

Recommandation UIT-R SA.1014-4

(12/2023)

Série SA: Applications spatiales et météorologie

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

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en œuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Également disponible en ligne: <https://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Émissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2024

© UIT 2024

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R SA.1014-4

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

(1994-2006-2011-2017-2023)

Domaine d'application

La présente Recommandation contient une brève description de quelques caractéristiques essentielles des radiocommunications dans le cadre du service de recherche spatiale (espace lointain). Ces caractéristiques influencent ou déterminent les exigences pour ce qui est du choix des bandes envisageables, de la coordination, du partage des bandes et de la protection contre les brouillages.

Mots clés

Espace lointain, radiocommunications, télémessure, télécommande, débit de données, stations terrestres, stations spatiales, télémétrie, radioscientifique

Recommandations et Rapports connexes

Recommandation UIT-R SA.1015, Rapport UIT-R SA.2167, Rapport UIT-R SA.2177.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les radiocommunications entre la Terre et l'espace lointain doivent répondre à des exigences particulières;
- b) que ces exigences influent sur le choix des bandes de fréquences envisageables, 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

que les exigences et caractéristiques propres aux radiocommunications avec l'espace lointain exposées dans l'Annexe soient prises en considération pour ce qui est du service de recherche spatiale (espace lointain) et son interaction avec d'autres services.

Annexe

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

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1 Introduction	2
2 Exigences en matière de radiocommunications.....	3
2.1 Besoins en matière de télémessure	3
2.2 Besoins en matière de télécommande	4
2.3 Besoins en matière de poursuite	5
2.4 Conditions à satisfaire pour les missions avec engins habités dans l'espace lointain	6
3 Caractéristiques techniques	6
3.1 Coordonnées et caractéristiques des stations terriennes du service de recherche spatiale (espace lointain).....	6
3.2 Stations spatiales.....	8
4 Méthodes de radiocommunication avec l'espace lointain	9
4.1 Poursuite de la porteuse et mesures Doppler	9
4.2 Modulation et démodulation.....	10
4.3 Codage	10
4.4 Multiplexage	10
4.5 Télémétrie	10
4.6 Gain et pointage des antennes.....	11
4.7 Techniques additionnelles de la radionavigation.....	12
5 Analyse des performances et marges de réalisation	13

1 Introduction

La présente Annexe expose certaines considérations relatives aux missions de recherche dans l'espace lointain, définit les besoins de radiocommunication 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 le Rapport UIT-R SA.2177.

2 Exigences en matière de radiocommunications

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 radiocommunications 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 nombreuses missions déjà en cours et de celles à l'étude exige l'utilisation continue de bandes de fréquences pour les radiocommunications dans le cadre du service de recherche spatiale (espace lointain). Étant donné que la plupart des 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 télémesure

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

Les données de télémesure 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 radiocommunication 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 le Rapport UIT-R SA.2177).

En télémesure 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 débits de données maximaux requis pour les télémesures scientifiques et les télémesures associées à la maintenance.

TABLEAU 1

Débits binaires maximaux requis pour la recherche dans l'espace lointain

Sens et fonction	Caractéristiques des liaisons			
	Unité	Indépendantes des conditions météorologiques	Normales	À débit élevé
Terre vers espace				
Télécommande	bit/s	1 000	1 000	2 000
Programmation des calculateurs	kbit/s	50	100	200
Audio	kbit/s	45	45	45
Vidéo	Mbit/s	4	12	30
Espace vers Terre				
Télémesure pour la maintenance	bit/s	500	500	2×10^5
Données scientifiques	kbit/s	115	500	3×10^5
Audio	kbit/s	45	45	45
Vidéo	Mbit/s	0,8	8	30

La capacité des liaisons de télémesure 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 télémesure, 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). Étant donné que les débits plus élevés nécessitent de plus grandes largeurs de bande de transmission, l'utilisation effective des possibilités maximales en matière de télémesure 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.

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 vers 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 télémessure 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 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
Débit d'éléments pour la télémétrie (Terre vers espace et espace vers Terre)*	
Indépendant des conditions météorologiques (Méléments/s)	1
Normal (Méléments/s)	10
Haut débit (Méléments/s)	24

* Fréquence des impulsions émises ou reçues d'une séquence de code de bruit pseudo-aléatoire utilisé pour la télémétrie.

2.3.2 Études radioscientifiques

Les liaisons de radiocommunication 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 à 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 audio et vidéo Terre vers espace et espace vers Terre. Les débits de données pour ces fonctions sont indiqués au Tableau 1.

Du point de vue des radiocommunications, la conséquence en sera une augmentation de la largeur de bande de transmission, pour pouvoir transmettre les signaux vidéo. Si l'on dispose d'une liaison ayant les caractéristiques voulues pour permettre la transmission des données avec les débits binaires nécessaires, les radiocommunications 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 du service de recherche spatiale (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 du service
de recherche spatiale (espace lointain)

Administration	Emplacement	Latitude	Longitude
Chine	Kashi	38° 55' N	75° 52' E
	Jiamusi	46° 28' N	130° 26' E
	Kunming	25° 32' N	102° 48' E
	Miyun	40° 33' N	116° 58' E
	Shanghai	31° 06' N	121° 12' E
	Ürümqi	43° 28' N	87° 11' E
	Neuquén (Argentine)	39° 11' S	69° 52' O
Agence spatiale européenne	Cebreros (Espagne)	40° 27' N	4° 22' O
	Malargüe (Argentine)	35° 46' S	69° 22' O
	New Norcia (Australie)	31° 20' S	116° 11' E
Allemagne	Weilheim	47° 53' N	11° 04' E
Ukraine	Evpatoriya	45° 11' N	33° 11' E

TABLEAU 3 (*fin*)

Administration	Emplacement	Latitude	Longitude
Russie	Medvezhi ozera	55° 52' N	37° 57' E
	Ussuriisk	44° 01' N	131° 45' E
	Kalyazin	57° 13' N	37° 54' E
Japon	Usuda, Nagano	36° 08' N	138° 22' E
	Uchinoura	31° 15' N	131° 04' E
	Misasa	36° 08' N	138° 21' E
États-Unis d'Amérique	Canberra (Australie)	35° 28' S	148° 59' E
	Goldstone, Californie (États-Unis d'Amérique)	35° 22' N	115° 51' O
	Madrid (Espagne)	40° 26' N	04° 17' O
	Morehead, Kentucky (États-Unis d'Amérique)	38° 11' N	83° 26' O
Inde	Byalalu	12° 54' N	77° 22' E
Émirats arabes unis	Dubaï	25° 14' N	55° 28' E
Royaume-Uni	Goonhilly	50° 03' N	5° 11' O
Italie	Sardaigne	39° 30' N	9° 15' E

Chacune de ces stations dispose d'une ou plusieurs antennes, d'un ou plusieurs émetteurs et récepteurs qui peuvent être utilisés pour les liaisons du service de recherche spatiale (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 s'appliquent pas à 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 du service de recherche spatiale (espace lointain) puissent être suivies dans les diverses parties du globe et d'assurer la protection de ces missions.

TABLEAU 4

**Caractéristiques des stations terriennes du service de recherche spatiale
(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))
2,110-2,120 Terre vers espace	62	0,14	50 56 ⁽¹⁾	112 118 ⁽¹⁾	—	—
2,290-2,300 Espace vers Terre	63	0,13	—	—	25 ⁽²⁾ 21 ⁽³⁾	−214 ⁽²⁾ −215 ⁽³⁾

TABLEAU 4 (*fin*)

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))
7,145-7,190 Terre vers espace	72	0,04	49 ⁽⁴⁾	121 ⁽⁴⁾	—	—
8,400-8,450 Espace vers Terre	74	0,03	—	—	37 ⁽²⁾ 27 ⁽³⁾	-213 ⁽²⁾ -214 ⁽³⁾
31,8-32,3 Espace vers Terre	83,6	0,01	—	—	83 ⁽²⁾ 61 ⁽³⁾	-209 ⁽²⁾ -211 ⁽³⁾
34,2-34,7 Terre vers espace	84	0,01	30	114	—	—

(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) Certaines stations terriennes continuent d'exploiter des émetteurs de 20 kW (43 dBW).

Les caractéristiques de réception des stations terriennes du service de recherche spatiale (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) à 2,3 GHz, de 59,5 dB/(K) à 8,4 GHz et de 65,2 dB/(K) à 32 GHz. Ces valeurs sont à comparer avec les 41 dB/(K) 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 fréquence de l'émetteur est 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 terrienne.

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 vers 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))
2,110-2,120	3,7	36	2,6	200	-206
7,145-7,190	3,7	48	0,64	330	-203
34,2-34,7	3,7	61	0,14	2 000	-196

Fréquence espace vers Terre (GHz)	Dimensions de l'antenne (m)	Gain d'antenne (dBi)	Ouverture du faisceau d'antenne (degrés)	Puissance de l'émetteur (dBW)	p.i.r.e. (dBW)
2,290-2,300	3,7	37	2,3	13	50
8,400-8,450	3,7	48	0,64	13	61
31,8-32,3	3,7	59,5	0,17	13	72,5

Étant donné la p.i.r.e. limitée des stations spatiales, les stations terriennes doivent être équipées du récepteur le plus sensible possible. En revanche, étant donné la très grande p.i.r.e. des stations terriennes, 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 radiocommunication avec l'espace lointain

Les fonctions de télémétrie et de télécommande pour les radiocommunications 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 terrienne, 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 vers Terre. La station terrienne obtient ainsi des signaux qui sont mis en corrélation avec la fréquence émise dans le sens Terre vers espace, ce qui permet de mesurer avec précision l'effet Doppler.

Dans le mode unidirectionnel, les fréquences utilisées dans le sens espace vers 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 vidéo et audio 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 vers espace est récupérée dans le répondeur et sert à moduler la porteuse qui est transmise dans le sens espace vers 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 1 ns, en supposant que le rapport signal/bruit ait une valeur suffisante.

Cette résolution équivaut à 30 cm sur le trajet aller et retour, c'est-à-dire à 15 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 expériences radioscientifiques (voir le § 2.3.2), une précision de 1 cm est nécessaire, ce qui implique une fréquence de code d'au moins 30 MHz. Les systèmes actuels de télémétrie par bruit pseudo-aléatoire du service de recherche spatiale dans l'espace lointain utilisent un débit d'éléments maximal de 24 Méléments/s.

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	61 dBi ⁽¹⁾ à 34 GHz	0,53 mm, valeur efficace, pour un réflecteur de 70 m de diamètre	84 dBi ⁽¹⁾ à 34 GHz
Précision de pointage	±0,15° (3σ)	56 dBi ⁽²⁾	±0,005° (3σ)	82,5 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 Étalonnage 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 sur la phase et la vitesse de groupe, ainsi que sur la mesure de distance, est donné dans le Rapport UIT-R SA.2177.

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, 8 et 32 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, appelée télémétrie DDOR, 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 dix fois supérieure à celle réalisable actuellement (0,002 arsec, soit 10 nrad). Il sera alors possible d'effectuer une navigation plus précise et, en conséquence, une mise sur orbite planétaire plus efficace.

5 Analyse des performances et marges de réalisation

Lors de la conception, de la mise au point et de l'exploitation de communications avec les engins spatiaux, il est fait appel à des bilans de liaison pour représenter les valeurs nominales des caractéristiques de la liaison: puissance de l'émetteur, puissance de bruit du système, gain des antennes, affaiblissements dus au matériel, affaiblissements dus à la propagation et autres, afin de déterminer la puissance du signal et du bruit au niveau du récepteur et d'estimer la marge de liaison, cette dernière indiquant la fiabilité de la liaison et sa tolérance aux variations des caractéristiques de la liaison et aux brouillages par d'autres sources.

Le Tableau 7 donne un exemple de bilan de liaison pour la télémétrie à grand débit à partir de Jupiter réalisée par une sonde du programme Voyager. Les bilans de liaison peuvent être différents pour d'autres engins spatiaux et dépendre de la distance à la Terre. 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 de liaison pour la poursuite de la porteuse et la détection des données de télémétrie.

TABLEAU 7

Bilan de liaison satellite-Terre à partir de Jupiter

Mission: Voyager Jupiter/Saturne 1977		
Mode: télémétrie, 115,2 kbit/s, codage de données 7-1/2, 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)	dB	48,1
Perte de pointage	dB	-0,2
Caractéristiques du trajet		
Affaiblissement en espace libre entre antennes isotropes (8,45 GHz, $9,3 \times 10^8$ km)	dB	-290,4

TABLEAU 7 (*fin*)

Mission: Voyager Jupiter/Saturne 1977 Mode: télémesure, 115,2 kbit/s, codage de données 7-1/2, porteuse 8,45 GHz		
Caractéristiques du récepteur		
Gain d'antenne (70 m, angle d'élévation 30°)	dBi	73,4
Perte de pointage	dB	-0,3
Affaiblissement dû aux conditions météorologiques	dB	-0,1
Densité spectrale de bruit du système (T = 22,6 K)	dB(W/Hz)	-215,1
Bilan de puissance		
Affaiblissement sur la liaison	dB	-169,7
Puissance reçue	dBW	-156,5
Performance de poursuite de la porteuse (bidirectionnel)		
Rapport puissance de la porteuse/puissance totale	dB	-15,4
Puissance de la porteuse reçue	dBW	-171,9
Largeur de bande de bruit au seuil	Hz	10
Puissance de bruit	dBW	-205,1
Rapport signal/bruit au seuil	dB	20
Puissance de la porteuse au seuil	dBW	-185,1
Marge de liaison pour la poursuite de la porteuse	dB	13,2
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	-157,3
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(Hz)	50,6
Puissance de bruit	dBW	-164,5
Rapport signal/bruit au seuil (taux d'erreur binaire: 5×10^{-3} , codage des données 7-1/2)	dB	2,3
Puissance des données au seuil	dBW	-162,2
Marge de liaison pour la détection des données	dB	4,9

Un point important à souligner, pour la conception des missions de recherche dans l'espace lointain, est la valeur relativement petite de la marge de liaison pour la détection des données (4,9 dB dans l'exemple indiqué). Il en est ainsi lorsqu'on souhaite obtenir le maximum d'informations scientifiques de chaque engin spatial, et cette marge diminue à mesure que la distance augmente. Une marge de 10 dB sur la liaison de communication avec Jupiter nécessiterait de réduire le débit des données de télémesure de 115,2 kbit/s à 35,5 kbit/s. Avec un système ayant une faible marge de liaison, on augmente la sensibilité aux brouillages nuisibles et, pour les bandes supérieures à 2 GHz, on diminue la fiabilité du fait des influences météorologiques.