennes de diamètre fixe pour la station terrienne et pour la station spatiale

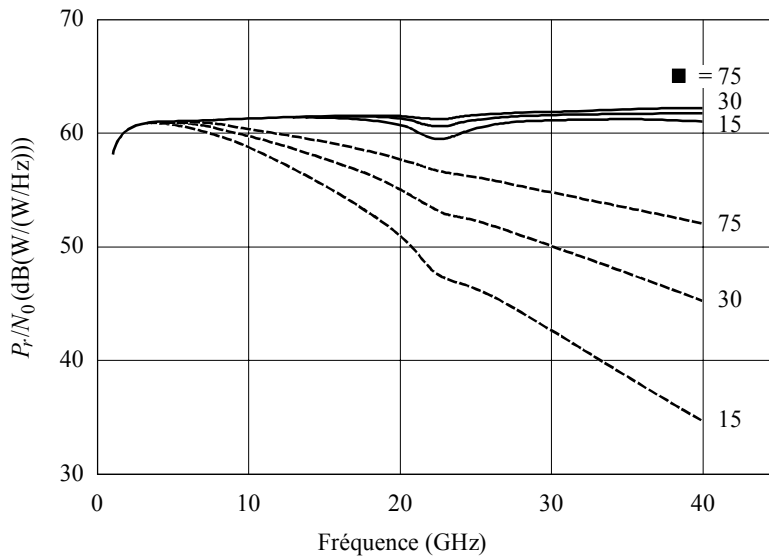
———— Atmosphère claire, 7,5 g/m³ de vapeur d'eau
 - - - - - Atmosphère plus pluie, 10 mm/h

■ Angle d'élévation (degrés) de l'antenne de la station terrienne

FIGURE 4
Performances sur la liaison Terre-espace (P_r/N_0)



a) Performances possibles sur les liaisons telles qu'elles sont limitées par les caractéristiques des équipements et par les phénomènes de propagation naturels



b) Performances idéales sur les liaisons telles qu'elles sont limitées par les phénomènes de propagation naturels seulement

Antenne de diamètre fixe pour la station terrienne, antenne à gain fixe pour la station spatiale

———— Atmosphère claire, 7,5 g/m³ de vapeur d'eau

----- Atmosphère plus pluie, 10 mm/h

■ Angle d'élévation (degrés) de l'antenne de la station terrienne

TABLEAU 1
Gammes de fréquences préférées – Liaisons espace-Terre

Configuration d'antenne	Conditions météorologiques	Gammes de fréquences préférées	
		Équipement idéal ⁽¹⁾	Équipement actuel ⁽²⁾
Diamètre fixe à l'émission	Atmosphère claire	11,5-19 GHz 28,5-40 GHz	12-20 GHz 26-39,5 GHz
Diamètre fixe à la réception	Précipitations	3 000-6 500 MHz	3 500-9 000 MHz
Gain fixe à l'émission	Atmosphère claire	1 000-9 500 MHz	1 000-6 500 MHz
Gain fixe à la réception	Précipitations	1 000-3 500 MHz	1 000-4 000 MHz

(1) Sur la base d'une analyse ne prenant en compte que les phénomènes naturels.

(2) Sur la base d'une analyse prenant en compte l'effet des caractéristiques d'équipement.

TABLEAU 2
Gammes de fréquences préférées – Liaisons Terre-espace

Configuration d'antenne	Conditions météorologiques	Gammes de fréquences préférées	
		Équipement idéal ⁽¹⁾	Équipement actuel ⁽²⁾
Diamètre fixe à l'émission	Atmosphère claire	35-40 GHz	11,5-35,5 GHz
Diamètre fixe à la réception	Précipitations	11-22 GHz	6 000 MHz-16 GHz
Gain fixe à l'émission	Atmosphère claire	2 000 MHz-40 GHz	1 000-2 000 MHz
Gain fixe à la réception	Précipitations	1 500-9 500 MHz	1 000-2 000 MHz

(1) Sur la base d'une analyse ne prenant en compte que les phénomènes naturels.

(2) Sur la base d'une analyse prenant en compte l'effet des caractéristiques d'équipement.

6 Sélection des bandes de fréquences préférées

Le Tableau 3 énumère les bandes de fréquences préférées, telles que déterminées par l'analyse de qualité de liaison et par les considérations supplémentaires ci-après.

6.1 Caractéristiques du duplexeur

En raison des limites pratiques des polarisateurs d'onde et des duplexeurs, l'émission et la réception simultanées au moyen d'une seule antenne exigent que les fréquences des liaisons montante et descendante soient séparées d'environ 8 à 20%. Les paires de bandes choisies dans les gammes énumérées dans le Tableau 3 doivent toujours tenir compte de cette contrainte.

6.2 Largeurs de bande attribuées aux liaisons

La largeur de bande nécessaire pour une liaison de télécommunication donnée et le nombre estimé de liaisons séparées donnent une indication de la largeur qu'il convient d'attribuer. La question des largeurs de bandes nécessaires est étudiée dans la Recommandation UIT-R SA.1015.

TABLEAU 3

Gammes de fréquences préférées et leur application*

Gammes de fréquences (GHz)	Application
1-2	Liaisons Terre-espace avec utilisation d'antenne d'engin spatial à faisceau large et faible gain, par atmosphère claire ou pluvieuse. Gamme utilisée pour les fonctions de liaison montante
1-4	Liaisons espace-Terre avec utilisation d'antenne d'engin spatial à faisceau large et faible gain, par atmosphère pluvieuse. Gamme utilisée pour les fonctions de liaison descendante
1-6,5	Liaisons espace-Terre avec utilisation d'antenne d'engin spatial à faisceau large et faible gain, par atmosphère claire. Gamme utilisée pour les fonctions de liaison descendante
3,5-9	Liaisons espace-Terre avec utilisation d'antenne d'engin spatial à gain élevé, par atmosphère pluvieuse. Gamme utilisée pour les fonctions de liaison descendante
6-16	Liaisons Terre-espace avec utilisation d'antenne d'engin spatial à gain élevé, par atmosphère pluvieuse. Gamme utilisée pour les fonctions de liaison montante
11,5-35,5	Liaisons Terre-espace avec utilisation d'antenne d'engin spatial à gain élevé, par atmosphère claire. Gamme utilisée pour les fonctions de liaison montante
26-40	Liaisons espace-Terre avec utilisation d'antenne d'engin spatial à gain élevé par atmosphère claire. Gamme utilisée pour les fonctions de liaison descendante

* Fondées sur l'analyse prenant en compte l'effet des caractéristiques d'équipement et un angle d'élévation de 30° au-dessus de l'horizon de l'antenne de station terrienne.

7 Besoins dans le cas de l'attribution de plusieurs bandes largement espacées dans le spectre

Une connaissance précise de la vitesse de propagation est nécessaire pour répondre aux exigences de la science radioélectrique et de la navigation dans l'espace. Pour déterminer la vitesse de propagation, il est nécessaire de tenir compte de la contribution des particules chargées au temps de propagation de groupe sur le trajet de transmission. La mesure du temps de propagation de groupe n'est applicable qu'à un engin spatial donné à un moment donné.

Si la contribution des particules chargées au temps de propagation de groupe sur le trajet de transmission n'est pas prise en compte, la mesure de distance sera affectée d'une erreur, comme indiqué ci-dessous.

Lorsqu'un signal radioélectrique traverse un milieu ionisé, sa vitesse de phase est augmentée et sa vitesse de groupe est diminuée. Cet effet est directement proportionnel à la concentration électronique cumulée sur le trajet et inversement proportionnel au carré de la fréquence.

Le procédé de mesure radioélectrique de la distance d'un engin spatial est appelé «mesure de distance». On mesure normalement la distance par le temps requis par un signal radioélectrique pour se propager d'une station terrienne à l'engin spatial et pour revenir à la Terre. Cette durée comprend le temps de propagation de groupe dû aux particules chargées sur le trajet. Si ce temps de propagation de groupe n'est pas pris en considération, la mesure de distance sera affectée d'une erreur.

La principale contribution au temps de propagation de groupe est celle de l'ionosphère terrestre. La propagation ionosphérique est étudiée dans la Recommandation UIT-R P.531. La limite supérieure de ce retard est estimée à 0,25 μ s à 1 GHz et à 0,62 ns à 20 GHz.

L'hélioplasma présent dans l'espace interplanétaire contribue également au temps de propagation de groupe. Les mesures relevées lors de précédentes missions dans l'espace lointain ont fourni des

données de temps de propagation de groupe permettant d'écrire la formule d'approximation suivante de la densité électronique en fonction de la distance au soleil:

$$N = 10^{12} \left[\frac{221}{r^6} + \frac{1,55}{r^{2,3}} \right]$$

où:

- N : densité électronique (électrons/m³)
- r : distance par rapport au centre du soleil, mesurée en rayons solaires (1 rayon solaire = 6,96 × 10⁸ m).

Le retard de propagation de groupe d'un signal RF traversant l'espace interplanétaire est donné par la formule suivante:

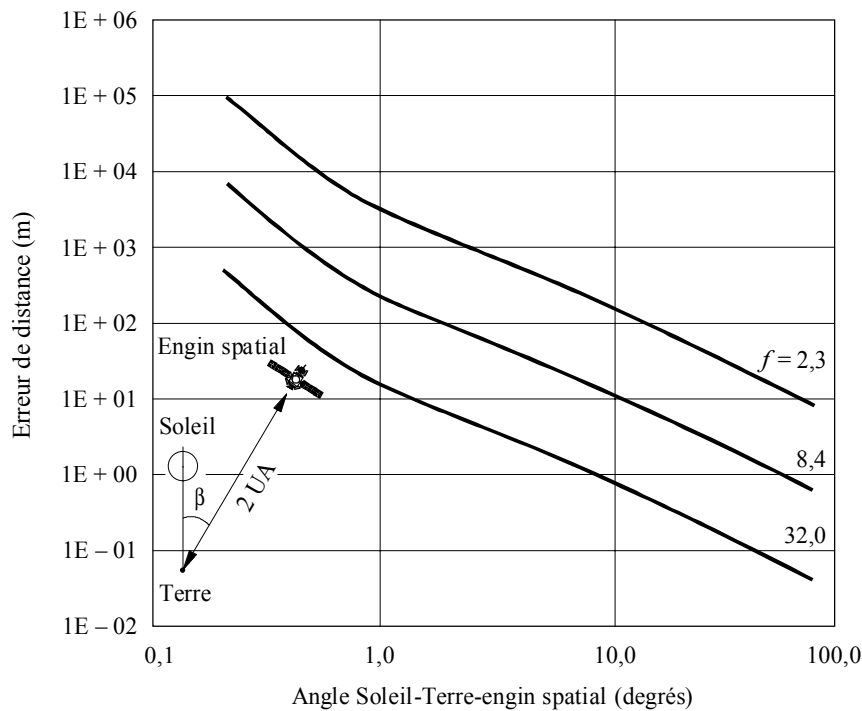
$$t = N_s \frac{1,34 \times 10^{-7}}{f^2}$$

où:

- t : retard de propagation de groupe dû aux particules chargées (s)
- f : fréquence (Hz)
- N_s : nombre total d'électrons/m² sur le trajet.

La Fig. 5 donne un exemple d'erreur de mesure de distance à cause du plasma solaire. On a obtenu cette figure en supposant un trajet de 3 × 10⁸ km, en calculant le temps de propagation de groupe en fonction de la fréquence et de l'angle par rapport au soleil, puis en multipliant ce temps par la vitesse de la lumière pour obtenir la distance correspondante.

FIGURE 5
Erreur de distance due à un temps de propagation de groupe non corrigé



- f : fréquence (GHz)
- β : angle-Soleil-Terre-engin spatial
- UA: unité astronomique (distance Soleil-Terre)
- 1 UA = 1,5 × 10⁸ km

La précision requise pour la mesure du temps de propagation de groupe peut conduire à utiliser simultanément deux bandes de fréquences de liaison, séparées en fréquence d'un facteur au moins égal à 4, de préférence. Le temps de propagation de groupe entre les deux liaisons descendantes sera différent et c'est cette différence qui pourra être utilisée pour calculer un facteur de correction approprié au retard de chaque liaison. A titre d'exemple d'utilisation de bandes séparées, on pourra faire appel à une liaison montante proche de 2 GHz afin d'obtenir une référence de phase pour deux liaisons descendantes simultanées à proximité de 2 GHz et de 8 GHz. Une liaison descendante exploitée à une fréquence supérieure à 20 GHz est relativement exempte d'effets dus aux charges particulières. Elle peut constituer une référence particulièrement précieuse pour l'étalonnage d'une liaison fonctionnant à une fréquence moins élevée.
