

RECOMMANDATION UIT-R SA.1014-1

**Vaisseaux habités ou inhabités destinés à la recherche dans l'espace lointain:
exigences en matière de télécommunications**

(1994-2006)

Domaine de compétence

La présente Recommandation contient une brève description de quelques caractéristiques essentielles des télécommunications dans l'espace lointain. Ces caractéristiques influencent ou déterminent les exigences en matière d'attribution, de coordination et de partage des bandes et de protection contre les brouillages.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les télécommunications entre la Terre et l'espace lointain doivent répondre à des exigences particulières;
- b) que ces exigences influent sur l'attribution des bandes de fréquences, l'utilisation en partage de ces bandes, la protection contre les brouillages ainsi que sur d'autres questions réglementaires et certains points concernant la gestion des fréquences,

recommande

1 que les exigences et caractéristiques propres aux télécommunications avec l'espace lointain exposées dans l'Annexe 1 soient prises en considération pour ce qui est de la recherche dans l'espace lointain et son interaction avec d'autres services.

Annexe 1**Vaisseaux habités ou inhabités destinés à la recherche dans l'espace lointain:
exigences en matière de télécommunications****1 Introduction**

La présente Annexe expose certaines considérations relatives aux missions de recherche dans l'espace lointain, définit les besoins de télécommunication associés aux recherches dans l'espace lointain par engin spatial, en précisant les fonctions requises et les exigences à respecter, et décrit enfin les techniques utilisées et les paramètres techniques des systèmes associés à ces missions.

Des considérations sur les exigences en matière de largeur de bande sont développées dans la Recommandation UIT-R SA.1013.

2 Exigences en matière de télécommunications

Les missions dans l'espace lointain exigent des radiocommunications extrêmement fiables durant de longues périodes et sur de grandes distances. Par exemple, une mission par engin spatial destinée à recueillir des renseignements scientifiques sur la planète Neptune dure huit ans et demande des télécommunications couvrant une distance de $4,65 \times 10^9$ km. En raison des grandes distances propres à la recherche dans l'espace lointain, les stations terriennes doivent délivrer des p.i.r.e. élevées et être dotées de récepteurs très sensibles.

L'exécution des diverses missions déjà en cours et de celles à l'étude exige l'utilisation continue de bandes de fréquences pour les radiocommunications avec l'espace lointain. Etant donné que de nombreuses missions dans l'espace lointain durent plusieurs années et que plusieurs d'entre elles se déroulent en même temps, il faut pouvoir établir des liaisons de radiocommunication à tout moment avec plusieurs engins spatiaux.

Par ailleurs, comme chaque mission peut faire appel à plusieurs engins spatiaux, il faut pouvoir établir des liaisons de radiocommunication simultanément avec plusieurs stations spatiales. Il peut également être nécessaire d'établir des liaisons de radiocommunication coordonnées simultanées entre une station spatiale et plusieurs stations terriennes.

2.1 Besoins en matière de télémésure

Les télémésures servent à transmettre des données de maintenance et des données scientifiques à partir de l'espace lointain.

Les données de télémésure pour la maintenance concernent l'état de fonctionnement de l'engin spatial et doivent pouvoir être reçues à tout moment, lorsque cela est nécessaire, pour garantir la sécurité de l'engin et le succès de la mission. Il faut pour cela disposer d'une liaison de télécommunication indépendante des conditions météorologiques et présentant une capacité suffisante. Cette exigence influe en partie sur le choix des bandes de fréquences préférées pour la recherche dans l'espace lointain (voir les Recommandations UIT-R SA.1012 et UIT-R SA.1013).

En télémésure scientifique, on transmet les données de mesure recueillies par des appareils scientifiques embarqués. Les débits binaires et les taux d'erreur acceptables peuvent être assez différents selon l'appareil utilisé et les mesures effectuées. Le Tableau 1 indique les gammes types de débits de données utilisés pour les télémésures scientifiques et les télémésures associées à la maintenance.

La capacité des liaisons de télémésure a augmenté progressivement, à mesure qu'évoluaient les équipements et les techniques. Cet accroissement de capacité peut être mis à profit de deux façons:

- pour rassembler de plus grandes quantités de données scientifiques sur les planètes proches; et
- pour organiser des missions vers des planètes plus éloignées.

Dans un système de télémésure, le débit maximal pour les données est inversement proportionnel au carré de la distance de radiocommunication. Ainsi, une liaison de même type avec un engin spatial offrant un débit de 134 kbit/s au voisinage de la planète Jupiter ($9,3 \times 10^8$ km) permettra d'obtenir un débit de 1,74 Mbit/s au voisinage de Vénus ($2,58 \times 10^8$ km). Etant donné que les débits plus élevés nécessitent de plus grandes largeurs de bande de transmission, l'utilisation effective des possibilités maximales en matière de télémésure dépend de la largeur des bandes attribuées et du nombre de missions simultanées dans l'espace lointain et utilisant les mêmes bandes.

Une contribution importante aux progrès de la télémesure a été la mise au point de méthodes de codage qui permettent d'opérer avec un rapport signal/bruit plus petit. Le signal codé exige une plus grande largeur de bande de transmission. L'emploi de la télémesure avec codage, aux très grands débits binaires, risque d'être limité par la largeur des bandes de fréquences attribuées.

TABLEAU 1

Gammes de débits binaires pour la recherche dans l'espace lointain

Sens et fonction	Caractéristiques des liaisons		
	Indépendantes des conditions météorologiques	Normales	A débit élevé
Terre-espace			
Télécommande (bit/s)	1-1 000	1-1 000	1-2 000
Programmation des calculateurs (kbit/s)	1-50	1-100	1-200
Phonie (kbit/s)	45	45	45
Télévision (Mbit/s)	1-4	0,2-12	6-100
Télémetrie (Mbit/s)	1	10	100
Espace-Terre			
Télémesure pour la maintenance (bit/s)	8-500	8-500	$8-2 \times 10^5$
Données scientifiques (kbit/s)	0,008-115	1-500	$40-3 \times 10^5$
Phonie (kbit/s)	45	45	45
Télévision (Mbit/s)	0,2-0,8	0,2-8	6-1 000
Télémetrie (Mbit/s)	1	10	100

2.2 Besoins en matière de télécommande

La fiabilité est l'exigence la plus importante pour les liaisons de télécommande. Les ordres doivent être reçus avec précision, et au moment où ils sont nécessaires. La liaison de télécommande doit avoir un taux d'erreur binaire ne dépassant pas 1×10^{-6} . Les ordres doivent être bien reçus, quelle que soit l'orientation de l'engin spatial, même lorsque l'antenne principale à gain élevé ne se trouve pas pointée sur la Terre. Dans ces conditions, la réception doit se faire avec une antenne très sensiblement équidirective sur l'engin spatial. Dans les stations terriennes, on a besoin d'une très grande p.i.r.e., en raison du faible gain de l'antenne de l'engin spatial, et aussi pour obtenir une grande fiabilité.

Avec l'emploi de calculateurs sur les engins spatiaux, la mise en séquence et le fonctionnement automatiques des systèmes embarqués sont prédéterminés dans une large mesure et mémorisés dans les calculateurs, pour exécution ultérieure. Pour certaines séquences compliquées, le fonctionnement automatique est une nécessité absolue. La télécommande est nécessaire pour modifier en vol les instructions stockées en mémoire; ce processus peut être rendu nécessaire pour apporter des corrections tenant compte de variations observées ou de défauts de fonctionnement de l'engin spatial. Il en est ainsi en particulier pour les missions de longue durée et aussi dans les cas où la mise en séquence dépend des conséquences d'«événements» antérieurs ayant affecté l'engin. Par exemple, les ordres concernant une correction de trajectoire d'un engin spatial dépendent de mesures de poursuite et ne peuvent pas être prédéterminés.

Le Tableau 1 indique les gammes de débits nécessaires pour assurer les fonctions de commande.

Une télécommande fiable implique l'emploi d'une télémesure de maintenance «tout temps», pour vérifier si tous les ordres sont correctement reçus et stockés dans la mémoire de commande.

2.3 Besoins en matière de poursuite

La poursuite permet d'obtenir des données utiles pour la navigation de l'engin spatial et pour les études radioscientifiques.

2.3.1 Navigation

Les mesures de poursuite associées à la navigation font appel à l'effet Doppler radiofréquence, au temps de propagation aller et retour d'un signal de mesure de distance et à la réception de signaux utilisés en interférométrie à très grande base. Ces mesures doivent être faites avec une précision satisfaisant aux exigences de la navigation. La précision des mesures dépend des variations de la vitesse de propagation, de la connaissance de la position des stations, de la précision des horloges et du temps de propagation dans les circuits électroniques des stations terriennes et des stations spatiales. Le Tableau 2 donne un exemple des précisions nécessaires pour la navigation et pour les mesures associées.

TABLEAU 2
Spécifications de précision pour la navigation et la poursuite

Paramètre	Valeur
Précision de la navigation (m)	300 (au voisinage de Jupiter)
Précision des mesures Doppler (Hz)	$\pm 0,0005$
Précision des mesures de distance (m)	$\pm 0,15$
Précision de la position de la station terrienne (m)	± 1

2.3.2 Etudes radioscientifiques

Les liaisons de télécommunications avec les engins spatiaux peuvent aussi jouer un rôle important dans les études sur la propagation, la relativité, la mécanique céleste et la gravité. L'information nécessaire est fournie par des mesures d'amplitude, de phase, de fréquence, de polarisation et de temps de propagation. Pour pouvoir faire ces mesures, il faut disposer d'attributions de fréquences appropriées. Au-dessus de 1 GHz, le temps de transmission et la rotation par effet Faraday (effet des particules chargées et du champ magnétique) diminuent rapidement avec la fréquence; ce sont donc les fréquences basses qui se prêtent le mieux à l'étude de ces phénomènes. Aux fréquences plus élevées, on est assez bien protégé contre ces effets et on peut mieux étudier la relativité, la gravité et la mécanique céleste. Pour ces études, il faut aussi compenser les effets des particules chargées aux fréquences basses.

Ces travaux scientifiques fondamentaux nécessitent des mesures de distance avec une précision absolue de 1 ou 2 cm. Pour obtenir cette précision, il faut utiliser des codes à large bande et mettre en œuvre simultanément plusieurs fréquences pour compenser les effets des particules chargées.

2.4 Conditions à satisfaire pour les missions avec engins habités dans l'espace lointain

Les conditions à satisfaire pour une mission de ce genre, du point de vue fonctionnel, seront les mêmes que pour les missions avec engins non habités. La présence d'un équipage humain dans les engins spatiaux imposera des exigences supplémentaires en ce qui concerne la fiabilité de la télémessure, de la télécommande et de la poursuite. Outre cet aspect de fiabilité, la différence la plus importante entre une mission d'engin habité et une mission d'engin non habité résidera dans

l'utilisation de liaisons téléphoniques et de télévision Terre-espace et espace-Terre. Les données des débits pour ces fonctions sont indiquées au Tableau 1.

Du point de vue des télécommunications, la conséquence en sera une augmentation de la largeur de bande de transmission, pour pouvoir transmettre les signaux de télévision. Si l'on dispose d'une liaison ayant les caractéristiques voulues pour permettre la transmission des données avec les débits binaires nécessaires, les télécommunications pour la recherche dans l'espace lointain avec, d'une part, des engins habités et, d'autre part des engins non habités sont assez semblables.

3 Caractéristiques techniques

3.1 Coordonnées et caractéristiques des stations terriennes de recherche dans l'espace lointain

Le Tableau 3 donne les coordonnées des stations terriennes avec capacité de fonctionnement dans les bandes attribuées à la recherche dans l'espace lointain.

TABLEAU 3
Coordonnées des stations terriennes de recherche
dans l'espace lointain

Administration	Emplacement	Latitude	Longitude
Agence spatiale européenne	Cebreros (Espagne)	40° 27' N	4° 22' O
	New Norcia (Australie)	31° 20' S	116° 11' E
Ukraine	Evpatoriya	45° 11' N	33° 11' E
Russie	Medvezhi ozera	55° 52' N	37° 57' E
	Ussuriisk	44° 01' N	131° 45' E
Japon	Usuda, Nagano	36° 08' N	138° 22' E
Etats-Unis d'Amérique	Canberra (Australie)	35° 28' S	148° 59' E
	Goldstone, Californie (Etats-Unis d'Amérique)	35° 22' N	115° 51' O
	Madrid (Espagne)	40° 26' N	4° 17' O

Chacune de ces stations dispose d'une ou plusieurs antennes, d'un ou plusieurs émetteurs et récepteurs qui peuvent être utilisés pour les liaisons dans l'espace lointain dans une ou plusieurs bandes attribuées. Les valeurs des principaux paramètres qui caractérisent les possibilités maximales offertes par ces stations sont données dans le Tableau 4. Bien que ces valeurs maximales ne concernent pas toutes les stations, elles doivent nécessairement être prises en considération pour l'attribution des bandes et l'établissement des critères de protection contre les brouillages. Il s'agit en effet de faire en sorte que les missions puissent être suivies dans les diverses parties du globe et d'assurer la protection de ces missions.

TABLEAU 4

**Caractéristiques des stations terriennes de recherche
dans l'espace lointain avec une antenne de 70 m**

Fréquence (GHz)	Gain d'antenne (dBi)	Ouverture du faisceau d'antenne (degrés)	Puissance de l'émetteur (dBW)	p.i.r.e. (dBW)	Température de bruit du système de réception (K)	Densité spectrale de bruit du système de réception (dB(W/Hz))
2,1 Terre-espace	62	0,14	50 56 ⁽¹⁾	112 118 ⁽¹⁾	--	--
2,3 Espace-Terre	63	0,13	--	--	25 ⁽²⁾ 21 ⁽³⁾	-214 ⁽²⁾ -215 ⁽³⁾
7,2 Terre-espace	72	0,04	43	115	--	--
8,45 Espace-Terre	74	0,03	--	--	37 ⁽²⁾ 27 ⁽³⁾	-213 ⁽²⁾ -214 ⁽³⁾
32 Espace-Terre	83,6 ⁽⁴⁾	0,01 ⁽⁴⁾	--	--	83 ⁽²⁾⁽⁴⁾	-209 ⁽²⁾⁽⁴⁾
34,5 Terre-espace	84 ⁽⁴⁾	0,01 ⁽⁴⁾	A déterminer	A déterminer	61 ⁽³⁾⁽²⁾	-211 ⁽³⁾⁽⁴⁾

(1) Puissance d'émetteur de 56 dBW utilisée en cas d'urgence pour l'engin spatial.

(2) Atmosphère claire, angle d'élévation de 30°, mode duplex pour réception et émission simultanées.

(3) Atmosphère claire, angle d'élévation de 30°, réception seulement.

(4) Estimation.

Les caractéristiques de réception des stations terriennes de recherche dans l'espace lointain sont habituellement spécifiées en termes de rapport: énergie par bit/densité spectrale de bruit nécessaire pour obtenir un taux d'erreur donné. Une autre façon de décrire les hautes performances et la sensibilité élevée de ces stations est de les exprimer en termes de rapport: gain d'antenne/température de bruit (rapport G/T). Ce rapport est en général de 50 dB(K⁻¹) à 2,3 GHz et de 59,5 dB(K⁻¹) à 8,4 GHz. Ces valeurs sont à comparer avec les 41 dB(K⁻¹) obtenus avec certaines stations terriennes du service fixe par satellite.

3.2 Stations spatiales

Les dimensions et le poids d'un engin spatial sont limités par les possibilités de la fusée de lancement. La puissance de l'émetteur et les dimensions de l'antenne d'une station spatiale sont plus petites que celles d'une station terrienne. La température de bruit du récepteur est plus élevée car on utilise en général un préamplificateur non refroidi.

La station spatiale est équipée d'un récepteur-émetteur, appelé répondeur, qui peut fonctionner dans un des deux modes suivants: le mode bidirectionnel, dans lequel le signal d'onde porteuse reçu d'une station terrienne sert à commander l'oscillateur d'une boucle à verrouillage de phase, la fréquence de cet oscillateur est ensuite utilisée pour piloter la fréquence d'émission du répéteur, dans un rapport fixe; le mode unidirectionnel, dans lequel la station spatiale ne reçoit pas de signal en provenance d'une station terrienne, la fréquence de l'émetteur étant pilotée par un oscillateur à quartz.

Dans le mode bidirectionnel, la fréquence et la phase du signal émis par l'engin spatial sont asservies avec une grande précision grâce à l'extrême précision des signaux reçus d'une station terrestre.

Le Tableau 5 donne la liste des principales caractéristiques des stations spatiales de recherche dans l'espace lointain.

TABLEAU 5
Caractéristiques type des stations spatiales de recherche
dans l'espace lointain

Fréquence Terre-espace (GHz)	Dimensions de l'antenne (m)	Gain d'antenne (dBi)	Ouverture du faisceau d'antenne (degrés)	Température de bruit du récepteur (K)	Densité de puissance spectrale de bruit du récepteur (dB(W/Hz))
2,1	3,7	36	2,6	1 200	-198
7,2	3,7	48	0,64	390	-202
34,5	3,7	61	0,14	A déterminer	A déterminer

Fréquence espace-Terre (GHz)	Dimensions de l'antenne (m)	Gain d'antenne (dBi)	Ouverture du faisceau d'antenne (degrés)	Puissance de l'émetteur (dBW)	D p.i.r.e. (dBW)
2,3	3,7	37	2,3	13	50
8,45	3,7	48	0,64	13	61
32	3,7	59,5	0,17	13	72,5

Etant donné la p.i.r.e. limitée des stations spatiales, les stations terrestres doivent être équipées du récepteur le plus sensible possible. En revanche, étant donné la très grande p.i.r.e. des stations terrestres, les stations spatiales peuvent utiliser des récepteurs moins sensibles. La température de bruit du récepteur d'un engin spatial dépend du débit binaire spécifié et de considérations de dimension, de poids, de coût, de complexité et de fiabilité.

La puissance de l'émetteur de la station spatiale est principalement limitée par la puissance électrique que peut fournir l'engin spatial.

4 Méthodes de télécommunication avec l'espace lointain

Les fonctions de télémétrie et de télécommande pour les télécommunications avec l'espace lointain font en général appel à des porteuses modulées en phase. La poursuite Doppler utilise la détection cohérente de la phase de la porteuse. Pour la fonction de mesure de distance, on ajoute un signal de télémétrie à la modulation.

4.1 Poursuite de la porteuse et mesures Doppler

Lorsqu'elle est reçue dans une station terrestre, la fréquence d'un signal émis par un engin spatial subit une variation par effet Doppler. On procède par poursuite de la phase de la porteuse pour mesurer la variation Doppler et, par conséquent, la vitesse de l'engin spatial par rapport à la station

terrienne. Les récepteurs de la station terrienne et de la station spatiale suivent le signal de porteuse grâce à une boucle à verrouillage de phase ou à une boucle de Costas. Avec un répéteur en mode bidirectionnel, la fréquence et la phase dans la boucle de la station spatiale servent à produire une ou plusieurs fréquences transmises dans le sens espace-Terre. La station terrienne obtient ainsi des signaux qui sont mis en corrélation avec la fréquence émise dans le sens Terre-espace, ce qui permet de mesurer avec précision l'effet Doppler.

Dans le mode unidirectionnel, les fréquences utilisées dans le sens espace-Terre sont fournies par l'oscillateur du répondeur; les mesures Doppler sont effectuées sur la base d'une connaissance *a priori* de la fréquence de l'oscillateur.

4.2 Modulation et démodulation

Sur les liaisons radioélectriques, l'onde porteuse est modulée en phase. Le signal de données numériques en bande de base module une sous-porteuse, qui elle-même module en phase la porteuse radioélectrique. Pour la télémesure, on utilise généralement une sous-porteuse rectangulaire; pour la télécommande, la sous-porteuse peut être sinusoïdale. Le taux de modulation est réglé de manière à fournir la valeur désirée du rapport: puissance de la porteuse résiduelle/puissance des bandes latérales du signal de données. On choisit la valeur de ce rapport de manière à obtenir une poursuite optimale de la porteuse et une détection optimale des données dans le récepteur.

La démodulation de la porteuse radiofréquence et de la sous-porteuse de données est effectuée par des boucles à verrouillage de phase (PLL, *phase-locked loop*). En général, la détection des données se fait à l'aide de filtres à corrélation et de filtres adaptés.

D'autres méthodes de modulation et de démodulation peuvent être appliquées sur les liaisons de télévision et les liaisons téléphoniques pour les missions d'engins habités. En général, la modulation et la démodulation MDP-4 et MDMG à haute efficacité en largeur de bande (avec décalage) sont utilisées en pareils cas avec poursuite de porteuse via des boucles de Costas et non des boucles PLL.

4.3 Codage

Sur une liaison à transmission numérique, il est possible de réduire la probabilité d'erreur si l'on accroît la largeur de bande d'information. On peut y parvenir par un codage qui transforme les bits de données en un nombre plus grand de symboles d'un code. C'est le cas par exemple des codes de bloc et des codes convolutionnels. Après transmission, les données initiales sont extraites par un décodage correspondant au code utilisé. L'amélioration de qualité réalisable avec la transmission codée est liée à la plus grande largeur de bande utilisée; elle peut aller de 3,8 dB (codage convolutionnel, un taux d'erreur binaire de 1×10^{-3}) à plus de 9 dB (codage turbo à un taux de 1/6).

4.4 Multiplexage

La télémesure scientifique et la télémesure de maintenance peuvent être combinées en un seul train de données numériques, par multiplexage temporel; on peut aussi utiliser des sous-porteuses séparées, que l'on additionne pour obtenir un signal modulant composite. Il est également possible d'insérer le signal de télémétrie dans le signal de la télémesure ou de télécommande. On règle l'amplitude des différents signaux de données de manière à répartir convenablement la puissance de l'émetteur entre l'onde porteuse et les bandes latérales contenant des informations.

4.5 Télémétrie

Pour mesurer des distances à partir d'une station terrienne, on fait fonctionner le répondeur de la station spatiale dans le mode bidirectionnel. La modulation correspondante appliquée au signal Terre-espace est récupérée dans le répondeur et sert à moduler la porteuse qui est transmise dans le sens espace-Terre. Dans la station terrienne, une comparaison entre les codes de télémétrie émis et reçus permet de mesurer un temps de transmission qui est proportionnel à la distance.

La précision de la mesure des distances est limitée fondamentalement par les possibilités de mesure de la corrélation temporelle entre le code émis et le code reçu. Dans le système utilisé actuellement, la fréquence de codage la plus élevée est 2 062 MHz. La période du code est 0,485 μ s et il est facile d'obtenir une résolution de 4 ns, en supposant que le rapport signal/bruit ait une valeur suffisante. Cette résolution équivaut à 120 cm sur le trajet aller et retour, c'est-à-dire à 60 cm sur la distance mesurée. Dans les conditions actuelles, cette valeur est suffisante pour les besoins de la navigation (voir le Tableau 2).

Dans les futures expériences radioscientifiques (voir le § 2.3.2), une précision de 1 cm sera nécessaire, ce qui implique une fréquence de code d'au moins 30 MHz.

4.6 Gain et pointage des antennes

Pour les antennes paraboliques normalement utilisées dans la recherche spatiale, le gain maximal est limité par l'exactitude avec laquelle sa surface s'approche d'une parabole parfaite. Cette dernière considération limite la fréquence maximale pouvant être utilisée efficacement avec une antenne.

Un des éléments dont dépend l'exactitude de la surface, élément commun aux antennes des stations terriennes et des stations spatiales, est la précision de la construction. Les antennes des stations terriennes subissent des déformations de surface sous l'effet du vent et de la température. Lorsque l'angle d'élévation varie, la pesanteur provoque des déformations de surface additionnelles qui dépendent de la rigidité du support d'antenne.

Les dimensions des antennes des stations spatiales sont limitées par la masse admissible et la place disponible dans la fusée de lancement et également par les possibilités techniques de construction des antennes déployables. Les effets thermiques sont une cause de déformation des surfaces de ces antennes.

La valeur maximale utilisable du gain des antennes est limitée par la précision de leur pointage. L'ouverture du faisceau doit avoir la valeur voulue pour tenir compte de l'erreur angulaire de pointage. Toutes les causes de déformation de la surface du réflecteur ont aussi une influence sur la précision de pointage. Le pointage des antennes des stations spatiales dépend également de la précision du système de commande d'orientation de l'engin spatial (cette précision dépend, de son côté, de la quantité de propergol qui peut être emportée).

La précision avec laquelle on connaît les positions relatives de la station terrienne et de la station spatiale a une influence sur l'ouverture de faisceau minimale et le gain maximal utilisables.

Le Tableau 6 indique des limitations typiques de performance des antennes.

TABLEAU 6

Limites actuelles de précision et de gain maximal des antennes

Paramètre limitatif	Antennes de station spatiale		Antennes de station terrienne	
	Valeur maximale typique du paramètre	Gain maximal	Valeur maximale typique du paramètre	Gain maximal
Précision de surface du paraboloïde	0,24 mm, valeur efficace, pour un réflecteur de 3,7 m de diamètre	66 dBi ⁽¹⁾ à 100 GHz	0,53 mm, valeur efficace, pour un réflecteur de 70 m de diamètre	83,6 dBi ⁽¹⁾ à 32 GHz
Précision de pointage	± 0,15° (3σ)	55 dBi ⁽²⁾	± 0,005° (3σ)	75 dBi ⁽²⁾

⁽¹⁾ Le gain sera plus faible sur d'autres fréquences.

⁽²⁾ Gain d'antenne pour une ouverture du faisceau à mi-puissance égale à 2 fois la précision de pointage. Avec une antenne à gain plus élevé, l'ouverture de faisceau serait trop petite par rapport à la précision de pointage.

4.7 Techniques additionnelles de la radionavigation

Les mesures Doppler et les mesures de distances fournissent l'information de base, en matière de poursuite, pour la navigation. D'autres techniques ont été mises au point pour améliorer la précision de la navigation.

4.7.1 Etalonnage de la vitesse de propagation, influencée par les particules chargées

Les mesures de distances et les mesures Doppler sont influencées par les variations de la vitesse de propagation des ondes, variations provoquées par les électrons libres qui se trouvent sur le trajet de transmission. La densité de ces électrons varie dans l'espace et dans les atmosphères planétaires; elle est très élevée au voisinage du soleil. Si on n'en tient pas compte, ces variations de la vitesse de propagation peuvent être une cause d'erreurs dans les calculs de navigation.

Les particules chargées accroissent la vitesse de phase et diminuent la vitesse de groupe. On peut déterminer l'effet produit par ces particules en comparant la variation de distance avec l'effet Doppler intégré sur une certaine période. L'influence sur la vitesse de propagation est inversement proportionnelle au carré de la fréquence. On peut tirer parti de cette dépendance en fonction de la fréquence pour améliorer la précision d'étalonnage. Il est possible de faire une mesure de distance aller-retour et d'effectuer la poursuite par effet Doppler en utilisant plusieurs signaux transmis simultanément dans le sens espace-Terre dans plusieurs bandes distinctes. Les particules chargées produisent des effets d'amplitude différente dans ces bandes, et cette différence permet d'améliorer l'étalonnage.

L'effet produit par les particules chargées est donné dans la Recommandation UIT-R SA.1012.

4.7.2 Interférométrie à très grande base (VLBI)

La précision de la navigation d'un engin spatial dépend de la précision avec laquelle on connaît les coordonnées de la station terrienne dans le système de coordonnées de la navigation. Une erreur de 3 m sur la position supposée de la station peut entraîner une erreur de 700 km dans la position calculée d'un engin spatial, à une distance égale à celle de Saturne. Le procédé VLBI permet d'avoir une meilleure estimation de la position d'une station; on utilise une radiosource céleste (quasar) comme source de signaux située en un point essentiellement invariable de la sphère céleste. Il est

possible d'enregistrer les signaux du quasar de manière à déterminer, avec une grande précision, la différence entre les instants de réception dans deux stations très éloignées l'une de l'autre. Si l'on fait plusieurs mesures, on peut déterminer les emplacements des stations avec une précision relative de 10 cm. On utilise actuellement des fréquences voisines de 2 et de 8 GHz pour les mesures VLBI.

La technique VLBI permet aussi de mesurer directement l'angle de déclinaison des engins spatiaux. La distance à laquelle se trouve l'engin est mesurée par deux stations dont on connaît les coordonnées avec précision et qui sont séparées par une grande distance nord-sud. Sur la base de ces mesures, il est possible de calculer la déclinaison avec une grande précision.

Une troisième application de la méthode VLBI est la mesure précise de la position angulaire d'un engin spatial. Deux stations terriennes ou plus observent alternativement un signal d'engin spatial et un signal quasar. Connaissant le temps, les coordonnées des stations et l'influence de la rotation terrestre sur les signaux reçus, il est possible de déterminer la position angulaire de l'engin spatial par rapport aux références célestes. Quand elle sera complètement au point, cette méthode permettra d'obtenir une précision nettement meilleure que celle réalisable actuellement (0,01 arsec). Il sera alors possible d'effectuer une navigation plus précise.

5 Analyse des performances et marges de réalisation

Le Tableau 7 donne la liste des caractéristiques d'une liaison, utilisable pour une analyse des performances. L'exemple concerne la télémesure à grand débit à partir de Jupiter. Le même genre d'analyse est effectué pour la télécommande et la télémétrie. On utilise les caractéristiques indiquées plus haut (stations terriennes et stations spatiales) pour calculer une marge des performances pour chaque fonction de télécommunication.

TABLEAU 7

Bilan des performances, liaison satellite-Terre à partir de Jupiter

Mission: Voyager Jupiter/Saturne 1977	
Mode: télémesure, 115,2 kbit/s, données codées, porteuse 8,45 GHz	
Caractéristiques de l'émetteur	
Puissance radioélectrique (21 W) (dBW)	13,2
Perte dans les circuits (dB)	-0,2
Gain d'antenne (diamètre 3,7 m) (dBi)	48,1
Perte de pointage (dB)	-0,2
Caractéristiques du trajet	
Affaiblissement en espace libre entre antennes isotropes (dB) (8,45 GHz, $9,3 \times 10^8$ km) (dB)	-290,4
Caractéristiques du récepteur	
Gain d'antenne (64 m, angle d'élévation 30°) (dBi)	72,0
Perte de pointage (dB)	-0,3
Affaiblissement dû aux conditions météorologiques (dB)	-0,1
Densité spectrale de bruit du système (22,6 K) (dB(W/Hz))	-215,1
Bilan de puissance	
Affaiblissement sur la liaison (dB)	-171,1
Puissance reçue, $P(T)$ (dBW)	-157,9

TABLEAU 7 (*fin*)

Mission: Voyager Jupiter/Saturne 1977	
Mode: télémesure, 115,2 kbit/s, données codées, porteuse 8,45 GHz	
Performance de poursuite de la porteuse (bidirectionnel)	
Rapport puissance de la porteuse/puissance totale (dB)	-15,4
Puissance de la porteuse reçue (dBW)	-173,3
Largeur de bande de bruit au seuil ($B = 10$ Hz) ($10 \log B$)	10,0
Puissance de bruit (dBW)	-205,1
Rapport signal/bruit au seuil (dB)	20
Puissance de la porteuse au seuil (dBW)	-185,1
Marge de performance (dB)	11,8
Performance de détection des données	
Rapport puissance des données/puissance totale (dB)	-0,3
Pertes à la réception des données et pertes par détection (dB)	-0,5
Puissance des données à la réception (dBW)	-158,7
Largeur de bande de bruit (largeur de bande de bruit effective pour une détection, par filtres adaptés, de données transmises à 115,2 kbit/s) (dB)	50,6
Puissance de bruit (dBW)	-164,5
Rapport signal/bruit au seuil (taux d'erreur binaire: 5×10^{-3}) (dB)	2,3
Puissance des données au seuil (dBW)	-162,2
Marge de performance (dB)	3,5

Un point important à souligner, pour la conception des missions de recherche dans l'espace lointain, est la très petite marge de performance pour la télémesure (3,5 dB dans l'exemple indiqué). Il en est ainsi lorsqu'on souhaite obtenir le maximum d'informations scientifiques de chaque engin spatial. Une augmentation de 10 dB de la marge de sécurité se traduirait par une division par 10 de la quantité de données de télémesure. Avec un système ayant une faible marge de performance, on augmente la sensibilité aux brouillages nuisibles et, pour les bandes supérieures à 2 GHz, on diminue la fiabilité du fait des influences météorologiques.