



MANUEL COMMUNICATIONS DANS LE SERVICE DE RECHERCHE SPATIALE

ÉDITION DE 2014
BUREAU DES RADIOCOMMUNICATIONS



Manuel Communications dans le Service de Recherche Spatiale

Edition de 2014

Bureau des radiocommunications



Préface

Le Manuel sur les communications dans le service de recherche spatiale a été élaboré par des experts du Groupe de travail 7B de la Commission d'études 7 du Secteur des radiocommunications (Services scientifiques). La version originale a été établie sous la présidence de M. S. Taylor (Etats-Unis d'Amérique), Président du Groupe de travail 7B. La présente version, établie sous la présidence de M. B. Kaufman (Etats-Unis d'Amérique), Président du Groupe de travail 7B, apporte des informations sur les pratiques et les progrès techniques en matière de communications dans le service de recherche spatiale, et tient compte des modifications apportées aux Recommandations et Rapports UIT-R depuis la première publication du Manuel en 2002.

Ce Manuel, qui n'est pas conçu comme un ouvrage de référence sur la recherche spatiale, traite essentiellement des aspects du service de recherche spatiale se rapportant à la gestion de l'utilisation du spectre, dont l'objet est de réduire au minimum les brouillages entre les services de radiocommunication, dans les situations où le service de recherche spatiale est concerné. Les quatre chapitres qui composent ce Manuel visent à initier le lecteur aux principes fondamentaux du service de recherche spatiale. Parmi les domaines couverts, il y a lieu de citer les fonctions du système de recherche spatiale et les mises en œuvre techniques, les bandes de fréquences préférées ainsi que les questions liées au partage du spectre avec d'autres services. Enfin, à toutes fins utiles, on trouvera dans l'Appendice 1 la liste des Recommandations de l'UIT-R qui ont trait à la recherche spatiale.

J'espère que cet ouvrage sera utile à la fois aux responsables de la gestion du spectre et aux ingénieurs de radiocommunication.

François Rancy
Directeur du Bureau des radiocommunications

Avant-propos

Le lancement, le 4 octobre 1957, de Spoutnik-1, premier satellite artificiel à décrire une orbite autour de la Terre, a marqué le début de l'ère spatiale. La nécessité de communiquer avec des engins spatiaux a conduit à la création du service radioélectrique connu sous le nom de service de recherche spatiale. De nos jours, les agences spatiales et les administrations du monde entier entreprennent des missions de recherche spatiale. Selon la définition du Règlement des radiocommunications de l'UIT (RR), le service de recherche spatiale est un «service de radiocommunication dans lequel on utilise des engins spatiaux ou d'autres objets spatiaux aux fins de recherche scientifique ou technique».

La Commission d'études 7 des radiocommunications pour les services scientifiques (CE 7) a été créée, dans le cadre d'une réorganisation structurelle, en 1990, lors de l'Assemblée plénière du CCIR à Düsseldorf. Bon nombre des activités de cette Commission visent à faire progresser l'état de nos connaissances de l'utilisation du spectre en vue d'atteindre des objectifs scientifiques.

La Commission d'études 7 compte actuellement un certain nombre de groupes de travail (GT) qui traitent de questions techniques se rapportant à des disciplines précises relevant des services scientifiques. La recherche spatiale avec ses applications est du ressort du Groupe de travail 7B. Elle englobe aussi les études consacrées aux liaisons de communication qui sont nécessaires pour les missions spatiales effectuées jusqu'aux limites les plus reculées du système solaire, voire au-delà.

Au cours des quatre dernières décennies, des progrès considérables ont été accomplis dans de nombreuses disciplines scientifiques et techniques qui ont été bénéfiques pour l'humanité et qui nous ont permis d'approfondir et d'améliorer nos connaissances de l'espace qui nous entoure. Au nombre des réalisations, il convient de mentionner l'utilisation d'engins spatiaux robotisés pour explorer les planètes ainsi que l'espace situé au-delà des limites de notre système solaire, l'exploration de la Lune par des vaisseaux habités, la construction et l'exploitation de la station spatiale MIR et enfin, l'établissement de communications spatiales améliorées à l'aide de satellites relais de données. La construction d'une station spatiale internationale et l'exploration de Mars par des vaisseaux habités figurent parmi les projets en cours.

Les améliorations ainsi que les réalisations qui ont été la caractéristique constante de la recherche spatiale ont non seulement élargi la gamme des activités et des besoins, mais ont suscité une demande de communications d'une capacité et d'une fiabilité accrues dans le service de recherche spatiale. En effet, l'orbite et le spectre, sur lesquels repose l'ensemble des communications spatiales, sont devenus de plus en plus encombrés du fait de la présence des nouveaux services et systèmes. Il est indispensable de bien connaître les systèmes de radiocommunications spatiales et leurs besoins pour permettre le partage de ces ressources limitées, tout en répondant aux demandes actuelles et futures.

S'il est vrai que l'élaboration des Recommandations a été et continue d'être au cœur des activités de la Commission d'études, il est devenu évident que les experts de la Commission d'études qui s'acquittent de cette tâche ont beaucoup d'informations essentielles à fournir à leurs collègues scientifiques ou profanes qui ont besoin des données relatives à la recherche spatiale pour résoudre des questions scientifiques fondamentales et faire progresser l'ensemble des connaissances humaines sur l'environnement spatial et l'origine de l'univers. C'est dans cet esprit qu'il a été décidé d'élaborer et de publier le présent Manuel, pour que tous les utilisateurs des Recommandations puissent avoir une connaissance plus approfondie des systèmes de communication du service de recherche spatiale, afin de leur permettre de mieux concevoir et appliquer des outils aussi performants.

Le présent Manuel a pour objet de fournir au lecteur des connaissances générales sur le service de recherche spatiale. Il contient des renseignements de base sur les besoins techniques et en matière de spectre de nature à permettre l'exécution de toute la gamme existante des programmes, missions et activités du domaine de la recherche spatiale. Le Manuel s'adresse essentiellement aux administrateurs des organismes publics, aux membres des Commissions d'études des radiocommunications et au personnel des agences qui s'intéresse à la gestion du spectre. Cet ouvrage présentera aussi de l'intérêt pour une autre catégorie de personnes, comme les étudiants ou encore tous ceux qui souhaitent connaître certains aspects des communications du service de recherche spatiale.

En ma qualité de Président de la Commission d'études 7, j'ai l'honneur et le plaisir d'offrir ce Manuel à tous les utilisateurs de normes de recherche spatiale qui, j'en suis convaincu, ne manqueront pas d'utiliser cet outil de référence extrêmement utile dans leurs travaux.

Ce Manuel n'aurait pu être mené à bonne fin sans les contributions des nombreuses administrations qui participent aux travaux de la Commission d'études 7. Le travail effectué par les Rapporteurs chargés des différentes sections du Manuel a été considérable et il convient de remercier en particulier Mme S. Taylor (Présidente du Groupe de travail 7B, Etats-Unis d'Amérique), M. V. Meens (Vice-Président de la Commission d'études 7, France), M. R. Jacobsen (Vice-Président de la Commission d'études 7, Australie), Mme S. Kimura (Japon), ainsi que MM. R. Andrews, D. Bathker et B. Younes (Etats-Unis d'Amérique). En outre, des remerciements tout particuliers s'adressent à M. A. Nalbandian, du Bureau des radiocommunications, qui a joué un rôle central dans l'élaboration du présent Manuel.

R. M. Taylor
Président de la Commission d'études 7

Avant-propos de la deuxième édition

Depuis la première publication du présent Manuel, de nombreux changements sont intervenus sur le plan des communications dans le service de recherche spatiale. La station spatiale internationale est devenue entièrement opérationnelle et les administrations dotées de programmes spatiaux actifs sont beaucoup plus nombreuses. L'exploration robotisée de la Lune et de Mars fait l'objet d'une activité croissante de la part de nombreuses agences spatiales, avec pour finalité l'envoi d'êtres humains sur Mars dans une optique d'exploration et de découverte.

L'accès à l'espace à des fins de recherche scientifique est devenu plus facile grâce à de nouvelles technologies, telles que les nanosatellites et les picosatellites, technologies qui, en raison de leur coût et de leur poids moins élevés, ont considérablement réduit les obstacles au développement et au lancement de satellites.

Parallèlement à l'expansion des activités de recherche spatiale, il est devenu nécessaire de disposer de débits de données plus élevés, afin de pouvoir effectuer des missions plus complexes. Du fait de cette augmentation de l'activité et du volume des données de mission, le partage du spectre est devenu un aspect essentiel des communications dans le service de recherche spatial. Un certain nombre de techniques ont permis d'améliorer le partage du spectre, par exemple l'utilisation de modulations d'ordre plus élevé, ce qui améliore l'efficacité en largeur de bande, et l'utilisation de fréquences plus élevées, ce qui améliore la directivité.

Une autre évolution considérable en matière de communications dans le service de recherche spatiale réside dans l'intérêt grandissant pour les fréquences comprises dans la gamme optique et l'utilisation accrue de ces fréquences.

La version actualisée du présent Manuel continue de présenter des renseignements de base sur les besoins techniques et en matière de spectre de nature à permettre l'exécution de toute la gamme existante des programmes, missions et activités du domaine de la recherche spatiale. Ce manuel devrait faciliter la compréhension de certains aspects du service de recherche spatiale liés aux communications.

La révision du présent Manuel a été rendue possible par les contributions des nombreuses administrations participant aux travaux de la Commission d'études 7. Cependant, certaines personnes méritent d'être distinguées pour leur contribution notable: M. B. Kaufman (Président du GT 7B, Etats-Unis d'Amérique), M. E. Vassallo (ESA), M. V. S. Galbraith (Etats-Unis d'Amérique), Mme P. Dumit (Etats-Unis d'Amérique), et MM. T. Berman, G. Feldhake et S. Kayalar, S. Asmar, F. Manshadi, T. VonDeak (Etats-Unis d'Amérique). Des remerciements particuliers vont à l'endroit de M. V. Nozdrin, membre du Bureau des radiocommunications, eu égard au rôle essentiel que celui-ci a joué dans l'actualisation du présent Manuel.

V. Meens
Président de la Commission d'études 7

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Chapitre 1 – Introduction au service de recherche spatiale	1
1.1 Recherche spatiale – Aperçu général	1
1.2 Caractéristiques des missions de recherche spatiale	2
1.2.1 Durée des missions de recherche spatiale	2
1.2.2 Orbites des missions de recherche spatiale	2
1.2.3 Types de missions de recherche spatiale	3
1.3 Systèmes de recherche spatiale	5
1.3.1 Secteur terrien	5
1.3.2 Secteur spatial	7
Chapitre 2 – Opérations de communication et de poursuite dans le service de recherche spatiale et applications techniques	11
2.1 Fonctions	11
2.1.1 Transmissions de télécommande	11
2.1.2 Transmissions de télémétrie concernant l'engin spatial	11
2.1.3 Transmissions de télémétrie concernant la mission	11
2.1.4 Poursuite	11
2.1.5 Sciences radio	12
2.2 Applications	12
2.2.1 Fiabilité, taux d'erreur sur les bits et marges de liaison	12
2.2.2 Débits de données et largeurs de bande	13
2.2.3 Ratios de rotation	13
2.2.4 Multiplexage	14
2.2.5 Codage de correction d'erreur et codage du bruit pseudo-aléatoire	14
2.2.6 Techniques de modulation	15
2.2.7 Acquisition	16
2.2.8 Techniques de poursuite	16
Chapitre 3 – Considérations générales relatives aux bandes de fréquences utilisées pour les missions de recherche spatiale	19
3.1 Considérations relatives aux missions	19
3.2 Considérations relatives aux équipements	19
3.3 Phénomène de propagation et de rayonnement	20
3.4 Considérations relatives à la qualité de fonctionnement des liaisons	21
3.5 Attributions au service de recherche spatiale	22

	Page
Chapitre 4 – Considérations générales sur les critères de protection et partage des fréquences dans le service de recherche spatiale	23
4.1 Considérations générales sur les brouillages dans le service de recherche spatiale.....	23
4.2 Critères de protection pour le service de recherche spatiale	24
4.3 Considérations générales applicables au partage dans le service de recherche spatiale	24
4.3.1 Brouillages en provenance de stations terriennes du service de recherche spatiale.....	25
4.3.2 Brouillages occasionnés aux engins de recherche spatiale	26
4.3.3 Brouillages occasionnés par les engins de recherche spatiale	26
4.3.4 Brouillages occasionnés à des stations terriennes de recherche spatiale	27
4.3.5 Limites fixées par l'UIT pour les rayonnements non désirées	27
Appendice 1 – Recommandations et Rapports UIT-R applicables au service de recherche spatiale...	29
Appendice 2 – Tableau des utilisations du SRS et limites de puissance surfacique correspondantes..	33

CHAPITRE 1

Introduction au service de recherche spatiale

L'Union internationale des télécommunications (UIT) a pour tâche de veiller à l'amélioration et à l'utilisation rationnelle des systèmes de télécommunication dans le monde. Le Secteur des radiocommunications de l'UIT (UIT-R) a pour rôle d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique des ressources naturelles limitées que sont le spectre des fréquences et l'orbite des satellites; il lui incombe aussi de gérer le service de recherche spatiale (SRS) qui constitue l'un des services scientifiques. Le service de recherche spatiale utilise des attributions de fréquences précises dont il est question dans le Règlement des radiocommunications de l'UIT (RR) (voir l'Appendice 2). L'utilisation des attributions de fréquences par le service de recherche spatiale est précisée dans les Recommandations UIT-R de la Série SA (voir l'Appendice 1), eu égard en outre aux caractéristiques techniques et aux procédures opérationnelles associées.

1.1 Recherche spatiale – Aperçu général

Les systèmes du service de recherche spatiale s'appuient sur un ensemble varié de disciplines scientifiques et de programmes technologiques au bénéfice de l'humanité tout entière. Les disciplines scientifiques fournissent des informations sur le système solaire, la nature et la structure de l'univers ainsi que sur l'origine et le devenir de la matière. Elles recouvrent les domaines suivants:

- la physique des relations Soleil-Terre;
- la cosmophysique;
- la recherche des systèmes planétaires.

Les programmes relatifs aux interactions entre le Soleil et la Terre ont pour thème l'étude du Soleil, l'activité solaire et l'influence exercée sur la Terre. Les études sont effectuées à l'aide d'un réseau d'engins spatiaux scientifiques situés dans de nombreuses régions de l'espace interplanétaire, en général entre le Soleil et la Terre, et équipés d'un ensemble d'instruments scientifiques permettant d'interpréter et de détecter les rayonnements électromagnétiques du Soleil ainsi que les particules et les oscillations du plasma.

La cosmophysique a pour objet l'étude des lois fondamentales de la physique dans notre système solaire et nous fournit des données qui servent à améliorer la conception de l'engin spatial, mais aussi de ses instruments et de ses capacités de navigation.

L'étude des planètes et de ses satellites, des astéroïdes et des comètes nous aide à connaître l'origine et l'évolution du système solaire. Les engins spatiaux, les sondes et les modules d'atterrissage planétaire nous fournissent des données approfondies sur les planètes et leurs satellites présents dans notre système solaire.

Les programmes technologiques de la recherche spatiale privilégient la mise au point et la validation dans l'espace des technologies de pointe nécessaires aux applications suivantes:

- fabrication et assemblage des structures spatiales;
- construction de systèmes électromécaniques;
- études du comportement des fluides et des phénomènes de transport;
- robotique pour l'assemblage des structures et le service d'entretien des satellites en orbite;
- techniques de traitement et de fabrication dans l'espace.

On notera en particulier que l'étude de la microgravité de l'espace à des fins scientifiques et commerciales permet à l'homme de mieux vivre et travailler dans l'espace pendant de longues périodes, tout en améliorant notre connaissance de la science des matériaux et des sciences biomédicales.

Les différents types de systèmes de recherche spatiale utilisés pour les travaux de recherche scientifique et technologique, au voisinage de la Terre ou dans l'espace lointain, comprennent des missions habitées (par exemple, l'exploration humaine, le transport de membres d'équipage et de personnel vers des avant-postes scientifiques, la conduite d'expériences et de travaux de recherche depuis l'espace) et des missions non habitées (par exemple, l'utilisation d'engins spatiaux robotisés pour la collecte d'échantillons physiques, l'approvisionnement ou l'entretien d'engins spatiaux de recherche, et l'utilisation d'engins spatiaux pour la

collecte de données de détection et d'observation), des réseaux de communication à la surface de la Terre, et des réseaux de communication en orbite géosynchrone ou au-delà. Les missions de recherche spatiale visant des objectifs situés à plus de 2×10^6 km de la Terre sont dites missions dans «l'espace lointain». Inversement, les missions restant à une distance de la Terre inférieure à 2×10^6 km sont communément appelées missions au voisinage de la Terre. Comme les systèmes utilisés dans l'espace lointain ont des caractéristiques uniques en leur genre, des portions spéciales de spectre leur ont été réservées pour leur permettre de communiquer avec succès sur les grandes distances requises. Pour des raisons de masse, de volume et de coût, les mêmes fréquences et les mêmes équipements sont utilisés dans toutes les phases des missions en espace lointain.

Les missions de recherche spatiale comprennent les phases suivantes: l'inspection avant le lancement, puis les opérations de lancement, de transfert, d'exploitation sur orbite et, dans le cas des missions habitées et des missions robotisées, le retour sur Terre et les opérations d'atterrissage. Dans chaque phase, il faut impérativement que les systèmes spécialisés de communication et de poursuite donnent des résultats probants. Pour les opérations de lancement, il est fait appel à des systèmes précis de localisation, de télécommande et de destruction pendant la phase critique de lancement ainsi que pour les opérations de sauvegarde. Dans le cas des opérations de transfert, il faut disposer de données de télécommande, de télémessure et de poursuite pour veiller à ce que l'engin spatial atteigne l'orbite voulue. En ce qui concerne les opérations sur orbite, il faut souvent s'appuyer sur des communications espace vers espace entre l'engin spatial concerné ainsi que sur des communications avec le sol, établies directement ou par le biais de satellites de communication géosynchrones appelés satellites relais de données. S'agissant des missions habitées, les fonctions de communication font intervenir les signaux vocaux et vidéo ainsi que les données de télécommande, de télémessure et de poursuite. Pour les missions robotisées, la vidéo peut également être nécessaire en plus des données de télécommande, de télémessure et de poursuite. Enfin, dans le cas des missions planétaires, en plus des communications entre l'engin spatial planétaire et la Terre, il peut être utile de prévoir des communications entre l'engin spatial sur orbite et le véhicule à la surface de la Terre.

1.2 Caractéristiques des missions de recherche spatiale

1.2.1 Durée des missions de recherche spatiale

La durée d'une mission de recherche spatiale comprend essentiellement la durée de vol (temps qui s'écoule entre le lancement et la destination finale) et la durée proprement dite de la mission (temps nécessaire pour l'expérimentation, l'acquisition des données et la réalisation des objectifs de la mission). Pour le retour d'échantillons et les missions habitées, la durée comprendra aussi le temps nécessaire pour revenir sur la Terre. Dans bien des cas, le vaisseau spatial reste fonctionnel bien au-delà de sa vie utile et continue de fournir des données très intéressantes à la communauté de la recherche spatiale.

Pour la plupart des missions effectuées dans l'espace au voisinage de la Terre, le temps de vol ne représente en général qu'une faible partie de la durée totale de la mission. En effet, la durée proprement dite des missions effectuées à proximité de la Terre par des robots peut compter quelque mois, voire quelques années. En revanche, les satellites relais de données et les stations spatiales, qui nécessitent une durée d'exploitation comprise entre 10 et 15 ans, constituent l'exception. Pour les missions habitées dans les régions orbitales et lunaires, la durée proprement dite de la mission peut varier de quelques jours à plusieurs mois.

En revanche, le temps de vol d'une mission dans l'espace lointain peut constituer une partie importante de la durée totale de la mission. Par exemple, une mission à destination de la planète Saturne, distante d'environ $1,58 \times 10^9$ km, peut durer entre 6 et 7 ans. Pendant la durée de vol, on procède à une interrogation périodique du déroulement du vol et de la charge utile de l'engin spatial. En l'occurrence, la durée proprement dite de la mission est en général de quelques années. La durée des missions robotisées et habitées à destination d'astéroïdes, de Mars et d'autres objets célestes, se compte en mois et en années.

1.2.2 Orbites des missions de recherche spatiale

Pour mener les activités de recherche spatiale, on utilise un certain nombre de types différents d'orbites de satellite. Le type d'orbite choisie et ses caractéristiques sont fonction des besoins recensés et de l'optimisation de la mission de recherche spatiale. Les orbites circulaires sont très largement utilisées pour la plupart des missions de recherche spatiale. Elles se caractérisent par un apoastre et un périastre identiques, c'est-à-dire que l'altitude d'un engin spatial est constante par rapport à la surface de la Terre ou de la planète décrivant une

orbite. S'agissant des missions de recherche spatiale effectuées autour de la Terre, les orbites sont généralement inclinées par rapport au plan de l'équateur et ont des altitudes comprises entre 300 et 1 000 km. Ces orbites étant proches de la Terre, elles sont appelées «orbites terrestres basses» (LEO).

Les orbites polaires sont des orbites circulaires ayant une inclinaison de près de 90 degrés. Elles sont utilisées pour les missions de recherche spatiale qui nécessitent une couverture intégrale des points de la surface de la Terre. Des communications directes peuvent être établies entre un satellite en orbite polaire et une station terrienne située dans les régions polaires sur chaque orbite du satellite.

Dans le cas des orbites héliosynchrones, il faut que le plan orbital du satellite reste pratiquement fixe par rapport au Soleil. Les inclinaisons de l'orbite sont en général d'environ 98 degrés. Ce type d'orbite est particulièrement indiqué pour les observations solaires, les observations de la Terre et certaines missions de prévisions météorologiques.

Les orbites elliptiques se caractérisent par un petit périhélie et par un grand apogée. Ces orbites, en particulier les orbites très elliptiques, offrent une plate-forme d'échantillonnage aux altitudes élevées et faibles et se prêtent à de nombreuses missions de surveillance scientifique. Ce type d'orbite se caractérise principalement par le pourcentage élevé de temps pendant lequel un satellite est vu par la station terrienne de son réseau. Toutefois, la force du signal peut varier sensiblement à mesure que la distance varie entre le satellite et la station terrienne.

L'orbite des satellites géostationnaires (OSG) décrit un anneau autour de l'équateur de la Terre à une altitude de 35 786 km. Les satellites placés sur cette orbite ont une durée de révolution égale à la période de rotation de la Terre. Par conséquent, un satellite placé sur cette orbite a une vue constante d'environ un tiers de la Terre et peut maintenir des contacts permanents avec une station terrienne située dans le champ de vision du satellite. Le service de recherche spatiale utilise l'OSG pour le positionnement des satellites relais de données (SRD) afin de communiquer en permanence avec l'engin spatial placé sur orbite terrestre basse.

On trouvera des informations sur les positions orbitales des SRD fonctionnant dans le service de recherche spatiale en consultant les Recommandations UIT-R suivantes:

- Recommandation UIT-R SA.1275 – Positions orbitales des satellites relais de données devant être protégées contre les émissions des systèmes du service fixe fonctionnant dans la bande 2 200-2 290 MHz.
- Recommandation UIT-R SA.1276 – Positions orbitales des satellites relais de données devant être protégées contre les émissions des systèmes du service fixe fonctionnant dans la bande 25,25-27,5 GHz.

Les orbites en halo sont des orbites autour d'un point d'équilibre entre deux corps célestes. L'orbite se trouve dans un plan normal au plan en visibilité directe entre les deux corps. Les points L1 et L2 de Lagrange, positionnés chacun à environ 1,5 million de km de part et d'autre de la Terre et sur l'axe Soleil/Terre, sont des exemples de points d'équilibre autour desquels on utilise des orbites en halo pour les missions de recherche spatiale.

D'une manière générale, les orbites de la Lune et des planètes qui sont circulaires par nature facilitent les expériences et les mesures de détection auxquelles il faut procéder pour remplir les objectifs de la mission. Les orbites de la Lune ont servi d'orbites de rendez-vous spatial pour les missions habitées à destination de la surface de la Lune. Les orbites des planètes jouent aussi le rôle d'orbites de satellites relais autour d'une planète. Pour de nombreuses missions, il faut déployer une sonde ou un véhicule de surface pour descendre à la surface de la planète et acquérir des données sur l'environnement et les milieux avoisinants. Du fait qu'ils sont limités par leur consommation d'énergie qui les empêche de renvoyer directement ces données à la Terre en parcourant des distances aussi grandes, ces engins spatiaux locaux transmettent donc l'information à l'engin spatial sur orbite qui assure le relais avec une station de réception située sur la Terre.

1.2.3 Types de missions de recherche spatiale

Pour les missions qui exigent le transfert d'un chargement ou de personnel comme dans le cas des missions Soyuz et Progress de l'Agence spatiale fédérale russe, le véhicule automatique de transfert (ATV) de l'Agence spatiale européenne, et le véhicule de transfert H-II (HTV) de l'Agence japonaise d'exploration aérospatiale, il faut que des services de communication soient établis avec une station terrienne, soit directement, soit par

l'intermédiaire de systèmes SRD et avec des véhicules placés sur une même orbite pour les opérations de rendez-vous spatial/accostage. Les données de télécommande, de télémessure et de poursuite sont transmises par les liaisons de communication. Les véhicules abritant un équipage ont des besoins audio et vidéo supplémentaires.

Les missions effectuées avec des véhicules spatiaux permanents, tels que la station spatiale internationale, ont besoin de disposer de services de communication avec des véhicules placés sur une même orbite et avec le sol. Comme dans le cas des véhicules de transfert, les plates-formes spatiales permanentes disposent de données de télécommande, de télémessure et de poursuite, auxquelles s'ajoutent les données audio et vidéo qui peuvent être fournies par des liaisons directes établies avec un réseau de stations terriennes ou par des liaisons indirectes via les systèmes SRD.

Les activités extra-véhiculaires (EVA, *extra-vehicular activity*) sont des excursions en dehors de la station de base, sur l'orbite (sortie dans l'espace) ou à la surface d'une planète. Les systèmes de communication utilisés pour les EVA assurent des liaisons audio et de données à faible débit entre l'astronaute et la station de base. Le système de communication devant être intégré dans la combinaison spatiale de l'astronaute, la taille et la puissance du système EVA sont donc considérablement limitées. Parmi les activités extra-véhiculaires généralement accomplies, il y a lieu de citer la construction, la maintenance et la réparation des satellites et autres véhicules spatiaux. Ces sorties interviennent généralement dans un rayon de 100 m d'un véhicule spatial sur orbite. S'agissant des activités extra-véhiculaires menées à partir des stations de base planétaires à la surface de la Lune, de Mars ou d'autres corps célestes, les opérations à effectuer porteront sur des distances pouvant atteindre des dizaines de kilomètres.

Les missions d'exploration de la Lune et des planètes ont pour objet d'effectuer des recherches scientifiques et techniques à l'aide d'engins spatiaux, de sondes ou de jeeps lunaires et de stations de base à la surface du corps céleste de façon à servir de points de communication pour les longues missions d'exploration par véhicules habités ou par robots. Dans le cas des missions d'exploration de la Lune et des planètes, il faut qu'il existe des communications à partir et à destination de la Terre ainsi que des communications locales à la surface des planètes.

Les missions d'interférométrie spatiale à très grande base (VLBI, *very long baseline interferometry*) permettent aux scientifiques d'obtenir une résolution angulaire des radiosources observées que les autres méthodes radioélectriques ou optiques ne permettent pas d'atteindre. Une corrélation croisée est effectuée entre l'amplitude et la phase des signaux provenant d'une source radioélectrique reçus au niveau de deux stations VLBI indépendantes ou plus, de façon à obtenir des informations détaillées concernant la position et la structure de la source. Les missions spatiales VLBI utilisent au moins une station spatiale afin d'obtenir des lignes de base d'observation d'un ordre de grandeur supérieur à toute ligne de base sur Terre. Les données collectées par les stations spatiales VLBI doivent absolument être transmises à la station terrienne en temps réel à des débits pouvant atteindre 8 Gbit/s. Pour obtenir une transposition en fréquence cohérente d'une fréquence étalon à la surface de la Terre par l'intermédiaire d'une liaison radioélectrique de transfert de phase Terre vers espace, il faut aussi disposer d'une liaison de transfert de phase espace vers Terre. Cette liaison retour est nécessaire pour étalonner les erreurs de phase introduites dans la liaison Terre vers espace. La liaison espace vers Terre peut être spécialement affectée à ce transfert de phase ou être utilisée simultanément pour le transfert des données depuis l'engin spatial.

Les missions SRD assurent des communications continues entre l'engin spatial LEO et une station terrienne. Elles peuvent prendre en charge simultanément plusieurs engins spatiaux utilisateurs dont les besoins en matière de données peuvent être faibles, voire très importants. En théorie, un système de trois SRD ayant une séparation angulaire de 120 degrés peut assurer une couverture intégrale de l'engin spatial LEO. Toutefois, certains facteurs comme le coût, le choix des positions orbitales des SRD et l'emplacement géographique des stations terriennes SRD, peuvent rendre extrêmement difficile la réalisation d'une telle constellation SRD idéale. En général, il est probable qu'une constellation de deux SRD sera déployée et qu'il se produira une certaine perte au niveau de la zone de couverture des engins spatiaux. Les communications seront momentanément interrompues entre l'engin spatial LEO et les deux SRD et, par conséquent, avec la station terrienne SRD lorsque l'engin spatial LEO pénètre dans l'ombre de la Terre, appelée «zone d'exclusion». Lorsque les engins spatiaux sont situés sur des orbites elliptiques ou qu'ils nécessitent des altitudes élevées, la gamme d'écart angulaire appliquée pour le pointage d'une antenne SRD limite encore davantage la couverture

de faisceau. La Recommandation UIT-R SA.1018 fournit des renseignements supplémentaires sur les éléments des missions SRD.

Les missions réalisées dans l'espace lointain permettent d'améliorer notre connaissance du système solaire et de l'espace en général à des distances au-delà de 2×10^6 km de la Terre. Ces missions se caractérisent par des distances extrêmes, certaines missions actuelles étant menées à plus de 17 milliards de km de la Terre. Du fait de ces distances phénoménales, il est impératif d'utiliser des équipements de communication extrêmement perfectionnés et de recourir à des technologies et à des techniques de codage de pointe pour permettre l'établissement de liaisons de radiocommunication fiables sur des distances aussi grandes.

1.3 Systèmes de recherche spatiale

1.3.1 Secteur terrien

L'emplacement des stations terriennes dépend de considérations d'ordre politique et économique, mais aussi des impératifs de la mission de recherche spatiale envisagée. Les stations terriennes font partie d'un réseau mondial de stations de communication et de poursuite et, en association avec des installations de traitement et de commutation et des centres de télécommande, forment le réseau de recherche spatiale. Les commutations et l'acheminement des données entre les installations de réseau sont généralement assurés par des systèmes de communication de Terre ou par des systèmes fixes par satellite.

Les antennes employées dans les stations terriennes de recherche spatiale au voisinage de la Terre sont essentiellement des réflecteurs paraboliques dont les diamètres sont compris entre 6 et 30 m. Par ailleurs, des antennes Yagi, des antennes en hélice, des antennes rideaux et des antennes à faisceau en éventail sont utilisées pour les opérations de poursuite. A noter, qu'il est tenu compte de certains facteurs comme les impératifs de la mission, les capacités de l'engin spatial, les caractéristiques orbitales, la fréquence de fonctionnement et la mobilité de l'antenne de station terrienne, qui permet un pointage exact, lorsqu'il s'agit de déterminer les dimensions et le type appropriés d'antenne à choisir pour une station terrienne. Ainsi, l'ouverture du faisceau d'antenne doit pouvoir se prêter à toute incertitude angulaire du pointage. La Recommandation UIT-R SA.1414 donne une description détaillée des stations terriennes SRD et de leurs antennes.

Les antennes de station terrienne de recherche dans l'espace lointain se caractérisent par leur diamètre très important (de 35 à 70 m), par des émetteurs de haute puissance et des récepteurs extrêmement sensibles, conditions sine qua non pour assurer des communications fiables sur les distances considérables que supposent généralement les missions de recherche dans l'espace lointain. Le gain maximal d'une antenne de station terrienne de recherche dans l'espace lointain est limité par sa taille et par le fait que sa forme, en raison des irrégularités de surface, n'est pas un paraboloïde parfait. Il convient de noter que différents facteurs comme la précision en matière de fabrication, les effets thermiques, la rigidité des structures d'appui, la déformation des surfaces due à la gravité, au vent et enfin, les différents angles d'élévation influent tous, à différents égards, sur la forme de l'antenne. Compte tenu de la taille importante des stations terriennes de recherche dans l'espace lointain et du coût considérable associé à leur construction, il n'en existe que quelques-unes, en nombre limité, dans le monde entier. L'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R SA.1014 décrit plus en détail les caractéristiques de ces antennes. Dans l'avenir, les systèmes fonctionnant autour de 283 THz pourraient être utilisés pour les communications dans l'espace lointain du fait de leur gain beaucoup plus élevé et de leur ouverture de faisceau réduite, qui peuvent être obtenus au moyen d'antennes plus petites. La Recommandation UIT-R SA.1742 présente des informations détaillées sur les caractéristiques techniques et opérationnelles des systèmes envisagés.

On trouvera dans la Recommandation UIT-R SA.509 un diagramme de rayonnement de référence d'une antenne de station terrienne à utiliser dans le service de recherche spatiale. Les méthodes de prévision des diagrammes de rayonnement des grandes antennes utilisées dans ce service sont exposées dans la Recommandation UIT-R SA.1345, alors que les diagrammes à utiliser pour les analyses de compatibilité dans les bandes des 32 GHz et des 37 GHz font l'objet de la Recommandation UIT-R SA.1811.

Le plus petit signal pouvant être détecté par un récepteur affecté à la recherche spatiale sera limité à la fois par le bruit ambiant produit dans le récepteur et par celui qui est imputable à des sources externes. Dans le cas des opérations menées dans l'espace lointain, la valeur limitée de la puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) de l'émetteur de l'engin spatial, combinée à des distances de propagation considérables, donne lieu à

des signaux extrêmement faibles dans la station terrienne de réception. Il faut donc que le bruit présent dans les récepteurs de station terrienne soit maintenu au niveau le plus faible possible pour permettre de détecter les signaux très faibles et pour réduire au minimum les impératifs de puissance de l'émetteur de l'engin spatial. Dans le cas des opérations de recherche spatiale menées au voisinage de la Terre, la puissance d'émission et la p.i.r.e. sont limitées à un niveau conforme aux valeurs de puissance surfacique stipulées dans le RR de l'UIT qui justifient la nécessité d'avoir des récepteurs à faible bruit.

La principale contribution au bruit total du système est constituée par le bruit de fond perçu par l'antenne. Ce bruit est fonction de la fréquence de fonctionnement, de l'angle d'élévation de l'antenne, des conditions météorologiques, du rayonnement du sol et du rayonnement thermique dans les lobes latéraux et les lobes arrière des antennes. Au-dessous de 1 GHz, le bruit du ciel résultant de la galaxie et des éruptions solaires augmente à mesure que la fréquence diminue. Au-dessus de 1 GHz, le bruit galactique est faible et le bruit du ciel, essentiellement dû à l'atmosphère de la Terre, commence à augmenter. Le bruit dû aux précipitations devient important au voisinage de 4 GHz et augmente avec la fréquence jusqu'à une valeur de 100 K ou plus à proximité de 15 GHz.

Les températures de bruit types des systèmes sont indiquées, pour les systèmes SRD, dans les tableaux de l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R SA.1414, et pour les systèmes du SRS exploités dans l'espace lointain, dans la Recommandation UIT-R SA.1014. De même, les Tableaux 1 et 2 ci-après donnent les températures de bruit types des récepteurs de station terrienne utilisés pour les opérations de recherche spatiale au voisinage de la Terre et dans l'espace lointain.

TABLEAU 1

**Températures de bruit types des récepteurs de station terrienne
utilisés pour les missions au voisinage de la Terre**

Gamme de fréquences		Température de bruit (K)
~2	GHz	150
10-11	GHz	160
13-15	GHz	300
18-26	GHz	200
37-38	GHz	200

TABLEAU 2

**Températures de bruit types des récepteurs de station terrienne
utilisés pour les missions dans l'espace lointain**

Fréquence		Température de bruit (K)	G/T (dB/K)
2 290-2 300	MHz	16-21	51
8 400-8 450	MHz	23-27	60,4
12,75-13,25	GHz	25-29	62
31,8-32,3	GHz	52-61	66,4

La puissance de l'émetteur de station terrienne et sa stabilité ne posent aucun problème technique grave. La puissance d'émission et la p.i.r.e. dépendront d'un certain nombre de facteurs tels que la fréquence de fonctionnement, la taille de l'antenne, le débit et les caractéristiques du système de réception de l'engin spatial.

Dans le cas des opérations à réaliser au voisinage de la Terre, on utilise des p.i.r.e. pouvant atteindre 60 dBW pour les voies de communication qui nécessitent un débit élevé, pour les opérations de sauvegarde et, enfin, pour les missions vers la Lune. Cette même p.i.r.e. doit atteindre 110 dBW pour la plupart des missions effectuées dans l'espace lointain; quant aux valeurs de p.i.r.e. de la station terrienne en direction de l'horizon, elles sont limitées par les dispositions de l'Article 21 du RR de l'UIT. Des restrictions supplémentaires doivent être appliquées au cas par cas afin de répondre aux besoins et aux procédures de coordination des stations terriennes.

1.3.2 Secteur spatial

Les engins spatiaux doivent faire face à des restrictions en matière de taille, de poids et de puissance et à la nécessité de disposer d'éléments remplissant les conditions voulues pour une exploitation dans l'espace. Il faut aussi que ces systèmes fonctionnent efficacement et avec un degré élevé de fiabilité dans l'environnement extrême et parfois hostile que constitue l'espace. Une défaillance du système peut se révéler être désastreuse et il n'est généralement pas possible d'y remédier. S'il est vrai que des progrès remarquables ont été accomplis dans le domaine des communications spatiales, un nouveau matériel de qualité spatiale propre à offrir une capacité accrue et des systèmes de communication plus efficaces aux bandes de fréquences élevées est en cours d'élaboration et sa réalisation s'étendra sur de nombreuses années.

L'environnement LEO est le principal pôle d'innovation et de recherche en matière de technologie spatiale. Un matériel prototype est embarqué sur un engin spatial expérimental et fait souvent partie des expériences sur les communications et la poursuite effectuées dans le cadre des missions de recherche au voisinage de la Terre et dans l'espace lointain aux fins d'essai et d'évaluation. C'est ainsi que les systèmes expérimentaux de communication et de poursuite qui ont satisfait aux normes de qualité spatiale sont approuvés en vue de leur utilisation dans les futures missions de recherche spatiale. Deux éléments clés du système de communication d'un engin spatial sont l'antenne et les récepteurs.

Les antennes équidirectives sont utilisées dans toutes les missions de recherche spatiale, soit en tant qu'antenne principale de l'engin spatial, soit pour maintenir le contact avec l'engin spatial indépendamment de l'altitude. Leur grand faisceau d'antenne assure une large couverture angulaire continue et minimise les exigences de stabilisation et de télécommande d'orientation de l'engin spatial. Alors que ce type d'antenne s'utilise dans certaines missions comme antenne de l'engin spatial principal, il ne s'emploie que pour les opérations de lancement, de sauvegarde et comme antenne à faible débit dans d'autres missions. L'absence de directivité peut déboucher sur de graves problèmes de propagation par trajets multiples lorsqu'un engin spatial LEO communique avec un SRD par l'intermédiaire d'une antenne équidirective. Ces problèmes, qui n'existent pratiquement pas avec des antennes directives, sont, dans une large mesure, éliminés grâce à l'utilisation du signal modulé d'un code de bruit pseudo-aléatoire.

Dans les missions de recherche spatiale, on utilise aussi des antennes à réseau à télécommande de phase électronique car le gain d'antenne est plus élevé que celui que l'on obtient avec les antennes équidirectives qui, de surcroît, permettent d'effectuer un pointage électronique dans la direction voulue. Dans de nombreuses expériences de recherche spatiale, on préfère recourir aux antennes à pointage électronique plutôt qu'aux antennes à pointage mécanique car elles évitent toute désorganisation des assemblages d'expériences scientifiques et de l'instrumentation, sensibles aux effets inertiels. Quant à l'engin spatial LEO, il a recours à la fois à des antennes réseaux complexes à télécommande de phase qui utilisent la compensation de phase pour orienter un faisceau dans la direction voulue et des antennes réseaux à faisceau orientable sphérique ou hémisphérique qui s'appuient sur la création de groupes d'éléments pour orienter les faisceaux en passant d'un élément à un autre.

Les SRD utilisent des antennes réseaux à télécommande de phase pour assurer un accès multiple à l'engin spatial LEO, à des débits faibles ou moyens dans la bande des 2 GHz. En mode émission, un faisceau d'antenne du système SRD est pointé et orienté par des changeurs de phase dans chacun des éléments d'émission. En mode réception, les signaux multiples de l'engin spatial LEO sont reçus par le SRD et transmis à une station terrienne centrale où ils sont démultiplexés et acheminés vers l'équipement conformateur de faisceau. La phase

et l'amplitude des signaux sont alors pondérées et combinées de manière linéaire en vue de l'obtention par synthèse d'un faisceau pour chaque engin spatial LEO. Le pointage du faisceau est calculé d'après les valeurs pondérées de chacun des signaux d'antenne reçus du SRD.

Il faut employer des antennes directives à faisceau orientable et à gain élevé dans les deux cas suivants: avec des engins spatiaux plus grands et plus robustes aux débits moyens ou élevés mais aussi avec des engins spatiaux devant communiquer sur de grandes distances. Les SRD ont recours à des antennes à réflecteur parabolique pour assurer à la fois les communications dans le sens Terre vers espace et dans le sens espace vers espace. Outre les limitations en termes de taille et de poids, les antennes d'engins spatiaux sont également limitées par la télécommande d'orientation de l'engin spatial, la précision et la capacité de pointage avec l'exactitude requise. Les antennes doivent maintenir une tolérance de fabrication dans les limites de leurs normes de conception, en dépit des gradients de température induits par les rayonnements solaires. La plupart des antennes d'engins spatiaux doivent assurer des fonctions simultanées d'émission et de réception et, dans le cas des opérations SRD, offrir des communications dans des bandes de fréquences différentes tout en veillant à l'exactitude du pointage de l'antenne et de la poursuite de l'engin spatial LEO. Pour mener à bien ces opérations délicates, on utilise un système d'alimentation complexe et une suspension télécommandée de type cardan. Le système d'alimentation est conçu pour optimiser le gain d'antenne sur la gamme prévue des opérations. La suspension de type cardan oriente mécaniquement l'antenne dans la direction voulue. Lorsqu'il faut procéder à des calculs du brouillage et en l'absence des diagrammes d'antenne directive d'engin spatial à gain élevé, on peut utiliser le diagramme de rayonnement de référence tiré de la Recommandation UIT-R S.672 pour représenter l'enveloppe des crêtes des lobes latéraux de l'antenne:

$$\begin{array}{llll}
 G(\varphi) = G_m - 3(\varphi/\varphi_0)^2 & \text{pour} & \varphi_0 \leq \varphi \leq 2,58 \varphi_0 \\
 G(\varphi) = G_m - 20 & \text{pour} & 2,58 \varphi_0 < \varphi \leq 6,32 \varphi_0 \\
 G(\varphi) = G_m - 25 \log(\varphi/\varphi_0) & \text{pour} & 6,32 \varphi_0 < \varphi \leq \varphi_1 \\
 G(\varphi) = 0 & \text{pour} & \varphi_1 < \varphi
 \end{array}$$

où:

$G(\varphi)$: gain à l'angle (φ) par rapport à l'axe (dBi)

G_m : gain maximal dans le lobe principal (dBi)

φ_0 : demi-ouverture du faisceau à 3 dB = $0,5 \sqrt{27000/(10^{G_m/10})}$ deg.

φ_1 : valeur de (φ) lorsque $G(\varphi)$ dans la troisième équation est égal à 0 dBi = $\varphi_0 10^{G_m/25}$ deg.

Il est d'usage d'éviter le recours à des récepteurs à faible bruit dans l'engin spatial pour minimiser la taille et le poids du système de communication et de poursuite. On utilise de puissants émetteurs de station terrienne pour compenser la faible sensibilité du récepteur de l'engin spatial. Etant donné que la plupart des antennes d'engins spatiaux voient l'émetteur de la station terrienne noyé dans un fond à 290 K (température de la surface de la Terre), l'utilisation de récepteurs à très faibles températures ne présente aucun avantage. Ces facteurs, associés au coût, à la complexité et à la fiabilité, déterminent la température de bruit du récepteur pour un engin spatial donné. Les températures de bruit types sont indiquées, pour les récepteurs SRD, dans les tableaux de l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R SA.1414, et pour les récepteurs des engins spatiaux du SRS fonctionnant dans l'espace lointain, dans la Recommandation UIT-R SA.1014. De plus, on trouvera dans les Tableaux 3 et 4 ci-après la température de bruit type des récepteurs d'engins spatiaux utilisés pour les missions effectuées au voisinage de la Terre ainsi que dans l'espace lointain.

TABLEAU 3

**Température de bruit type d'un récepteur d'engin spatial
pour les missions effectuées au voisinage de la Terre**

Gamme de fréquences		Température de bruit du récepteur (K)
100-500	MHz	700-900
500-1 000	MHz	600-700
1-10	GHz	600-800
10-20	GHz	800-1 200
≥ 20	GHz	1 200-1 500

TABLEAU 4

**Température de bruit type d'un récepteur d'engin spatial pour
les missions effectuées dans l'espace lointain**

Fréquence		Température de bruit du récepteur (K)
2 110-2 120	MHz	200
7 145-7 190	MHz	330
16,6-17,1	GHz	910
34,2-34,7	GHz	2 000

Il ressort de l'élaboration et de l'utilisation des émetteurs transistorisés que ces équipements sont en soi bien adaptés aux nombreuses applications à large bande de la recherche spatiale. En effet, leur petite taille, leur basse tension ainsi que leur capacité à traiter les problèmes de transfert de chaleur permettent d'obtenir un émetteur dont le poids global est sensiblement inférieur à celui de son homologue, constitué d'un tube à vide. Les tubes à vide, comme les tubes à ondes progressives, sont encore utilisés pour les missions qui nécessitent une puissance élevée et dont les opérations sont effectuées dans les bandes de fréquences élevées. Ce n'est pas tant la technologie de l'émetteur qui limite la puissance de ce dernier que la puissance électrique pouvant être fournie par l'engin spatial utilisé dans l'espace lointain.

Les limites imposées par le RR de l'UIT à la puissance surfacique au niveau de la surface de la Terre ont pour effet de restreindre la puissance maximale d'émission des engins spatiaux ainsi que la p.i.r.e. dans certaines bandes. En pareil cas, les missions de recherche spatiale ont recours aux techniques de modulation d'étalement du spectre pour préserver la performance des liaisons et assurer la conformité aux limites de puissance surfacique approuvées sur le plan international.

Les gammes de puissance d'émetteur pour les systèmes SRD sont indiquées dans les Tableaux de l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R SA.1414. L'émetteur de l'engin spatial utilisé pour les missions au voisinage de la Terre a une puissance comprise entre 2 et 10 W; elle est comprise entre 5 et 100 W pour les émetteurs d'engins spatiaux utilisés pour les missions effectuées dans l'espace lointain.

Dans l'avenir, les systèmes fonctionnant à des fréquences au-dessus de 200 THz pourraient également être utilisés pour les liaisons espace-espace au voisinage de la Terre et pour les liaisons espace-Terre dans l'espace lointain. Ces systèmes sont munis d'antennes très directives, mais exigent pour cette raison une extrême précision au niveau du pointage. Ces systèmes ne sont pas traités dans le RR de l'UIT, car la définition des ondes radioélectriques en fixe arbitrairement la limite à 3 THz. Cependant, les commissions d'études de l'UIT-R sont autorisées à mener des études et à établir des Recommandations concernant l'utilisation de ces systèmes.

CHAPITRE 2

Opérations de communication et de poursuite dans le service de recherche spatiale et applications techniques

Au niveau des engins spatiaux, les trois types de fonctions essentielles traités ci-après, à savoir les fonctions de télécommande, les fonctions de télémétrie et les fonctions de poursuite, sont dénommées fonctions d'exploitation spatiale. Dans une mission de recherche spatiale, les bandes attribuées servent à assurer les fonctions d'exploitation spatiale et les fonctions de télémétrie associées à la mission proprement dite, le tout avec un seul système de radiocommunication. L'utilisation du spectre des fréquences radioélectriques est alors plus efficace, et les besoins, consommation électrique, encombrement des éléments, poids, sont réduits. Les réalisations pratiques de systèmes de communication et de poursuite utilisées dans la recherche spatiale seront étudiées plus loin après une brève introduction des fonctions en question. Pour un débat plus détaillé sur les aspects techniques de l'exploration de l'espace lointain, se reporter à la Recommandation UIT-R SA.1014.

2.1 Fonctions

2.1.1 Transmissions de télécommande

Les transmissions de télécommande permettent de diriger et de contrôler le satellite, d'activer diverses fonctions relatives à la mission ou de modifier l'exploitation de l'engin spatial lui-même ou de la charge utile, et enfin de remédier aux dysfonctionnements éventuels. En ce qui concerne les opérations de lancement, la plupart des télécommandes sont enregistrées et exécutées par un séquenceur embarqué. Les télécommandes Terre-espace sont transmises pour être exécutées en temps réel ou mises en mémoire pour application séquentielle ultérieure. Les télécommandes essentielles sont souvent transmises en deux étapes (une première télécommande pour configurer l'opération et une seconde télécommande pour l'exécuter), et, dans ce cas, les deux télécommandes doivent être reçues pour que l'opération puisse avoir lieu.

2.1.2 Transmissions de télémétrie concernant l'engin spatial

Le sous-système de télémétrie de l'engin spatial communique des informations sur l'état des systèmes embarqués et de la charge utile, et communique les données de mesure rassemblées par les instruments de l'engin spatial à une station terrienne désignée. Le système précise également l'état de réception et d'exécution des télécommandes. Les données de télémétrie peuvent être mémorisées pour transmission ultérieure ou nécessiter une transmission en temps réel, dans le cas par exemple des opérations de lancement et des opérations d'urgence.

2.1.3 Transmissions de télémétrie concernant la mission

Le sous-système de télémétrie associé à la mission transmet vers la Terre les données scientifiques et les données techniques rassemblées par les systèmes expérimentaux et les capteurs actifs et passifs, ainsi que les données informatiques générées par l'engin spatial lui-même et sa charge utile (capteurs, modules d'atterrissage). Pour les missions habitées, le sous-système de télémétrie doit également transmettre des données audio et vidéo.

2.1.4 Poursuite

Les opérations de poursuite sont absolument essentielles pour toute mission de recherche spatiale. Les opérations de poursuite, qui permettent de rassembler les informations nécessaires pour déterminer le lieu et la vitesse de l'engin spatial, conditionnent également l'évaluation des performances de lancement et orbitales, les corrections de trajectoire, la détermination de la chronologie exacte des manœuvres critiques, par exemple l'allumage des rétrofusées, et enfin la prévision des données de visibilité de l'engin spatial et donc le pointage de ses antennes, données requises aussi bien par l'engin spatial lui-même que par les stations terriennes.

2.1.5 Sciences radio

Les sciences radio sont un domaine important des études scientifiques menées dans le cadre des missions dans l'espace lointain, pour lequel les systèmes de communication et de poursuite de l'engin spatial servent d'instruments scientifiques. Les signaux radio en provenance ou à destination d'un engin spatial de recherche dans l'espace lointain traversent une grande diversité de milieux et peuvent donc fournir de précieuses informations sur l'espace dans lequel ils se propagent, d'après l'effet que le milieu traversé exerce sur différents paramètres. Les techniques des sciences radio permettent également de mesurer les effets des forces agissant sur l'engin spatial, qui se manifestent sous la forme d'un décalage Doppler. Les paramètres mesurés (amplitude, phase, fréquence, contenu spectral, polarisation et vitesse de groupe) sont utilisés dans l'étude de divers phénomènes géophysiques: atmosphère planétaire, anneaux planétaires, surfaces planétaires, gravité planétaire et structure intérieure; ainsi que pour étudier les aspects de la théorie de la relativité générale et de la physique fondamentale relatifs à la gravitation. Les mesures dans le domaine des sciences radio font partie des plus exigeantes en termes de précision, d'exactitude, de stabilité et de techniques d'observation, et permettent souvent d'établir de nouvelles références en matière de qualité de fonctionnement et d'améliorer les techniques de communication dans l'espace lointain au bénéfice des autres utilisateurs.

2.2 Applications

2.2.1 Fiabilité, taux d'erreur sur les bits et marges de liaison

Le sous-système de télécommande présente une importance capitale pour la sécurité et le succès des missions de recherche spatiale, et doit fonctionner avec un degré de fiabilité élevé dans toutes les conditions de transmission défavorables, par exemple par mauvais temps ou en présence de brouillages radioélectriques. Pour les missions dans l'espace lointain, le temps de propagation du signal, qui doit être acheminé sur de très longues distances entre le satellite et la station terrienne, est un autre élément à prendre en compte, qui a une incidence sur la fiabilité des liaisons de télécommande. Les temps de reconnaissance excessifs ou les répétitions de télécommandes n'ayant pas abouti peuvent avoir des effets désastreux et être lourds de conséquences financières au niveau de la mission dans son ensemble.

L'impératif de fiabilité est généralement moins rigoureux dans le cas des sous-systèmes de télémesure et de poursuite que dans le cas des sous-systèmes de télécommande, puisqu'il est possible de remédier aux problèmes résultant de données incomplètes ou de données erronées en procédant à des retransmissions sans conséquences significatives sur la sécurité ou le succès de la mission. Toutefois, dans les phases critiques d'une mission, la fiabilité des sous-systèmes de télémesure et de poursuite est tout aussi importante que la fiabilité de la liaison de télécommande. Les missions habitées ajoutent d'autres impératifs: communication des données physiologiques vitales, clarté et continuité des transmissions audio, liaisons vidéo minimum, et il en résulte d'autres considérations relatives à la fiabilité.

Le critère de fiabilité d'une liaison de recherche spatiale en phase de mission critique a été fixé à 99,99%, ce qui entraîne les conséquences suivantes:

- liaisons Terre vers espace et espace vers Terre indépendantes des conditions météorologiques;
- valeurs de p.i.r.e. de station terrienne élevées, pour compenser la faiblesse du gain des antennes équidirectives utilisées par de nombreux engins spatiaux, tout particulièrement pendant les phases de lancement et de mise en orbite, et pendant l'intervention d'urgence;
- taux d'erreur sur les bits (TEB) inférieur à 1×10^{-5} (inférieur à 1×10^{-6} pour les SRD);
- codage des télécommandes, pour assurer un taux suffisant de rejet en cas d'erreur en salves, d'évanouissement ou de signaux parasites;
- largeur de bande suffisante pour obtenir toutes les informations essentielles.

Les restrictions de poids, les limitations de puissance électrique à bord des engins spatiaux et les types d'antennes utilisées par les satellites ont une incidence significative sur les possibilités de communication, de poursuite et de télémesure, et donc sur les marges de liaison des sous-systèmes. Les importantes distances de transmission sont un facteur additionnel à prendre en compte dans le cas des missions dans l'espace lointain. Les marges de liaison, dans le service de recherche spatiale, sont typiquement comprises entre 2 et 6 dB. La méthode préférée pour déterminer la qualité de la liaison dans le service de recherche spatiale est exposée dans

le Rapport UIT-R SA.2183. Les caractéristiques des liaisons et les méthodes de calcul associées en ce qui concerne les émissions à 283 THz dans l'espace lointain sont décrites dans la Recommandation UIT-R SA.1742. Des caractéristiques similaires pour les liaisons espace-espace du service de recherche spatiale à 354 THz et 366 THz sont présentées dans la Recommandation UIT-R SA.1805.

2.2.2 Débits de données et largeurs de bande

Parmi les facteurs qui permettent de déterminer les largeurs de bande appropriées, les débits de données requis sur les différents canaux de communication avec les engins spatiaux sont fondamentaux. Pour ce qui est des télémesures de mission, les débits de données dépendent du type de la mission de recherche spatiale considérée, du niveau technique du satellite, de la capacité de stockage de données du satellite et des tranches horaires envisageables pour les communications entre le satellite et la station terrienne. Les missions habitées imposent des communications audio et vidéo, fondamentales pour la sécurité des astronautes et le succès de la mission. Les liaisons de connexion SRD sont des liaisons composites réalisées par multiplexage des liaisons établies avec l'engin spatial LEO client et des canaux SRD de télémesure et de télémétrie, et du signal pilote.

La mesure de la distance est capitale dans tous les types de missions, aussi bien à proximité de la Terre que dans l'espace lointain, mais les contraintes sont beaucoup plus importantes dans l'espace lointain. Les considérations de précision de mesure de la distance sont souvent déterminantes dans la détermination de la largeur de bande totale des liaisons requises pour les missions dans l'espace lointain.

Lorsque la mission considérée doit faire intervenir plusieurs engins spatiaux, il peut arriver que ces engins spatiaux se trouvent simultanément dans le faisceau de l'antenne de station terrienne commune et qu'ils doivent aussi communiquer simultanément: il faut alors disposer d'une largeur de bande de station terrienne suffisamment importante pour accepter les signaux de plusieurs satellites.

On trouvera dans les Recommandations UIT-R suivantes des informations détaillées sur les besoins en largeur de bande associés aux missions de recherche spatiale:

- Recommandation UIT-R SA.364 – Fréquences de largeurs de bandes préférées pour les satellites habités ou non des services de recherche spatiale, proches de la Terre.
- Recommandation UIT-R SA.1015 – Recherche dans l'espace lointain: largeur de bande requise.
- Recommandation UIT-R SA.1019 – Systèmes à satellites relais de données: bandes de fréquences préférées et sens de transmission.
- Recommandation UIT-R SA.1344 – Bandes de fréquences et largeurs de bandes préférées pour la transmission de données d'interférométrie spatiale à très grande base (VLBI).

2.2.3 Ratios de rotation

La fréquence d'émission de l'engin spatial est souvent en relation cohérente avec la porteuse d'une station terrienne ou, dans le cas d'un système relais de données, d'un SRD. Cette relation de fréquence est définie sur la base d'un multiple spécifique dénommé «ratio de rotation», appliqué à l'engin spatial.

$$Fréquence_{émise} = Fréquence_{reçue} \times ratio \text{ de rotation}$$

Dans le service de recherche spatiale, le ratio de rotation dépend de la bande de fréquences utilisée (Tableau 5):

TABLEAU 5

Ratios de rotation dans le service de recherche spatiale

Bande de fréquences (GHz/GHz)	Ratio de rotation (Liaison montante/liaison descendante)
2/2	240/221
8/7	880/749
15/13	1 600/1 469
32/34	3 328/3 599 3 344/3 599 3 360/3 599

2.2.4 Multiplexage

Dans le service de recherche spatiale, on utilise aussi bien des techniques de multiplexage par répartition dans le temps (MRT) que des techniques de multiplexage par répartition en fréquence (MRF). Pour les missions dans l'espace lointain, le MRT sert à regrouper en un seul flux de données les paquets numérisés émis par les différents instruments embarqués, ce qui facilite la transmission normalisée et automatisée des données source. Dans le cas d'un système SRD, le MRT sert à relayer les télécommandes destinées aux engins spatiaux qui assurent l'accès multiple et à aménager des canaux discrets entre les stations au sol et l'engin spatial.

On utilise également le MRF dans les systèmes SRD. Les données de télécommande sont conditionnées et ajoutées modulo-2 de façon asynchrone au code de bruit pseudo-aléatoire (PN) du canal de télécommande (l'engin spatial LEO utilise le code de pseudo-bruit du canal de télécommande pour l'acquisition du signal). Le code et les données servent alors à assurer la modulation biphase de la porteuse FI du canal de télécommande. Lorsqu'il faut mesurer la distance, un code de pseudo-bruit long assure la modulation biphase de la porteuse FI de mesure de distance. Le canal de mesure de distance est alors combiné au canal de télécommande en quadrature de phase RF. La sortie FI du modulateur quadriphasé est alors égalisée, convertie en fréquence, amplifiée et commutée au combineur radiofréquence au niveau duquel un signal composite de liaison aller est produit passivement avec les signaux destinés aux autres engins spatiaux LEO, le canal aller de télécommande SRD et les informations de tonalité pilote. Ce signal composite est enfin acheminé vers l'antenne d'émission choisie pour la transmission vers le SRD. Au niveau du satellite SRD, le signal reçu est converti en fréquence intermédiaire, amplifié, filtré et démultiplexé. Les signaux destinés aux différents engins spatiaux LEO sont alors convertis en fréquence en fonction des besoins, amplifiés et transmis par l'antenne appropriée. Le canal aller de télécommande du SRD et la tonalité pilote sont convertis en fréquence puis envoyés au sous-système d'exploitation spatiale du SRD.

Dans le sens retour, les opérations sont analogues, mais le flux du signal est alors inversé. Les signaux d'un engin spatial LEO sont reçus par l'antenne du SRD, amplifiés, ramenés à la fréquence intermédiaire et transmis vers le système de traitement retour, au niveau duquel ils sont multiplexés avec les signaux reçus des autres engins spatiaux LEO, les données de télémétrie SRD et la tonalité pilote de la liaison de retour. Ce signal composite de liaison de retour passe alors par un surconvertisseur de fréquence, puis il est amplifié et transmis vers la Terre par l'antenne de liaison de connexion SRD. Les signaux des engins spatiaux LEO présentant des canaux de retour à débit binaire très élevé ne sont pas multiplexés avec les autres signaux reçus, mais acheminés vers un processeur de retour spécialisé, au niveau duquel, en sortie des étages de surconversion de fréquences et d'amplification, ils sont transmis à la station terrienne de réception sur une liaison de retour spécialisée.

2.2.5 Codage de correction d'erreur et codage du bruit pseudo-aléatoire

On utilise fréquemment des techniques de codage de correction d'erreur pour améliorer le TEB des liaisons de communication du service de recherche spatiale, mais, du fait que ces techniques introduisent un certain degré de redondance dans le message avant la transmission, il faut alors prévoir une augmentation de la largeur de bande du signal. Comme ce type de codage permet de corriger les erreurs de transmission, on peut alors réduire

la puissance d'émission du signal. Dans le cas d'engins spatiaux limités en alimentation électrique, il peut être intéressant de recourir à une légère correction d'erreur par codage pour améliorer la marge du système.

Les codes de correction d'erreur peuvent servir à corriger des erreurs sur un seul bit ou des erreurs en salves. Il faut établir un compromis entre d'une part l'efficacité de la correction d'erreur, selon le type d'erreur considéré, et d'autre part le coût et/ou le retard de propagation inévitable dans la pratique. Le code de correction d'erreur le plus souvent utilisé dans le service de recherche spatiale est un code à convolution transparent à débit $1/2$, longueur de contrainte 7, parfaitement adapté aux canaux où le bruit est essentiellement gaussien. L'utilisation d'un code à convolution au niveau de l'engin spatial et d'un décodage séquentiel au niveau du terminal au sol permet d'obtenir une amélioration de la qualité générale de fonctionnement du système, indépendamment de la technique de modulation. On ajoute en général un codage Reed-Solomon (RS) pour réduire la probabilité d'erreur plutôt que de réduire le rapport E_b/N_0 . Le codage RS que l'on utilise très souvent dans les missions concernant l'espace lointain, est un système de correction d'erreurs en salves puissant qui présente un taux de non-détection d'erreurs extrêmement faible. Ce type de codage peut être utilisé seul, offrant alors une excellente correction aval dans un canal présentant une caractéristique de bruit en salves, ou être concaténé avec des codes à convolution, le code à convolution étant alors le code interne et le code RS le code externe. Cette configuration peut également être utilisée avec un entrelacement. L'entrelaceur placé entre le code RS (externe) et le code à convolution (interne) décompose toute salve apparaissant à la sortie du décodeur à convolution.

Un système de codage par bruit pseudo-aléatoire (pseudo-bruit) est un système intégré qui permet d'intégrer plusieurs fonctions (par exemple transfert de données et mesure de distance) dans un seul signal. De tels systèmes sont fréquemment utilisés dans les missions de recherche spatiale, aussi bien à proximité de la Terre que dans l'espace lointain. Un système de codage pseudo-bruit confère une protection contre les brouillages sur trajets multiples, même aux très faibles altitudes de la phase initiale de lancement de l'engin spatial. Les sources brouilleuses à bande étroite sont rejetées par le récepteur de verrouillage du code de pseudo-bruit tandis que les signaux brouilleurs et les bruits à large bande sont rejetés lorsqu'un signal bande étroite est démodulé par le récepteur de verrouillage de phase. Les systèmes de codage pseudo-aléatoire présentent un autre avantage, en ce sens que la modulation du pseudo-bruit répartit la puissance de l'émetteur sur une largeur de bande plus importante, de sorte que la puissance surfacique à la surface de la Terre est inférieure ou égale aux niveaux spécifiés dans le RR de l'UIT.

On utilise les systèmes de codage pseudo-aléatoire pour les communications SRD, car ces systèmes permettent d'identifier positivement et de multiplexer les signaux émis par plusieurs engins spatiaux sur un canal commun. La coordination des bibliothèques de codes de pseudo-bruit permet d'assurer l'interopérabilité requise entre les diverses instances et d'éviter les brouillages mutuels. Deux catégories de codes de pseudo-bruit existent dans les bibliothèques de codes, à savoir les codes Gold (codes courts) et les codes de longueur maximale (codes longs). Les codes Gold, qui présentent une faible corrélation croisée, permettent, par leur brièveté, une acquisition très rapide du signal. Les codes Gold sont utilisés sur les canaux de télécommande des liaisons aller et pour les transmissions d'engin spatial exigeant une liaison de retour non cohérente. Les codes de longueur maximale, considérablement plus longs que les codes Gold, servent à obtenir une bonne résolution d'ambiguïté de distance.

En utilisant des codes de pseudo-bruit aller et retour synchrones, on obtient des mesures de distance précises (répétition cohérente) par comparaison des phases relatives des générateurs de code de pseudo-bruit d'émission et de réception au niveau du terminal au sol. Le système peut offrir une compensation d'effet Doppler pour les liaisons SRD de la station terrienne à l'engin spatial et de l'engin spatial à la station terrienne: ainsi, on a la certitude que tout effet Doppler éventuellement dû au mouvement du SRD n'altérera pas ou ne faussera pas la qualité de fonctionnement globale du système.

2.2.6 Techniques de modulation

S'il est vrai que l'on continue d'utiliser des techniques de modulation analogique dans certaines missions de recherche spatiale, on s'attend à ce que la rapide généralisation de l'emploi des systèmes de modulation de phase numériques se traduise tôt ou tard par l'abandon complet des systèmes analogiques. Pour les missions dans l'espace lointain nécessitant des débits binaires de télémétrie inférieurs à 4 kbit/s, on utilise une modulation de phase binaire d'une sous-porteuse en onde carrée avec modulation en phase ultérieure de la

porteuse. Avec un indice de modulation approprié, on obtient une porteuse résiduelle qui sert à suivre le signal reçu. L'utilisation de cette technique permet de faire en sorte que le signal «données» soit largement à l'extérieur de la largeur de bande de la boucle d'asservissement de la porteuse au niveau du récepteur, de simplifier les systèmes embarqués et de conférer à la liaison de télécommunication une fiabilité et une qualité de fonctionnement optimales.

Pour les missions à proximité de la Terre et les systèmes SRD, on utilise différentes variantes de modulation de phase. Pour les missions à proximité de la Terre, on a généralement recours à une modulation par déplacement de phase bivalente (MDP-2) dans le cas d'un canal donné unique ou à une modulation par déplacement de phase quadrivalente (MDP-4) dans le cas de canaux indépendants, et à une modulation à déplacement minimal par filtre gaussien (MDMG) ou à une modulation MDP-8 pour des transmissions efficaces en largeur de bande. Lorsqu'ils sont envisageables, les systèmes à satellites relais de données s'avèrent particulièrement indiqués pour les communications associées aux missions à proximité de la Terre; ces systèmes font intervenir, en complément d'une MDP-4 non symétrique, un étalement de bruit pseudo-aléatoire. Les systèmes fonctionnant au-dessus de 200 THz utilisent généralement des techniques de modulation d'impulsions en position (PPM), qui permettent de détecter directement le signal émis et suppriment le besoin d'utiliser des récepteurs cohérents.

2.2.7 Acquisition

On entend par acquisition l'établissement, entre un engin spatial et une station terrienne, d'une liaison de communication permettant l'écoulement ininterrompu des données entre ces deux éléments. Pour les missions dans l'espace lointain, les missions SRD, les missions habitées à proximité de la Terre et les missions en temps réel, l'acquisition est un élément fondamental de la séquence des événements en communication.

La plupart des communications de recherche spatiale imposent un fonctionnement cohérent, qui garantit la disponibilité des importantes données de poursuite de l'engin spatial. Pour ce type d'opération, il faut tout d'abord établir une liaison aller de la station terrienne à l'engin spatial avant d'établir la liaison retour puis le flux de données entre l'engin spatial et la station terrienne. On peut ainsi faire en sorte que la porteuse de retour émise par l'engin spatial et le code de pseudo-bruit (mesure de distance) soient liés de façon cohérente et verrouillés sur le signal reçu sur la liaison aller établie à partir de la station terrienne. Avec un SRD, la situation est encore plus complexe, puisqu'il faut acheminer les signaux aller et les signaux retour par l'intermédiaire du SRD,

En fonctionnement non cohérent, il n'est pas nécessaire d'acquérir la fréquence et le code de la porteuse aller avant d'émettre le signal de retour. L'engin spatial rayonne en direction d'une station terrienne de réception une p.i.r.e. compatible avec son débit de données. La connaissance préalable de la fréquence de l'oscillateur local de l'engin spatial permet à la station terrienne (ou au SRD) de rechercher et d'acquérir le signal qui lui est destiné et de se verrouiller sur ce signal. L'effet Doppler, dans une seule direction, est déterminé par la fréquence de réception et la tolérance de l'oscillateur local de l'engin spatial.

Les séquences d'acquisition sont généralement brèves, de l'ordre de 5 à 10 s. Toutefois, en présence de brouillages, lesquels peuvent entraîner la perte du signal ou la perte de synchronisation de la porteuse de poursuite, la réacquisition du signal peut nécessiter plusieurs minutes.

2.2.8 Techniques de poursuite

Pendant la phase de lancement, la localisation se fait par radar. Pour éviter d'avoir à se baser sur des échos trop faibles, on utilise souvent des engins spatiaux équipés de balises ou de répéteurs de poursuite. En général, le phénomène d'affaiblissement dû à l'atmosphère limite la localisation par radar au-dessous de 6 GHz.

Les techniques de poursuite avec mesure de la distance et des variations de la distance cohérente ou non cohérente permettent d'obtenir une précision supérieure à celle des réseaux de radar au sol. On calcule la distance en mesurant la durée du trajet aller-retour du signal d'une station terrienne à l'engin spatial et de l'engin spatial à cette station terrienne. La variation de distance, c'est-à-dire la vitesse, est déterminée par mesure de la variation de fréquence due à l'effet Doppler. Dans un système non cohérent, l'oscillateur local de l'engin spatial produit et transmet une porteuse de référence dont la fréquence est connue de la station terrienne de réception. Au niveau de la station terrienne, un démodulateur Doppler compare la fréquence reçue à une fréquence de référence de génération locale, et calcule ensuite la variation due à l'effet Doppler.

Dans un système cohérent, les mesures de distance et d'effet Doppler se font sur les deux sens du trajet. La station terrienne transmet la porteuse modulée par un code de mesure de distance spécifique. L'engin spatial reçoit cette fréquence et la verrouille en phase, puis génère une porteuse en cohérence avec le signal reçu, dont la fréquence est fondée sur le taux de rotation défini par l'administration spatiale ou le réseau. Un code de mesure de distance synchronisé avec le code de mesure reçu est généré par l'engin spatial et sert à moduler la fréquence d'émission. La station terrienne reçoit et verrouille en phase le signal entrant et le compare à la fréquence de référence initialement rayonnée par la station terrienne, ce qui permet de mesurer l'effet Doppler. Les mesures de distance sont faites au niveau de la station terrienne par mesure du temps écoulé entre la transmission aller des éléments du code de mesure de distance et la réception de ces éléments renvoyés à la station terrienne.

L'interférométrie à très grande ligne de base (VLBI) est principalement utilisée pour la recherche astronomique et géodésique. Elle sert à définir des repères céleste et terrestre pour la navigation lors des missions dans l'espace lointain. Un catalogue des sources radioélectriques extragalactiques définit le cadre céleste, des tableaux de coordonnées de stations et des modèles géodésiques définissent le repère terrestre, et des tableaux d'orientation de la Terre (précession, nutation, temps UT1, mouvement polaire) relient ces deux repères. L'interférométrie VLBI permet d'estimer les paramètres définissant les repères en mesurant avec précision la différence entre les temps d'arrivée de signaux émis par des sources radioélectriques extragalactiques et reçus au niveau de deux stations terriennes séparées par une grande distance. Par exemple, si l'on fait plusieurs mesures, on peut déterminer les emplacements des stations avec une précision relative de 1 cm. Pour définir des repères à l'aide de l'interférométrie VLBI, on utilise des fréquences voisines de 2, 8 et 32 GHz.

La précision de navigation des engins spatiaux dépend d'une connaissance exacte des paramètres qui définissent le système de coordonnées de la navigation. Par exemple, une erreur de 3 m sur la position supposée de la station terrienne peut entraîner une erreur de 700 km dans la position calculée d'un engin spatial à une distance égale à celle de Saturne.

Outre son utilisation pour définir des repères, l'interférométrie VLBI sert également de base à une technique appelée Delta-DOR (*differential one-way range*), qui permet de mesurer directement la position angulaire de l'engin spatial. Les mesures de la position angulaire sont un complément naturel des mesures de la distance de visibilité directe et de l'effet Doppler. Deux stations terriennes ou plus observent, alternativement, le signal d'un engin spatial et une source radioélectrique extragalactique de position angulaire voisine, choisie dans le catalogue céleste. La mesure précise du temps de propagation pour chaque source et la connaissance des paramètres des repères de référence permettent de déterminer la position angulaire de l'engin spatial par rapport aux sources célestes.

La mesure des distances à l'aide de signaux (*ranging*) consiste à transmettre deux fréquences ou plus afin de créer un signal de largeur de bande suffisante pour pouvoir effectuer une mesure de temps de propagation de groupe (c'est-à-dire une tonalité de mesure de distance, ou simplement une tonalité). Les tonalités majeures et mineures sont de l'ordre du kHz et du MHz. On utilise des tonalités latérales pour résoudre les ambiguïtés. Des systèmes de mesure de la distance utilisant le pseudo-bruit, munis d'horloges fonctionnant à des fréquences de l'ordre du MHz, sont utilisés pour les opérations dans l'espace lointain. L'interférométrie VLBI pour les engins spatiaux nécessite un espacement des tonalités compris entre 1/5 500 et 1/400 par rapport à la fréquence de la porteuse principale de l'engin spatial, pour pouvoir mesurer avec précision le temps de propagation. Pour un fonctionnement dans la bande des 8 GHz, on obtient des valeurs de tonalité comprises entre 1,5 MHz et 20 MHz.

Le système BRTS (*bilateration ranging transponder system*) permet de calculer avec précision les paramètres orbitaux des satellites relais de données par l'intermédiaire de répéteurs fixes installés en différents points de la Terre et dans chaque SRD. La méthode de triangulation permet de connaître les distances au SRD et la position du SRD par rapport à deux points de coordonnées connus, et d'obtenir des données de poursuite pour le calcul précis des éphémérides de chaque SRD.

CHAPITRE 3

Considérations générales relatives aux bandes de fréquences utilisées pour les missions de recherche spatiale

Divers facteurs déterminent les valeurs de fréquence convenant spécifiquement aux missions de recherche spatiale: cahiers des charges de la mission considérée, disponibilité et coût des équipements, considérations de propagation et de rayonnement, qualité de fonctionnement de la liaison, attributions de fréquences existantes. L'évolution des cahiers des charges des missions et les phénomènes physiques sont les éléments de base qui interviennent dans la définition des besoins de nouvelles attributions pour la recherche spatiale.

3.1 Considérations relatives aux missions

Dans les missions de recherche spatiale, il faut disposer d'un grand nombre de données pour les opérations de télécommande, de télémétrie et de poursuite. Pour les missions habitées, il faut également des données audio et vidéo en temps réel. Les données requises sont en général multiplexées sur une seule porteuse, ce qui permet d'utiliser le spectre avec efficacité.

En général, la largeur de bande disponible est d'autant plus importante que la fréquence utilisée est élevée. Avec une largeur de bande importante, on peut envisager à la fois des débits de données élevés, des communications vidéo et des systèmes de codage complexes qui permettent de réduire efficacement le taux d'erreur et la sensibilité aux brouillages.

Avec un espacement angulaire des engins spatiaux suffisant, on peut réutiliser les fréquences, mais il faut prévoir des fréquences différentes lorsque les caractéristiques orbitales et les impératifs de transmission sont susceptibles d'être à l'origine de brouillages.

Pour une poursuite précise, il faut prévoir une relation cohérente (taux de rotation adapté) entre les fréquences des signaux Terre vers espace et les fréquences des signaux espace vers Terre, et l'on y parvient en veillant à ce que la séparation en fréquence des liaisons aller et des liaisons retour soit comprise entre 6 et 10% des valeurs de fréquences les plus élevées.

Les bandes de fréquences convenant aux capteurs actifs et passifs dépendent des données recherchées quant aux caractéristiques de l'objet, à l'environnement spatial ou au phénomène spatial étudié. Les bandes de fréquences sont choisies en fonction des lois de la physique parmi les fréquences optimales pour les recherches scientifiques. Les largeurs de bande déterminent le degré de résolution et de précision des données pouvant être obtenu.

Les missions dans l'espace lointain imposent des communications sur des distances extrêmement longues, de sorte qu'au niveau des récepteurs le signal est très faible. Les récepteurs doivent donc être très sensibles, c'est-à-dire qu'ils sont également sensibles aux brouillages occasionnés par d'autres transmissions. En conséquence, pour éviter les risques de brouillage, il faut choisir pour la recherche dans l'espace lointain des fréquences qui ne soient pas également attribuées pour la recherche spatiale à proximité de la Terre. Les missions interplanétaires constituent une exception à cette règle, puisque les communications se font alors sur des trajectoires qui font intervenir à la fois le voisinage de la Terre et l'espace lointain, et cette catégorie recouvre les missions humaines d'exploration planétaire et les missions dans lesquelles on cherche à ramener sur notre planète des échantillons d'autres planètes. Pour ce type de mission, les meilleures fréquences se situent dans la bande des 37 et dans la bande des 40 GHz.

3.2 Considérations relatives aux équipements

Au niveau des équipements, certains facteurs qui dépendent de la fréquence soit ont une incidence directe sur la qualité de fonctionnement des liaisons (gain d'antenne, efficacité de l'antenne, précision de pointage) soit, sans se répercuter directement sur la qualité de la liaison, doivent être pris en compte dans le choix des fréquences. Pour des opérations d'émission et de réception simultanées avec une seule antenne, les bandes appariées Terre vers espace et espace vers Terre doivent présenter un espacement correspondant à 6-7% de la

fréquence supérieure au voisinage de la Terre et à 8-20% de la fréquence supérieure dans le cas des missions dans l'espace lointain.

Le diamètre des antennes d'engin spatial est limité par des considérations d'encombrement et de poids et des considérations techniques dans le cas des grandes antennes déployables, ainsi que par la capacité du satellite à pointer l'antenne avec la précision requise. La gamme de fréquences comprise entre 100 MHz et 1 GHz convient pour les engins spatiaux dotés d'antennes à diagramme de rayonnement large ou équidirectif et pour des transmissions à bande étroite, pour les stations terriennes simples sans antenne de poursuite. Dans la gamme 1-10 GHz, les antennes d'engin spatial présentent des gains compatibles avec les impératifs de stabilisation d'attitude et d'orientation des faisceaux. Les valeurs de précision de surface et de précision de pointage requises pour les stations terriennes importantes peuvent également être respectées dans cette gamme, qui par ailleurs se prête à l'exploitation des systèmes de poursuite de précision et de communication à large bande.

La disponibilité de matériels adaptés à un fonctionnement dans l'espace pourrait constituer un facteur de limitation dans l'utilisation des fréquences élevées. A l'heure actuelle, les équipements de recherche spatiale les plus stables sont les équipements mis au point pour les attributions dans les gammes des 2 GHz et des 7/8 GHz, essentielles pour obtenir des liaisons indépendantes des conditions météorologiques. Ce type d'équipement est également intéressant et facilement disponible pour les petits projets ou les missions de moindre importance, avec des débits de données peu élevés et des contraintes budgétaires. On disposera prochainement de matériels conçus pour les attributions dans la gamme des 27/32/34 GHz, présentant l'avantage d'une largeur de bande disponible plus grande pour les engins spatiaux au voisinage de la Terre et dans l'espace lointain.

Les antennes de station terrienne utilisées pour les missions dans l'espace lointain sont en général de grosses antennes paraboliques orientables, extrêmement onéreuses et donc assez rares. En conséquence, on ne dispose pour les missions dans l'espace lointain que d'un très petit nombre d'antennes fixes de grand diamètre.

3.3 Phénomène de propagation et de rayonnement

Les liaisons de télécommunication entre les stations terriennes et les satellites de recherche spatiale traversent nécessairement l'atmosphère terrestre où les phénomènes d'absorption, de précipitation et de diffusion se répercutent sur la propagation des signaux de radiocommunication et limitent l'utilisation d'un certain nombre de bandes de fréquences. Les précipitations, et tout particulièrement la pluie, absorbent et dispersent les ondes radioélectriques et peuvent ainsi entraîner un important affaiblissement du signal. Quel que soit le taux de précipitation considéré, l'affaiblissement spécifique augmente fortement jusqu'à environ 100 GHz, mais, au-delà de cette limite, ne s'accroît pas sensiblement en fonction de la fréquence. Pour les pays situés dans des régions très pluvieuses, le choix des fréquences est critique si l'on veut maintenir une qualité de fonctionnement élevée dans des conditions climatiques défavorables.

L'absorption moléculaire est essentiellement imputable à la vapeur d'eau et à l'oxygène de l'atmosphère. Les traces de gaz, en l'absence de vapeur d'eau, peuvent également être à l'origine d'un important affaiblissement aux fréquences supérieures à environ 70 GHz. Les raies d'absorption de la vapeur d'eau sont centrées sur 22,235 GHz, 183,3 GHz et environ 325 GHz. Les raies d'absorption de l'oxygène s'étendent de 53,5 à 65,2 GHz, et l'on relève par ailleurs une raie isolée centrée sur 118,74 GHz. A l'avenir, il pourra être souhaitable d'exploiter des stations relais géostationnaires fonctionnant à des fréquences relativement opaques à la transmission des signaux radioélectriques à travers l'atmosphère terrestre, ce qui permettra de limiter les brouillages entre ces stations relais et les engins spatiaux d'une part et les stations de Terre d'autre part.

La température de bruit du ciel, pour une antenne de station terrienne, est fonction de la fréquence, de l'angle d'élévation de l'antenne et des conditions atmosphériques. Au-dessus d'environ 4 GHz, les précipitations peuvent entraîner une augmentation du bruit du ciel plusieurs fois plus importantes que la température de bruit du récepteur. La température de bruit du ciel vue d'un engin spatial est déterminée avant tout par les corps célestes (Lune et planètes) qu'il faut prendre en compte dans la plupart des missions de recherche spatiale. Le Soleil, qui présente une température de rayonnement de corps noir de 6 000 K, augmente fortement la température de bruit des systèmes, de sorte que l'on évite généralement les transmissions pour lesquelles il faut pointer une antenne de réception vers le Soleil ou au voisinage de cette étoile. Les températures de rayonnement de corps noir de la Lune et des planètes sont comprises entre environ 50 et 700 K (celle de la Terre étant de

290 K). Dans de nombreuses missions au voisinage de la Terre, notre planète est généralement à l'intérieur du lobe principal de l'antenne de l'engin spatial ou de l'antenne du SRD considéré, et contribue à la température de bruit globale du système de réception. La température de bruit des systèmes des engins spatiaux type est comprise entre 600 et 1 500 K.

Les fréquences inférieures à 100 MHz ne sont généralement pas retenues pour la recherche spatiale en raison du fait que les phénomènes ionosphériques, les bruits cosmiques et les bruits artificiels sont autant d'obstacles à l'utilisation de ces fréquences. Entre 100 MHz et 1 GHz, l'absorption par l'atmosphère est peu importante et les conditions atmosphériques ont très peu d'effet sur la propagation du signal. Toutefois, le bruit de fond est relativement élevé, son importance étant fonction de l'inverse du carré de la fréquence, $1/f^2$, de sorte que l'utilisation de récepteurs à faible bruit ne donne pas d'amélioration sensible de la qualité de fonctionnement dans cette gamme de fréquences. Dans la gamme 1-10 GHz, l'effet des conditions atmosphériques est très faible, tout particulièrement dans la partie inférieure de cette gamme, et l'on peut donc envisager des communications pour ainsi dire indépendantes des conditions atmosphériques. Le bruit galactique et le bruit atmosphérique sont peu importants, ce qui permet d'utiliser des récepteurs à faible bruit. Au-dessus de 10 GHz et jusqu'à 275 GHz, la propagation des signaux dans l'atmosphère se fait dans des conditions de fort affaiblissement imputable essentiellement aux précipitations et à l'absorption par les gaz. Ces deux phénomènes ont une incidence significative sur les trajets de communication Terre vers espace.

Du fait que les missions dans l'espace lointain font intervenir de très grandes distances, il faut, pour déterminer l'effet des particules chargées sur la vitesse de propagation, utiliser simultanément des fréquences cohérentes dans au moins deux bandes de fréquences largement séparées. La précision de la navigation dépend de la détermination de la position et de la vitesse de l'engin spatial par des mesures de phase et de temps de propagation de groupe sur les signaux reçus. La vitesse de propagation a un effet sur ces mesures, lequel est fonction de la présence de particules chargées sur le trajet de transmission. L'effet de ces particules est fonction inverse du carré de la fréquence, de sorte que l'on préfère utiliser des fréquences élevées pour la navigation. La précision requise pour des mesures de temps de propagation de groupe impose l'utilisation simultanée de liaisons dans au moins deux bandes de fréquences séparées, avec un facteur d'écart de fréquences d'au moins 4 de préférence. Le temps de propagation de groupe diffère d'une liaison à l'autre, et l'on peut utiliser cette différence pour calculer une correction adéquate pour chaque liaison.

Pour les systèmes fonctionnant au-dessus de 200 THz sur un trajet atmosphérique, les principaux phénomènes à prendre en compte sont la diffusion, la réfraction et les turbulences atmosphériques. Ces facteurs peuvent entraîner un affaiblissement d'ensemble du signal, une réduction de la cohérence du front d'onde et/ou des modifications de la direction du signal émis.

On trouvera dans les Recommandations UIT-R de la Série P, relatives à la propagation des ondes radioélectriques, davantage d'informations concernant les effets de la propagation dans l'atmosphère terrestre sur les ondes radioélectriques et les signaux au-dessus de 20 THz.

3.4 Considérations relatives à la qualité de fonctionnement des liaisons

Dans une mission, la fiabilité des liaisons est un critère important. Les opérations critiques, telles que les opérations de lancement et les interventions d'urgence, pendant lesquelles il n'est pas possible de garantir l'orientation de l'engin spatial, imposent des liaisons extrêmement fiables. La fiabilité est également capitale dans toutes les missions habitées. Les attributions de la recherche spatiale dans la bande des 2 GHz permettent d'établir des liaisons fiables et indépendantes des conditions atmosphériques pour les missions de recherche spatiale, et ce sont ces attributions qui sont utilisées pour ces fonctions critiques.

La détermination des bandes de fréquences susceptibles d'offrir la meilleure qualité de fonctionnement pour les liaisons de communication et de poursuite dans la recherche spatiale repose sur l'étude des paramètres de propagation qui dépendent de la fréquence et sur l'analyse des caractéristiques des équipements utilisés dans les liaisons. On pourra adopter, comme indice de qualité de fonctionnement d'une liaison, le ratio de la puissance du signal reçu au ratio de puissance spectrale de bruit, P_r/N_0 . L'utilisation des courbes types établies à partir des analyses de qualité de fonctionnement des liaisons facilitera la détermination des gammes de fréquences offrant une qualité de fonctionnement optimale compte tenu du cahier des charges de la mission envisagée. Les différentes hypothèses possibles quant aux distances de communication, aux caractéristiques d'antenne et à la puissance des émetteurs, tout en modifiant bien évidemment les valeurs absolues du rapport

P_r/N_0 , n'ont aucune incidence sur le profil des courbes. La bande de fréquences donnant la valeur la plus élevée du rapport P_r/N_0 compte tenu du système et des conditions de propagation considérés est par définition la bande de fréquences préférée.

3.5 Attributions au service de recherche spatiale

Les attributions de bandes de fréquences à la recherche spatiale remontent à la Conférence administrative ordinaire des radiocommunications tenue à Genève en 1959, conférence à l'occasion de laquelle des attributions provisoires avaient été définies pour les transmissions entre la Terre et les satellites artificiels de la Terre dans les bandes 136-137 MHz et 2 290-2 300 MHz. En 1963, la Conférence administrative extraordinaire des radiocommunications a confirmé ces deux attributions à la recherche spatiale en leur conférant le statut d'attributions primaires au même titre que d'autres services et le statut exclusif dans la Région 2 de l'UIT. Depuis cette époque, la progression de la technologie de la recherche spatiale et des communications associées à la recherche spatiale, et la nécessité de répondre à des besoins de plus en plus rigoureux en matière de données, ont imposé l'attribution de bandes additionnelles devant répondre à la demande croissante relevée dans le service de recherche spatiale.

Les Recommandations et Rapports UIT-R suivants définissent les bandes de fréquences préférées pour le service de recherche spatiale:

- Recommandation UIT-R SA.363 – Systèmes d'exploitation spatiale – Fréquences, largeurs de bande et critères de protection.
- Recommandation UIT-R SA.364 – Fréquences et largeurs de bandes préférées pour les satellites habités ou non du service de recherche spatiale, proches de la terre.
- Recommandation UIT-R SA.1019 – Systèmes à satellites relais de données: bandes de fréquences préférées et sens de transmission.
- Recommandation UIT-R SA.1344 – Bandes de fréquences et largeurs de bandes préférées pour la transmission de données d'interférométrie spatiale à très grande base (VLBI).
- Recommandation UIT-R SA.1863 – Radiocommunications utilisées en situation d'urgence dans des vols spatiaux habités.
- Recommandation UIT-R SA.2177 – Sélection de bandes de fréquences dans la gamme 1-120 GHz pour la recherche dans l'espace lointain.

Un tableau complet des utilisations du SRS et des limites de puissance surfacique correspondantes figure dans l'Appendice 2.

CHAPITRE 4

Considérations générales sur les critères de protection et partage des fréquences dans le service de recherche spatiale

Le partage des fréquences entre le service de recherche spatiale et d'autres services est nécessaire lorsque l'on utilise des bandes attribuées à plusieurs services. Les brouillages entre systèmes peuvent être atténués dans certaines conditions de partage définies suite à une analyse portant sur les deux services considérés. Les critères de protection définis pour le service de recherche spatiale permettent de faciliter les analyses de brouillage lorsqu'on ne dispose pas de données spécifiques sur les systèmes.

4.1 Considérations générales sur les brouillages dans le service de recherche spatiale

Dans les missions de recherche spatiale, les phénomènes de brouillage peuvent occasionner non seulement une réduction des flux de données disponibles, l'interruption des flux de données ou même des pertes de données irréparables, mais encore la perte de la capacité à naviguer ou à contrôler l'engin spatial, par exemple lorsque les opérations de télécommande sont interrompues pendant des phases critiques de la mission ou lorsque des données essentielles de télémesure ne sont pas communiquées. Les brouillages observés dans le canal de mesure de distance peuvent entraîner des erreurs de navigation. Les brouillages causés aux expériences de sciences radio, même dans le cas de bruits spectraux peu élevés, corrompent les données scientifiques, car ils modifient le signal que l'on cherche à étudier au départ. Si l'on détecte des brouillages, les données scientifiques concernées ne sont généralement pas prises en compte. La situation est cependant plus grave lorsque les brouillages ne sont pas détectés et que des données scientifiques corrompues sont utilisées dans des études comme si elles étaient exemptes de brouillages.

Du fait que toutes les missions de recherche spatiale partagent le même ensemble de fréquences radioélectriques et de largeurs de bande attribuées par l'UIT, il peut arriver qu'une mission subisse les brouillages d'autres missions. Des brouillages peuvent se produire lorsqu'une station terrienne victime reçoit un signal brouilleur rayonné par un engin spatial d'une autre mission de recherche spatiale plus proche de la Terre, ou lorsque des engins spatiaux relevant de missions différentes sont situés à l'intérieur du faisceau d'émission ou de réception de la station terrienne ou du système relai espace-espace. La dynamique orbitale des configurations de brouillage détermine alors la durée et le niveau du brouillage. Lorsqu'un ou plusieurs engins spatiaux sont relativement proches de la station terrienne victime, la durée du brouillage peut être relativement courte. Toutefois, lorsque les deux engins spatiaux considérés sont relativement éloignés, dans le cas par exemple de missions dans l'espace lointain, les brouillages peuvent persister pendant toute la durée de l'émission.

Les équipements les plus sensibles au brouillage sont les systèmes de gestion des boucles de verrouillage des porteuses et les préamplificateurs maser utilisés pour les missions dans l'espace lointain et de nombreuses missions au voisinage de la Terre. Les systèmes à boucle de verrouillage de phase sont largement utilisés dans les communications de recherche spatiale. Un récepteur type peut être doté de plusieurs systèmes de boucles de verrouillage de phase synchronisées, assurant chacun le verrouillage et la synchronisation d'une composante particulière du signal. La présence d'un signal brouilleur de niveau élevé entraîne généralement une ou plusieurs pertes de verrouillage sur le signal utile, d'où une rupture des communications. Ces brouillages peuvent aussi entraîner des problèmes importants au niveau des récepteurs, qui doivent retrouver ou générer à nouveau les fréquences porteuses à partir des signaux reçus. Le brouillage peut être momentané, lorsque, par exemple, le signal brouilleur balaie la largeur de bande de la boucle, ou peut durer plusieurs minutes. Lorsque les brouillages entraînent une perte de verrouillage sur la porteuse, plusieurs minutes sont nécessaires pour réacquérir le verrouillage sur le signal utile dans ce type de situation, et la durée cumulative de la perte de verrouillage puis de la réacquisition du signal utile peut être largement supérieure à la durée du brouillage. Les brouillages observés pendant la période d'acquisition du signal lors d'un passage d'engin spatial en mission à proximité de la Terre au-dessus d'une station terrienne peuvent entraîner une perte de transmission pendant un important pourcentage de temps de la durée de passage.

Un signal brouilleur de niveau élevé peut amener le récepteur à se verrouiller sur le signal brouilleur plutôt que sur le signal utile. Les signaux brouilleurs de niveau faible à modéré, qu'il s'agisse de faisceaux fixes ou de faisceaux à balayage, peuvent entraîner une augmentation de l'erreur de phase statique et de la gigue de phase sur la boucle de verrouillage de la porteuse.

Les préamplificateurs maser sont principalement susceptibles aux brouillages occasionnés par des signaux de niveau élevé proches de la bande passante ou des fréquences de repos du maser lui-même. Les signaux brouilleurs de niveau élevé satureront le préamplificateur du maser, dont certains étages peuvent alors être amenés à fonctionner en mode non linéaire, ce qui entraîne une compression du gain et la production d'harmoniques, de signaux parasites et de produits d'intermodulation.

Le problème des brouillages préjudiciables occasionnés par d'autres émetteurs se pose dans tous les services. Un type de brouillage qui peut se révéler préjudiciable et avoir de grandes incidences sur les émetteurs spatioportés est celui des rayonnements non essentiels. Ces rayonnements sont dus aux harmoniques des signaux engendrés par des effets d'intermodulation au niveau de l'émetteur. Ils posent un problème particulier en raison du fait que ce type d'émissions peut affecter de grandes portions du spectre et qu'il est généralement impossible de modifier les réglages de l'émetteur après le lancement de l'engin spatial.

Les récepteurs utilisés sur les engins spatiaux, étant très sensibles, en particulier ceux utilisés pour les missions dans l'espace lointain, le sont également à tous les types de brouillage, que les signaux brouilleurs soient produits à l'intérieur ou à l'extérieur des bandes attribuées à la recherche spatiale. Un émetteur fonctionnant dans une bande de fréquences adjacente à une bande de fréquences attribuée au service de recherche spatiale peut entraîner dans cette dernière des niveaux de brouillages qui excèdent les critères de protection. Pour limiter les brouillages occasionnés par des émissions hors bande, on peut utiliser des bandes de garde ou un filtrage en limite de bande du signal émis et du signal reçu. Cependant, les dispositions du RR de l'UIT ne prévoient pas en général de bandes de garde.

4.2 Critères de protection pour le service de recherche spatiale

Les Recommandations UIT-R suivantes fournissent des informations détaillées sur les critères de protection concernant le service de recherche spatiale:

- Recommandation UIT-R SA.363 – Systèmes d'exploitation spatiale – Fréquences, largeurs de bande et critères de protection.
- Recommandation UIT-R SA.609 – Critères de protection pour les liaisons de télécommunication avec les satellites de recherche habités ou non, proches de la Terre.
- Recommandation UIT-R SA.1155 – Critères de protection relatifs à l'exploitation des systèmes à satellites relais de données.
- Recommandation UIT-R SA.1157 – Critères de protection pour la recherche dans l'espace lointain.
- Recommandation UIT-R SA.1396 – Critères de protection pour le service de recherche spatiale dans les bandes 37-38 GHz et 40-40,5 GHz.
- Recommandation UIT-R SA.1743 – Dégradation maximale admissible des liaisons de radiocommunication des services de recherche spatiale et d'exploitation spatiale consécutive aux brouillages dus aux émissions et aux rayonnements provenant d'autres sources radioélectriques.

Il y aura lieu de se reporter à ces Recommandations pour toute étude sur les brouillages ou le partage.

4.3 Considérations générales applicables au partage dans le service de recherche spatiale

Le partage entre le service de recherche spatiale et d'autres services est complexe, pour un certain nombre de raisons. Tout d'abord, il faut tenir compte du caractère dynamique des configurations de brouillage. Le déplacement relatif des engins spatiaux entre eux et par rapport à la surface de la Terre entraîne une variation constante de certains facteurs, tels que les niveaux de couplage d'antenne et les niveaux de puissance reçus. Les mouvements relatifs et leurs conséquences sur les liaisons de communication sont eux-mêmes très variables dans leur ampleur, et peuvent avoir des effets sensibles sur le niveau, la durée et la probabilité des brouillages.

En deuxième lieu, les caractéristiques des systèmes de communication utilisés pour les missions de recherche à proximité de la Terre ou dans l'espace lointain sont extrêmement diversifiées et dépendent d'un certain nombre de facteurs: cahier des charges de la mission considérée, caractéristiques orbitales, perfectionnement technique de l'engin spatial et contraintes budgétaires.

Pour les missions à proximité de la Terre, la distribution et la concentration des émetteurs de Terre sont un facteur important dans l'étude des brouillages et, selon l'altitude de l'engin spatial et ses caractéristiques orbitales, ces éléments peuvent avoir un effet très sensible sur les conditions de partage. En conséquence, les scénarios de brouillage et les configurations de partage concernant les missions de recherche spatiale à proximité de la Terre sont généralement fondés sur des analyses statistiques qui tiennent compte de la dynamique des engins spatiaux en mouvement. On utilise actuellement dans le service de recherche spatiale des programmes informatiques très évolués, qui peuvent traiter un grand nombre de variables et de caractéristiques de communication, pour évaluer les possibilités d'utilisation des bandes de fréquences en partage avec d'autres services.

La Recommandation UIT-R SA.1016 traite de la possibilité d'un partage de fréquences entre des stations de recherche dans l'espace lointain et des stations d'autres services.

Un certain nombre de Recommandations UIT-R définissent les scénarios de partage au voisinage de 2 GHz. Par exemple, la Recommandation SA.1273 définit les limites de puissance surfacique maximales produite à la surface de la Terre dans la bande 2 200-2 290 MHz par une station spatiale exploitée dans le sens espace vers Terre, notamment pour les liaisons entre SRD et satellites LEO. La Recommandation UIT-R SA.1274 qui la complète propose un niveau global de puissance de brouillage propre à assurer la protection des liaisons de communication entre SRD et satellites LEO. La Recommandation UIT-R SA.1154 expose un certain nombre de dispositions concernant le partage des bandes des 2 GHz entre les liaisons entre SRD et satellites LEO et systèmes mobiles. La Recommandation UIT-R F.1248 définit les limites pratiques concernant la puissance isotrope effective rayonnée et la puissance spectrale rayonnée par des stations du service fixe en direction des satellites SRD, tandis que la Recommandation UIT-R SA.1275 identifie les positions orbitales SRD qui doivent être protégées dans cette bande contre les émissions des services fixes.

Dans la bande 25,25-27,5 GHz, il est peu probable que les engins spatiaux LEO affectés à la recherche spatiale occasionnent des brouillages aux satellites OSG du SFS puisque la p.i.r.e. des engins spatiaux utilisés pour la recherche spatiale est sensiblement inférieure à celle des stations terriennes d'émission du SFS. Il se peut que les stations terriennes du SFS occasionnent des brouillages aux SRD. Lorsqu'un SRD suit un engin spatial, un phénomène de couplage entre l'antenne de ce satellite et l'antenne de la station terrienne du SFS peut avoir pour effet de brouiller la réception du satellite SRD. Bien que les faisceaux des antennes utilisées à cette fréquence soient relativement étroits, une situation de brouillage peut se produire avec les stations terriennes situées au limbe de la Terre vue d'un SRD, et ce brouillage peut persister pendant une période de temps relativement longue. La Recommandation UIT-R F.1249 définit des limites pratiques de p.i.r.e. et de densité spectrale rayonnées par des stations du service fixe en direction d'un SRD. La Recommandation UIT-R SA.1276 identifie les positions orbitales SRD qui doivent être protégées contre les brouillages.

La Recommandation UIT-R SA.1862 présente des lignes directrices pour l'utilisation efficace de la bande de fréquences 25,5-27 GHz, tandis que la Recommandation UIT-R SA.1626 porte sur la faisabilité du partage des fréquences dans la bande 14,8-15 GHz. La Recommandation UIT-R SA.1810 présente des lignes directrices concernant la conception des systèmes du service d'exploration de la Terre par satellite fonctionnant dans la bande 8 025-8 400 MHz, alors que la Recommandation UIT-R SA.1629 concerne le partage des liaisons de télécommande dans la bande 257-262 MHz.

4.3.1 Brouillages en provenance de stations terriennes du service de recherche spatiale

Les brouillages occasionnés par les stations terriennes du service de recherche spatiale à des engins spatiaux non OSG constituent des configurations dynamiques qui dépendent de paramètres eux-mêmes dépendants du temps, notamment: temps passé par l'engin spatial victime dans le faisceau de l'antenne de la station terrienne considérée, caractéristiques de pointage de la station terrienne d'émission qui assurent la poursuite de l'engin spatial de recherche et communique avec lui et, lorsque l'engin spatial victime est doté d'antennes directives, caractéristiques de pointage des antennes. D'autres facteurs additionnels, fréquences d'exploitation, type

d'antenne, diamètre d'antenne, ouverture du faisceau, etc. doivent être pris en compte dans la détermination de la durée et du niveau des signaux brouilleurs reçus par le récepteur de l'engin spatial victime.

Les brouillages occasionnés par des stations terriennes du service de recherche spatiale à des stations fixes et mobiles de Terre sont régis par les dispositions du RR de l'UIT, dont l'Article 9 définit une procédure de coordination efficace avec l'accord des autres administrations concernées, et dont l'Article 21 du RR de l'UIT traite du partage des bandes de fréquences situées au-dessus de 1 GHz entre les services de Terre et les services spatiaux. L'Appendice 7 du RR de l'UIT définit la méthode de détermination de la zone de coordination centrée sur une station terrienne dans les bandes de fréquences comprises entre 100 MHz et 105 GHz partagées par les services spatiaux et les services de radiocommunication de Terre.

En choisissant de façon adéquate les valeurs d'espacement orbital des satellites OSG, l'ouverture des faisceaux d'antenne et les directions de pointage, on peut atténuer tout brouillage éventuel entre les liaisons SRD Terre vers espace et les autres satellites OSG.

L'Appendice 8 du RR de l'UIT expose la méthode de calcul qui permet de déterminer si une coordination est requise entre des réseaux à satellites OSG partageant la même bande de fréquences. L'Article 21 du RR de l'UIT a pour effet de limiter les niveaux de p.i.r.e. des stations terriennes, notamment des stations terriennes utilisées dans les systèmes à SRD, à l'effet de protéger les systèmes fixes et les systèmes mobiles.

4.3.2 Brouillages occasionnés aux engins de recherche spatiale

En général, les satellites OSG fonctionnant dans le service fixe ou le service mobile par satellite n'occasionnent pas de brouillages aux engins de recherche spatiale en orbite terrestre basse, pour les raisons suivantes: la distance entre le satellite de recherche spatiale et sa station terrienne est beaucoup plus courte que la distance entre l'engin de recherche spatiale et le satellite OSG, la p.i.r.e. de la station terrienne du service de recherche spatiale est plus élevée, et toutes les antennes de la configuration sont directives. Toutefois, les engins du service de recherche spatiale en orbite terrestre basse peuvent subir des brouillages causés par des systèmes à satellites non OSG fonctionnant dans le service fixe ou le service mobile par satellite. Les engins de recherche spatiale en orbite terrestre moyenne ou à une altitude plus élevée, étant plus proches des satellites OSG, peuvent eux subir des brouillages inacceptables causés par des satellites du service fixe ou du service mobile par satellite. Un certain nombre de satellites émettant simultanément et se trouvant à une proximité suffisante peuvent, ensemble, constituer une source de brouillage pour un engin de recherche spatiale de réception.

Les satellites fonctionnant dans le service fixe ou le service mobile par satellite ne devraient pas causer de brouillages aux engins de recherche spatiale fonctionnant bien au-delà de l'orbite géosynchrone ou dans l'espace lointain.

Les dispositions des Articles 9 et 21 du RR de l'UIT régissent les brouillages occasionnés par des stations terriennes à des engins de recherche spatiale. Le risque de brouillage dû à un système fixe existe bel et bien. Compte tenu de la dynamique des configurations de brouillage, du nombre de systèmes fixes installés et des restrictions de brouillage applicables aux stations terriennes d'émission, le niveau de brouillage devrait être minimal. La multiplication des systèmes du service fixe utilisés pour des applications P-MP pourrait avoir une incidence sensible sur les possibilités de partage avec le service de recherche spatiale.

4.3.3 Brouillages occasionnés par les engins de recherche spatiale

Les brouillages occasionnés aux stations de Terre sont généralement contrôlés au moyen de limites de puissance surfacique appropriées appliquées aux engins de recherche spatiale. Ces limites de puissance surfacique sont exposées en détail dans l'Article 21 du RR de l'UIT. Dans les bandes 137-138 MHz, 143,6-143,65 MHz et 400,15-401,0 MHz, aucune limite de puissance surfacique n'a été spécifiée. Les engins de recherche spatiale émettent en direction des stations terriennes de réception au moyen d'antennes équidirectives relativement importantes et présentant un gain plus élevé que les antennes dont sont dotés les systèmes du service fixe et du service mobile. Les différentiels de gain entre ces antennes et la proximité relative des antennes d'émission et de réception des systèmes fixes et des systèmes mobiles minimisent les risques de brouillages pouvant être occasionnés pendant les transmissions de recherche spatiale, en particulier au limbe de la Terre.

Le niveau et la durée des brouillages éventuellement occasionnés aux stations terriennes du service météorologique par satellite sont sensiblement limités par le fait que ces systèmes utilisent des antennes

relativement grandes, par les caractéristiques de poursuite de ces systèmes et par la répartition aussi bien des stations terriennes de recherche spatiale que des stations terriennes du service météorologique par satellite.

Les liaisons espace vers Terre des SRD ne devraient occasionner aucun brouillage aux liaisons Terre-espace des systèmes OSG du service fixe par satellite (SFS), en raison d'un couplage de lobes latéraux d'antenne. Les satellites OSG du SFS situés aux antipodes d'un SRD ne subiront eux non plus aucun brouillage préjudiciable en raison de considérations de distance et de couplage d'antenne. Certains éléments, étroitesse des faisceaux d'antenne, couplage, proximité d'un satellite mobile par rapport à la station de Terre d'émission qui lui est associée, dynamique orbitale des configurations de brouillage, n'auront qu'une incidence nulle ou négligeable au niveau des brouillages pouvant être occasionnés par des liaisons espace vers Terre de SRD à des satellites mobiles.

Les brouillages occasionnés aux stations terriennes du SFS par des liaisons espace vers Terre de SRD sont atténués par divers facteurs: séparation spatiale appropriée, couplage des lobes latéraux des antennes de station terrienne de grand diamètre et polarisation. La coordination, lorsqu'elle est nécessaire, se fera selon la méthode définie dans l'Appendice 8 du RR de l'UIT. La dynamique de la poursuite des engins spatiaux sur orbite basse par des stations terriennes du service mobile par satellite aura également pour effet d'atténuer les brouillages occasionnés par les émissions espace vers Terre des satellites SRD.

4.3.4 Brouillages occasionnés à des stations terriennes de recherche spatiale

Les brouillages occasionnés à des stations terriennes de recherche spatiale par des systèmes du service mobile par satellite dans la bande 137-138 MHz sont régis par les dispositions de l'Article 9 du RR de l'UIT concernant la coordination. Au-dessous de 1 GHz, une répartition appropriée et un blindage sur site pourront protéger les stations terriennes du service de recherche spatiale et minimiser le besoin de coordination avec les émetteurs fixes et mobiles. Au-dessus de 1 GHz, c'est l'Article 21 du RR de l'UIT qui s'applique. La méthode de détermination de la zone de coordination centrée sur une station terrienne dans les bandes de fréquences comprises entre 100 MHz et 105 GHz partagées entre les services de radiocommunication spatiaux et les services de radiocommunication de Terre est exposée dans l'Appendice 7 du RR de l'UIT.

Les brouillages occasionnés par des satellites mobiles en orbite basse peuvent affecter les liaisons espace vers Terre des SRD en raison de la proximité de la surface de la Terre, de la densité des systèmes et du nombre de systèmes exploités dans la bande. Les risques de brouillages par des stations du service fixe et du service mobile sont réels lorsque les critères de protection des stations terriennes des satellites SRD définis dans la Recommandation UIT-R SA.1155 sont dépassés. Dans ces cas, une coordination peut être nécessaire en application des dispositions de l'Appendice 7 du RR de l'UIT.

4.3.5 Limites fixées par l'UIT pour les rayonnements non désirés

L'UIT-R définit les rayonnements non désirés dans deux régions distinctes. La région située immédiatement en dehors de la largeur de bande nécessaire est la région hors bande; la région située plus loin est la région des rayonnements non essentiels. La Recommandation UIT-R SM.1539 définit la région frontière. En général, celle-ci correspond à 250% de la largeur de bande nécessaire, mais il existe des exceptions.

Le numéro 3.8 du RR de l'UIT dispose que, s'agissant des émissions hors bande, les stations d'émission devraient se conformer, dans toute la mesure possible, aux niveaux spécifiés dans les Recommandation UIT-R la plus récente. Le gabarit d'émission hors bande pour les services spatiaux est défini dans l'Annexe 5 de la Recommandation UIT-R SM.1541. Toutefois, il n'existe pas dans les textes de l'UIT en vigueur de gabarit d'émission hors bande applicable aux liaisons espace-espace des services spatiaux.

Le numéro 3.7 du RR de l'UIT dispose que les stations d'émission doivent se conformer aux spécifications de l'Appendice 3 du RR de l'UIT en ce qui concerne les niveaux de puissance maximaux tolérés des rayonnements non essentiels. Le Tableau II de l'Appendice 3 du RR de l'UIT indique que pour les services spatiaux, l'affaiblissement de crête dans la zone des rayonnements non essentiels est $43 + 10 \log P$, ou 60 dBc, selon la valeur qui est la moins contraignante, où P désigne la puissance (en watts) fournie à la ligne de l'antenne d'émission.

APPENDICE 1

Recommandations et Rapports UIT-R applicables au service de recherche spatiale

Recommandations UIT-R

SA.363	Systèmes d'exploitation spatiale – Fréquences, largeurs de bande et critères de protection
SA.364	Fréquences et largeurs de bandes préférées pour les satellites habités ou non du service de recherche spatiale, proches de la Terre
SA.509	Diagramme de rayonnement de référence d'une antenne de station terrienne dans le service de recherche spatiale et de radioastronomie, à utiliser pour les calculs de brouillage ainsi que dans les procédures de coordination
SA.510	Possibilité de partage des fréquences entre le service de recherche spatiale et d'autres services dans les bandes au voisinage de 14 et 15 GHz – Brouillage potentiel causé par les systèmes à satellites relais de données
SA.609	Critères de protection pour les liaisons de télécommunication avec les satellites de recherche habités ou non, proches de la Terre
SA.1014	Vaisseaux habités ou inhabités destinés à la recherche dans l'espace lointain: exigences en matière de télécommunications
SA.1015	Recherche dans l'espace lointain: largeur de bande requise
SA.1016	Recherche dans l'espace lointain: considérations relatives au partage
SA.1018	Système fictif de référence pour des systèmes comprenant des satellites relais de données en orbite géostationnaire et des engins spatiaux en orbites terrestres basses
SA.1019	Systèmes à satellites relais de données: bandes de fréquences préférées et sens de transmission
SA.1154	Dispositions propres à assurer la protection des services de recherche spatiale (SRS), d'exploitation spatiale (SES) et d'exploration de la Terre par satellite (SETS) et à faciliter le partage avec le service mobile dans les bandes 2 025-2 110 MHz et 2 200-2 290 MHz
SA.1155	Critères de protection relatifs à l'exploitation des systèmes à satellites relais de données
SA.1157	Critères de protection pour la recherche dans l'espace lointain
SA.1274	Critères applicables aux réseaux à satellite relais de données visant à faciliter le partage avec les systèmes du service fixe dans les bandes 2 025-2 110 MHz et 2 200-2 290 MHz
SA.1275	Positions orbitales des satellites relais de données devant être protégées contre les émissions des systèmes du service fixe fonctionnant dans la bande 2 200-2 290 MHz
SA.1276	Positions orbitales des satellites relais de données devant être protégées contre les émissions des systèmes du service fixe fonctionnant dans la bande 25,25-27,5 GHz
SA.1344	Bandes de fréquences et largeurs de bandes préférées pour la transmission de données d'interférométrie spatiale à très grande base (VLBI)
SA.1345	Méthodes de prévision des diagrammes de rayonnement des grandes antennes utilisées pour la recherche spatiale et la radioastronomie
SA.1396	Critères de protection pour le service de recherche spatiale dans les bandes 37-38 et 40-40,5 GHz

SA.1414	Caractéristiques types des systèmes à satellites relais de données
SA.1415	Partage entre systèmes du service inter-satellites dans la bande de fréquences 25,25-27,5 GHz
SA.1449	Possibilité de partage de fréquences entre le SFS (espace vers Terre), le service d'exploration de la Terre par satellite (passive) et le service de recherche spatiale (passive) dans la bande 18,6-18,8 GHz
SA.1626	Faisabilité du partage des fréquences entre le service de recherche spatiale (espace vers Terre) et les services fixe et mobile dans la bande 14,8-15,35 GHz
SA.1629	Partage entre les liaisons de télécommande entre les services de recherche spatiale et d'exploitation spatiale et les services fixe, mobile et mobile par satellite dans la bande de fréquences 257-262 MHz
SA.1742	Caractéristiques techniques et opérationnelles des systèmes à liaisons interplanétaires en espace lointain fonctionnant dans le sens espace vers Terre au voisinage de 283 THz
SA.1743	Dégradation maximale admissible des liaisons de radiocommunication des services de recherche spatiale et d'exploitation spatiale consécutive aux brouillages dus aux émissions et aux rayonnements provenant d'autres sources radioélectriques
SA.1805	Caractéristiques techniques et opérationnelles des systèmes de télécommunication espace vers espace exploités au voisinage de 354 THz et 366 THz
SA.1810	Lignes directrices concernant la conception des systèmes du service d'exploration de la Terre par satellite fonctionnant dans la bande 8 025-8 400 MHz
SA.1811	Diagrammes d'antenne de référence des stations terriennes à grande ouverture du service de recherche spatiale à utiliser pour les analyses de compatibilité en présence d'un grand nombre de sources de brouillage réparties dans les bandes 31,8-32,3 GHz et 37,0-38,0 GHz
SA.1862	Lignes directrices pour l'utilisation efficace de la bande 25,5-27,0 GHz par le service d'exploration de la Terre par satellite (espace vers Terre) et le service de recherche spatiale (espace vers Terre)
SA.1863	Radiocommunications utilisées en situation d'urgence dans des vols spatiaux habités
SA.1882	Caractéristiques techniques et opérationnelles des systèmes du service de recherche spatiale (Terre vers espace) à utiliser dans la bande 22,55-23,15 GHz

Rapports UIT-R

SA.2065	Protection des liaisons de télémétrie des systèmes d'interférométrie spatiale à très grande base
SA.2066	Moyens permettant de calculer les caractéristiques statistiques de visibilité des satellites en orbite basse
SA.2067	Utilisation de la bande 13,75-14,0 GHz par le service de recherche spatiale et le service fixe par satellite
SA.2098	Modèles de gain mathématiques d'antenne de station terrienne à grande ouverture du service de recherche spatiale utilisables dans les analyses de compatibilité portant sur des configurations à multiples sources de brouillage distribuées
SA.2132	Caractéristiques des télécommunications et prescriptions pour les systèmes d'interférométrie spatiale à très grande base
SA.2162	Partage des conditions entre les liaisons du service de recherche spatiale utilisées pour les activités extravéhiculaires (EVA) et les liaisons des services fixe et mobile dans la bande 410-420 MHz

- SA.2166 Exemples de diagrammes de rayonnement des grandes antennes utilisées pour la recherche spatiale et la radioastronomie
- SA.2167 Facteurs ayant une incidence sur le choix des bandes de fréquences utilisées par le service de recherche spatiale pour les liaisons de télécommunication dans l'espace lointain (espace vers Terre)
- SA.2177 Sélection de bandes de fréquences pour la recherche dans l'espace lointain dans la gamme 1-120 GHz
- SA.2183 Méthode de calcul de la qualité de fonctionnement des liaisons dans le service de recherche spatiale
- SA.2190 Etude sur la compatibilité entre le service mobile (aéronautique) et le service de recherche spatiale (espace vers Terre) dans la bande de fréquences 37-38 GHz
- SA.2191 Besoins de spectre pour les futures missions du service de recherche spatiale fonctionnant dans une nouvelle attribution possible à ce service dans la bande 22,55-23,15 GHz
- SA.2192 Compatibilité entre le service de recherche spatiale (Terre vers espace) et les systèmes non OSG-non OSG du service inter-satellites dans la bande 22,55-23,55 GHz
- SA.2193 Compatibilité entre le service de recherche spatiale (Terre vers espace) et les systèmes des services fixe, mobile et inter-satellites dans la bande 22,55-23,15 GHz

APPENDICE 2

Tableau des utilisations du SRS et limites de puissance surfacique correspondantes

Fréquence		Utilisation SRS = Non spécifique s-E = espace-Terre E-s = Terre-espace s-s = espace-espace ds = espace profond	Limite de puissance surfacique en fonction de l'angle d'incidence (θ) au-dessus du plan horizontal (dBW/m ²) ⁽¹⁾			Largeur de bande de référence
			$0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$	
2 501-2 502	kHz	SRS				
5 003-5 005	kHz	SRS				
10 003-10 005	kHz	SRS				
15 005-15 010	kHz	SRS				
18 052-18 068	kHz	SRS				
19 990-19 995	kHz	SRS				
25 005-25 010	kHz	SRS				
30,005-30,01	MHz	SRS				
39,986-40,02	MHz	SRS				
40,98-41,015	MHz	SRS				
137-138	MHz	s-E				
138-143,6	MHz	s-E				
143,6-143,65	MHz	s-E				
143,65-144	MHz	s-E				
400,15-401	MHz	s-E				
410-420	MHz	s-s				
1 215-1 300	MHz	télé-détection active				
2 025-2 110	MHz	E-s, s-s	-154	$-154 + 0,5 (\theta - 5)$	-144	4 kHz
2 110-2 120	MHz	ds, E-s				
2 200-2 290	MHz	s-E, s-s	-154	$-154 + 0,5 (\theta - 5)$	-144	4 kHz
2 290-2 300	MHz	ds, s-E	-154	$-154 + 0,5 (\theta - 5)$	-144	4 kHz
3 100-3 300	MHz	télé-détection active				
5 250-5 570	MHz	SRS				
5 650-5 670	MHz	ds				
5 670-5 725	MHz	ds	-152	$-152 + 0,5 (\theta - 5)$	-142	4 kHz
7 145-7 190	MHz	ds, E-s				
7 190-7 235	MHz	E-s				
8 400-8 450	MHz	ds, s-E	-150	$-150 + 0,5 (\theta - 5)$	-140	4 kHz
8 450-8 500	MHz	s-E	-150	$-150 + 0,5 (\theta - 5)$	-140	4 kHz
8 550-8 650	MHz	télé-détection active				
9 300-9 800	MHz	télé-détection active				
9 800-9 900	MHz	télé-détection active				
12,75-13,25	GHz	ds, s-E				
13,25-13,4	GHz	télé-détection active				
13,4-14,3	GHz	télé-détection active				
14,4-14,47	GHz	s-E				
14,5-15,35	GHz	SRS				
16,6-17,1	GHz	ds, E-s				

Fréquence		Utilisation SRS = Non spécifique s-E = espace-Terre E-s = Terre-espace s-s = espace-espace ds = espace profond	Limite de puissance surfacique en fonction de l'angle d'incidence (θ) au-dessus du plan horizontal (dBW/m ²) ⁽¹⁾			Largeur de bande de référence
			$0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$	
17,2-17,3	GHz	détection active				
22,55-23,55	GHz	s-s	-115	$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	-105	1 MHz
22,55-23,15	GHz	E-s				
25,25-27,5	GHz	s-s	-115	$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	-105	1 MHz
25,5-27	GHz	s-E	-115	$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	-105	1 MHz
31-31,3	GHz	SRS	-115	$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	-105	1 MHz
31,8-32,3	GHz	ds, s-E	-120	$-120 + 0,75 (\theta - 5)$	-105	1 MHz
34,2-34,7	GHz	ds, E-s				
34,7-35,2	GHz	SRS	-115	$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	-105	1 MHz
35,5-36	GHz	téledétection active				
37-38	GHz	s-E, Non OSG	-120	$-120 + 0,75 (\theta - 5)$	-105	1 MHz
37-38 ⁽²⁾	GHz	ds, s-E, Non OSG	-115	$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	-105	1 MHz
37-38	GHz	s-E, OSG	-125	$-125 + (\theta - 5)$	-105	1 MHz
40-40,5	GHz	E-s				
65-66	GHz	SRS				
74-84	GHz	s-E				
94-94,1	GHz	téledétection active				

⁽¹⁾ Les cellules vides correspondent à des valeurs non disponibles,

⁽²⁾ Comme indiqué dans le numéro **21.16.10** du RR de l'UIT, cette limite de puissance surfacique plus souple s'applique au lancement et à la phase d'exploitation à proximité de la Terre des installations dans l'espace lointain, qui font partie des systèmes non géostationnaires du SRS.

Union internationale des télécommunications
Division des ventes et du marketing
Place des Nations
CH-1211 Genève 20
Suisse
Fax: +41 22 730 5194
Tél.: +41 22 730 6141
E-mail: sales@itu.int
Web: www.itu.int/publications



Imprimé en Suisse
Genève, 2015
Crédits photos: Shutterstock