



# MANUEL DE RADIOASTRONOMIE

ÉDITION DE 2013  
BUREAU DES RADIOCOMMUNICATIONS





**Manuel**

**Radioastronomie**

**Troisième édition**

EDITION DE 2013

BUREAU DES RADIOCOMMUNICATIONS

Photo de couverture: Six antennes identiques de 22 m de diamètre constituant l'interféromètre ATCA (Australia Telescope Compact Array) du CSIRO, télescope à synthèse d'ouverture reposant sur la rotation de la Terre situé à l'observatoire Paul Wild (Australie).

Crédit: David Smyth.

© UIT 2015

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

## **Introduction à la troisième édition du Manuel par le président du Groupe de travail 7D de l'UIT-R (Radioastronomie)**

C'est pour moi un honneur et un privilège, et aussi un grand plaisir, de présenter la troisième édition du Manuel – Radioastronomie.

Ce Manuel n'est pas conçu comme un ouvrage de base sur la radioastronomie, mais porte principalement sur les aspects de la radioastronomie liés à la coordination des fréquences, c'est-à-dire la gestion du spectre des fréquences radioélectriques dans le but de réduire au minimum les risques de brouillage entre services de radiocommunication. La radioastronomie, qui n'émet pas d'ondes radioélectriques dans les bandes de fréquences qui lui sont attribuées, ne peut pas causer de brouillage préjudiciable aux autres services. En revanche, les signaux cosmiques qu'elle reçoit étant habituellement d'intensité extrêmement faible, ils risquent d'être brouillés par les émissions des autres services.

En douze Chapitres et cinq Appendices, ce Manuel présente la radioastronomie en tant que service de radiocommunication dans le contexte de la coordination des fréquences. Le préambule souligne le rôle et les avantages que la radioastronomie procure à la société, rôle et avantages qui, souvent, dépassent le cadre strict de l'astronomie. Le Manuel traite ensuite, entre autres choses, des caractéristiques de la radioastronomie, des bandes de fréquences les plus favorables aux observations, des applications spéciales de la radioastronomie, de sa vulnérabilité au brouillage radioélectrique par d'autres services, et des problèmes liés au partage du spectre avec les autres services. De nouveaux chapitres ont été intégrés dans cette troisième édition: ils concernent les techniques destinées à atténuer les effets du brouillage radioélectrique, la mise en place et les caractéristiques des zones de silence radioélectrique, la recherche d'intelligences extraterrestres (SETI) et l'astronomie par radar au sol. De nouveaux Appendices expliquent l'utilisation des unités et de l'échelle des décibels en radioastronomie. Enfin, une liste très complète d'abréviations a été ajoutée.

Presque dix années se sont écoulées depuis la publication de la deuxième édition du Manuel – Radioastronomie. Dans l'intervalle, l'UIT a tenu trois Conférences mondiales des radiocommunications (CMR-2003, CMR-2007 et CMR-2012).

Au cours de cette période, les services de communication se sont développés dans des proportions quasi exponentielles et les services hertziens sont aujourd'hui omniprésents dans notre société multiconnectée. Parallèlement, les avancées technologiques dans le domaine de la radioastronomie ont permis d'effectuer des observations dans des bandes très larges, souvent non visées par les attributions de fréquences faites par l'UIT. Cette nouvelle situation est un problème pour la protection de la radioastronomie et appelle la mise au point de nouvelles méthodes. Les techniques d'atténuation du brouillage radioélectrique font l'objet d'un renouvellement permanent et des zones de silence ont été définies pour qu'il existe, sur la planète, des endroits très spécifiques, caractérisés par un brouillage minimal et donc bien adaptés aux études de radioastronomie. Ces évolutions ont été examinées au sein de l'UIT, qui a publié à ce sujet de nouveaux Rapports UIT-R très complets.

La radioastronomie est désormais aussi exploitée dans les bandes de fréquences supérieures à 275 GHz; c'est notamment le cas à l'observatoire ALMA situé en Amérique du Sud, qui a été mis en service en 2013. Ces bandes ne sont pas prises en compte par les attributions officielles de l'UIT, mais la CMR-2012 en a précisé l'utilisation par les services passifs, sans exclure la possibilité de développer des services actifs. Des études ont montré qu'à ces fréquences élevées, le partage entre services serait relativement aisé.

Juste avant la CMR-2012, le Groupe de travail 7D de l'UIT-R (GT 7D) a entrepris la révision du Manuel. Ce travail s'est poursuivi sur deux ans. C'est le GT 7D qui, au sein de la Commission d'études 7 de l'UIT-R (Services scientifiques), est chargé de la radioastronomie, de la SETI et de l'astronomie radar. Parallèlement à la révision et à l'étoffement nécessaires du Manuel, les membres du GT 7D ont eu à réviser les Recommandations et Rapports UIT-R pertinents relatifs à la protection du service de radioastronomie. Cette troisième édition du Manuel est le fruit de tous ces travaux.

Je voudrais ici remercier un petit groupe de personnes qui n'ont pas ménagé leurs efforts et sans qui ce Manuel n'aurait pu voir le jour. Je souhaite exprimer ma reconnaissance particulière aux membres du GT 7D suivants (par ordre alphabétique):

- Dr W. Baan (Pays-Bas), Dr S. H. Chung (Corée), Dr A. Clegg (Etats-Unis d'Amérique),
- Dr M. Davis (Etats-Unis d'Amérique), Dr T. Gergely (Etats-Unis d'Amérique), Dr A. Jessner (Allemagne),
- Dr G. Langston (Etats-Unis d'Amérique), Dr B. Lewis (Etats-Unis d'Amérique), Dr H. Liszt (Etats-Unis d'Amérique),
- Dr M. Ohishi (Japon), Dr P. Thomasson (Royaume-Uni), Dr W. van Driel (France).

Autres contributeurs: Dr J. Romney des Etats-Unis d'Amérique, qui a remanié en profondeur les paragraphes consacrés à l'interférométrie à très grande ligne de base (VLBI), Dr J. Lovell d'Australie, pour le paragraphe sur la VLBI géodésique et Dr K. Tapping (Canada), qui a révisé le paragraphe sur l'astronomie solaire. Le Secrétariat de l'UIT-R a fourni une aide très précieuse, en particulier M. Vadim Nozdrin, Conseiller pour la Commission d'études 7, et le Secrétariat dirigé par Mme Elizabeth Mostyn-Jones. Enfin, j'exprime ma sincère gratitude au Dr Vincent Meens, Président de la Commission d'études 7, et au Dr John Zuzek, Vice-président chargé des Manuels, pour leur encouragement et leur soutien sans faille à nos travaux.

Je remercie tous ceux qui ont participé à l'élaboration du Manuel UIT-R – Radioastronomie, lequel, je l'espère, connaîtra tout le succès qu'il mérite.

Anastasios Tzioumis

Président du Groupe de travail 7D de l'UIT-R

## PRÉFACE

Le Manuel sur la radioastronomie a été élaboré par des experts du Groupe de travail 7D de la Commission d'études 7 de l'UIT-R (Services scientifiques), sous la direction de Dr A. Tzioumis (Australie), Président du Groupe de travail 7D.

La radioastronomie joue un rôle essentiel dans l'étude des problèmes de physique fondamentale et de cosmologie. Bon nombre des phénomènes étudiés ne peuvent l'être dans d'autres parties du spectre électromagnétique. En voici quelques exemples: la raie d'émission de l'hydrogène atomique neutre; le rayonnement du fond diffus cosmologique micro-onde et sa structure angulaire, qui joue un rôle fondamental en cosmologie; les vastes régions de rayonnement synchrotron associées aux radiogalaxies; les régions de formation d'étoiles obscurcies par la poussière dans les fréquences optiques. Grâce aux radiofréquences, il est possible d'obtenir la meilleure résolution angulaire et de mesurer avec une précision maximale les positions angulaires ainsi que les raies spectrales et leurs décalages Doppler. Pour cette raison, la radioastronomie, loin d'être un simple complément aux techniques optiques classiques, joue un rôle majeur dans les travaux de recherche menés dans de nombreux domaines de l'astronomie et de l'astrophysique.

Par ailleurs, la radioastronomie, comme toute science fondamentale, stimule le développement dans d'autres domaines. Ainsi, c'est à la radioastronomie que nous devons le développement des récepteurs et des antennes à faible bruit, qui permettent de capter des signaux de polarisations différentes au moyen d'une antenne unique. Des méthodes développées dans le cadre de la radioastronomie pour lutter contre l'écho radio sont aujourd'hui utilisées avec succès dans des systèmes de communication mobile de type WiFi. Les bases de la théorie de la radionavigation, qui sont utilisées aujourd'hui dans divers systèmes, ont été élaborées et confirmées en radioastronomie. La nécessité de traiter des volumes de données considérables en radioastronomie a permis des améliorations majeures dans le domaine du traitement automatique des données et notamment la mise au point de méthodes pour le traitement parallèle des données et de nouveaux langages de programmation. Dans le domaine médical, la radioastronomie est à l'origine des diagnostics par rayons X et de la tomographie par ordinateur.

Tout cela montre à quel point il importe de reconnaître et de protéger, au niveau international, les fréquences radioélectriques utilisées en radioastronomie. Le présent Manuel constitue pour le lecteur une source d'informations très utiles sur la gestion du spectre des fréquences radioélectriques dans le but de réduire au minimum les brouillages causés à ce service, qui est d'un grand intérêt.

François Rancy  
Directeur  
Bureau des Radiocommunications





## TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
PRÉAMBULE – Radioastronomie et société.....	1
0.1 Introduction à la radioastronomie .....	1
0.2 Le rôle de la radioastronomie.....	1
0.3 Valeur économique et sociétale .....	4
0.3.1 Introduction .....	4
0.3.2 Valeur économique et sociétale de la recherche en radioastronomie .....	4
0.4 Observation radioélectrique de l'activité solaire .....	9
0.4.1 Introduction .....	9
0.4.2 Observation radioélectrique de l'activité solaire: vue d'ensemble .....	9
0.4.3 Impact et valeur sociétale .....	10
Effets des phénomènes solaires sur les satellites .....	11
Effets ionosphériques.....	11
Effets géomagnétiques sur les systèmes au sol.....	11
0.5 Evolutions actuelles en radioastronomie.....	12
0.6 Conclusions.....	12
CHAPITRE 1 – Introduction.....	15
1.1 Le Secteur des radiocommunications et les conférences mondiales des radiocommunications.....	15
1.2 Le Règlement des radiocommunications et les attributions des bandes de fréquences	16
1.3 La radioastronomie: un service de radiocommunication .....	17
1.4 Problèmes d'attribution de fréquences à la radioastronomie.....	18
CHAPITRE 2 – Caractéristiques du service de radioastronomie (SRA).....	21
2.1 Le SRA.....	21
2.2 Origine et nature des émissions radioélectriques d'origine cosmique.....	21
2.3 Rayonnement à spectre continu .....	22
2.3.1 Variabilité temporelle du rayonnement à spectre continu .....	24
2.3.2 Mesure du rayonnement à spectre continu .....	27
2.4 Rayonnement en raies spectrales .....	30
2.4.1 Types de raies spectrales .....	31
2.4.2 Mesure des raies spectrales.....	32
2.5 Pratique moderne .....	34
2.6 Conclusion .....	34

	<i>Page</i>
CHAPITRE 3 – Bandes de fréquences préférées pour les observations radioastronomiques	37
3.1 Considérations d'ordre général.....	37
3.1.1 Observations radioastronomiques à partir du sol.....	37
3.1.2 Observations radioastronomiques à partir de l'espace .....	38
3.2 Bandes préférées pour l'étude du rayonnement à spectre continu.....	39
3.2.1 Observations à basses fréquences .....	40
3.2.2 Observations du rayonnement à spectre continu dans les fréquences élevées .....	41
3.3 Bandes pour les observations de raies spectrales.....	41
CHAPITRE 4 – Vulnérabilité des observations radioastronomiques au brouillage.....	47
4.1 Introduction.....	47
4.2 Considérations de base pour le calcul des niveaux de brouillage .....	47
4.2.1 Critère de seuil de brouillage nuisible .....	47
4.2.2 Diagramme de sensibilité de l'antenne .....	48
4.2.3 Temps de calcul de la moyenne (temps d'intégration).....	49
4.2.4 Pourcentage de temps perdu en raison du brouillage.....	50
4.3 Sensibilité des systèmes de radioastronomie et seuils de brouillage nuisible...	50
4.3.1 Considérations théoriques.....	50
4.3.2 Estimation de la sensibilité et des niveaux de brouillage préjudiciable..	51
4.4 Réaction des interféromètres et des réseaux d'antennes au brouillage radioélectrique	53
4.5 Pulsars.....	58
4.6 Sensibilités obtenues.....	59
4.7 Réflexions sur la limitation des brouillages .....	60
4.7.1 Niveaux de brouillage.....	60
4.7.2 Brouillage d'origine cosmique .....	60
4.7.3 Cas particuliers des émetteurs à bord de satellites géostationnaires .....	61
4.7.4 Filtrage.....	62
4.7.5 Niveaux de brouillage susceptibles d'endommager ou de saturer un récepteur de radioastronomie .....	63
4.8 Analyse de Monte-Carlo .....	63

Annexe 1 DU Chapitre 4 .....	66
CHAPITRE 5 – Partage des bandes de radioastronomie avec les autres services .....	69
5.1 Remarques d'ordre général.....	69
5.1.1 Critères de protection applicables au SRA .....	69
5.2 Distances de séparation nécessaires pour le partage avec un seul émetteur (voir la Recommandation UIT-R RA.1031).....	71
5.3 Partage dans le cas de la visibilité directe.....	72
5.4 Partage avec les services utilisant des émetteurs de Terre .....	73
5.5 Partage avec les services mobiles .....	74
5.6 Partage dans les bandes attribuées à la radioastronomie au-dessous de 40 GHz.....	40 74
5.6.1 Bande 1 330-1 427 MHz.....	76
5.6.2 Bande 4 800-5 000 MHz.....	77
5.6.3 Bandes 22,01-22,21 GHz et 22,21-22,5 GHz .....	77
5.7 Partage des bandes de la radioastronomie au-dessus de 40 GHz .....	78
5.7.1 Partage entre 60 et 275 GHz.....	78
5.7.2 Partage au-dessus de 275 GHz .....	78
5.8 Partage avec la recherche en espace lointain .....	81
5.9 Partage du temps .....	82
5.9.1 Coordination du partage du temps et des fréquences .....	82
CHAPITRE 6 – Brouillage causé à la radioastronomie par des émetteurs fonctionnant dans d'autres bandes .....	85
6.1 Introduction.....	85
6.1.1 Définitions tirées du Règlement des radiocommunications (RR).....	85
6.1.2 Définitions complémentaires .....	85
6.1.3 Mécanismes de brouillage par des émetteurs fonctionnant dans d'autres bandes .....	87
6.2 Limites applicables aux rayonnements non désirés produits par des services actifs.....	87
6.2.1 Limites dans le domaine des rayonnements non essentiels .....	87
6.2.2 Limites dans le domaine des émissions hors bande.....	89
6.2.3 Limites applicables aux rayonnements non désirés des services actifs en vue de protéger les bandes de la radioastronomie .....	89
6.3 Qualité de fonctionnement des récepteurs radioastronomiques .....	90
6.3.1 Filtrage du brouillage en limite de bande .....	90
6.3.2 Effets de non-linéarité et intermodulation .....	92
6.3.3 Linéarité.....	93

	<i>Page</i>
6.3.4 Filtrage et numérisation .....	93
6.4 Brouillage par les émetteurs des services fonctionnant dans d'autres bandes...	94
6.4.1 Services susceptibles de brouiller la radioastronomie par des effets de bandes adjacentes ou d'émissions d'harmoniques .....	94
6.4.2 Le passage à la télévision numérique et son incidence sur l'utilisation non protégée des bandes de la radiodiffusion télévisuelle de Terre par le service de radioastronomie	95
6.4.3 Brouillages causés par des émissions de satellites.....	99
6.5 Emissions non désirées causées par la modulation à large bande.....	104
6.5.1 Utilisation de la modulation à large bande .....	104
6.5.2 Mise en forme des impulsions en vue de réduire les rayonnements non désirés .....	105
6.5.3 Exemple de brouillage par une modulation à large bande.....	105
6.5.4 Exemple: Brouillages radioélectriques causés par le système SMS IRIDIUM (HIBLEO-2).....	106
6.6 Conclusions.....	109
CHAPITRE 7 – Techniques spéciales, applications et sites d'observation .....	111
7.1 Introduction.....	111
7.2 Interférométrie VLBI y compris l'interférométrie VLBI spatiale .....	112
7.2.1 VLBI spatiale.....	112
7.2.2 Applications géodésiques utilisant l'interférométrie VLBI .....	115
7.3 Radioastronomie depuis le point de Lagrange L <sub>2</sub> du système Soleil-Terre .....	116
7.4 Radioastronomie depuis la zone tranquille de la Lune .....	117
7.4.1 La zone tranquille de la Lune .....	118
7.4.2 Domaines spectraux convenant le mieux aux observations depuis la Lune .....	118
7.4.3 Réglementation de l'utilisation de la zone tranquille de la Lune .....	119
7.5 Sites de Terre caractérisés par une absorption atmosphérique peu élevée.....	120
7.5.1 Antarctique .....	120
7.5.2 Cerro Chajnantor, Chili .....	120
7.5.3 Mauna Kea, Hawaï .....	120
7.5.4 Mt Graham, Arizona.....	120
7.6 Observation des pulsars et utilisation comme étalons de temps .....	120
7.6.1 Les pulsars: des horloges étalon .....	121
7.6.2 Pulsars: points de coordonnées de référence .....	121
7.7 Observation de l'activité solaire .....	122

	<i>Page</i>
CHAPITRE 8 – Réduction des brouillages .....	125
8.1 Introduction - Objectifs.....	125
8.2 Signatures et incidence des sources de brouillage radioélectrique .....	126
8.3 Méthodes de réduction des brouillages radioélectriques – notion de niveaux de réduction	127
8.4 Méthodes proactives - modification de l'environnement de brouillage radioélectrique	127
8.5 Prédétection et postdétection .....	128
8.6 Précorrélation.....	128
8.6.1 Traitement numérique au niveau de l'antenne .....	128
8.6.2 Annulation adaptative (temporelle) du bruit.....	129
8.6.3 Filtrage spatial et annulation par un point zéro du diagramme de faisceau .....	130
8.7 Pendant l'étape de corrélation .....	130
8.8 Postcorrélation - avant ou pendant la formation des images.....	131
8.9 Mise en oeuvre au niveau des télescopes - stratégie.....	131
8.10 Conclusions.....	132
CHAPITRE 9 – Zones de silence radioélectrique .....	135
9.1 Introduction.....	135
9.1.1 Zone de silence radioélectrique: définition et critères d'ordre général ...	135
9.1.2 Rôle de la réglementation .....	135
9.2 Considérations touchant à la mise en place d'une zone de silence radioélectrique (ZSR)	136
9.2.1 Considérations d'ordre géographique .....	136
9.2.2 Considérations relatives à la fréquence .....	136
9.2.3 Incidence des brouillages radioélectriques sur les observations du SRA .....	136
9.3 Environnement électromagnétique .....	136
9.3.1 Les sources de rayonnements intentionnels.....	137
9.3.2 Les sources de rayonnements non intentionnels.....	137
9.3.3 Propagation des signaux brouilleurs.....	138
9.4 Méthodes permettant de constituer une ZSR .....	138
9.4.1 Méthodes côté récepteur.....	139
9.4.2 Méthodes côté émetteur - gestion d'une ZSR .....	139
9.5 Conséquence de la mise en place d'une zone de silence radioélectrique (ZSR)141	
9.5.1 Maintenance des ZSR.....	141
9.5.2 Considérations à long terme .....	142

	<i>Page</i>
CHAPITRE 10 – Recherche d'une intelligence extraterrestre (SETI) au moyen d'observations radiofréquences.....	143
10.1 Introduction.....	143
10.2 Détectabilité de signaux SETI.....	144
10.3 Intensité du signal .....	145
10.4 Sensibilité du système de réception .....	145
10.4.1 Puissance minimale détectable du signal .....	146
10.5 Direction de pointage des antennes.....	148
10.6 Identification des signaux et élimination des brouillages .....	149
10.7 Bandes de fréquences envisageables pour les recherches.....	150
CHAPITRE 11 – Radioastronomie par radiodétection au sol.....	153
11.1 Introduction.....	153
11.2 Problèmes de sensibilité.....	156
11.3 Modes d'exploitation et spécifications des largeurs de bandes .....	156
11.4 Installations d'astronomie radar .....	157
APPENDICE 1 – Tableau des bandes de fréquences attribuées à la radioastronomie.....	159
APPENDICE 2 – Enregistrement des stations de radioastronomie.....	162
APPENDICE 3 – Unités en radioastronomie .....	164
APPENDICE 4 – Utilisations pratiques de l'échelle des décibels (dB).....	167
APPENDICE 5 – Liste des abréviations et acronymes .....	169

## PRÉAMBULE

### Radioastronomie et société

#### 0.1 Introduction à la radioastronomie

L'astronomie s'intéresse à la formation, à l'évolution, à la dynamique et à d'autres caractéristiques des objets qui sont situés au-delà de l'atmosphère terrestre, comme le Soleil et ses planètes, les comètes, les étoiles, les galaxies et la matière diffuse spatiale ainsi que l'Univers. Cette démarche, empreinte de curiosité, vise à répondre à certaines des questions les plus fondamentales que se pose l'humanité: «Comment l'Univers est-il né (et y a-t-il eu un commencement)?», «Quelle est son étendue?», «Quel âge a-t-il?», «Comment finira-t-il (et y aura-t-il une fin)?» En tant que science qui nous éclaire sur la place de l'homme et de notre planète dans l'Univers, l'astronomie joue un rôle culturel essentiel pour toute l'humanité. Certaines découvertes très récentes, comme les trous noirs et les quasars, font déjà partie du langage courant.

Quant aux aspects directement applicables, l'astronomie a contribué au progrès humain en posant des jalons importants, notamment l'invention de notre calendrier et du système de référence horaire. De fait, les mathématiques que l'on utilise au quotidien comme la trigonométrie, les logarithmes et le calcul sont pour l'essentiel le fruit de recherches en astronomie, de même que de nombreux principes de base de la statistique.

Les astronomes effectuent des observations sur la totalité du spectre électromagnétique accessible, lequel s'étend bien au-delà de la région du visible encore appelée région «optique». Chaque gamme de fréquences apporte un éclairage différent et nécessite, en règle générale, des télescopes et des détecteurs qui lui sont propres. Les radioastronomes étudient des objets qui rayonnent ou absorbent de l'énergie à des fréquences situées dans le spectre radioélectrique: au sol, les études sont menées là où l'atmosphère est un tant soit peu transparente, dans la gamme des fréquences comprises entre 13 MHz et 2 000 GHz.

Outre son apport essentiel à l'astronomie, le service de radioastronomie (SRA) a contribué de façon fondamentale, par ses produits dérivés, à d'autres domaines scientifiques et technologiques. Le SRA a notamment permis de déterminer l'absorption atmosphérique des ondes radioélectriques, qui est un paramètre particulièrement utile pour les télécommunications. En outre, ce service exprime des besoins nouveaux, qui stimulent sans cesse le développement de récepteurs à faible bruit. Il contribue donc toujours à faire évoluer la base technologique sur laquelle reposent d'autres services comme ceux du secteur des communications par satellite. Bon nombre des premiers ordinateurs électroniques ont été développés pour répondre aux besoins du SRA en matière de puissance de calcul, et la nécessité de disposer d'une plus grande sensibilité a largement contribué à la conception de systèmes d'alimentation et de grandes antennes à faisceau orientable. Le besoin sans cesse renouvelé d'instruments de meilleure qualité continue de stimuler les avancées technologiques dans de multiples domaines, notamment l'électronique, l'ingénierie mécanique et l'informatique.

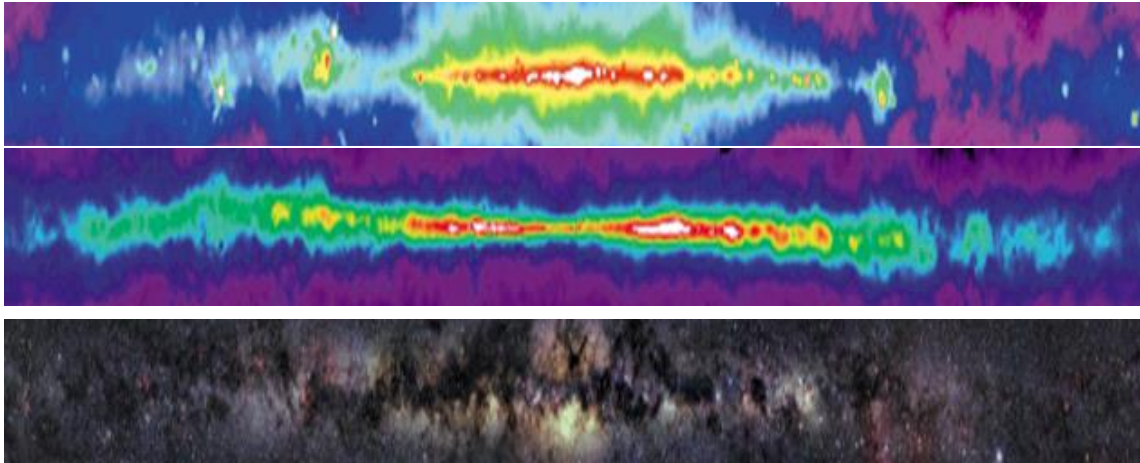
#### 0.2 Le rôle de la radioastronomie

Certains éléments de l'Univers ne peuvent être étudiés que par le biais de leur signature radiofréquence. C'est notamment le cas de son élément matériel le plus abondant, l'hydrogène neutre (HI), qui ne peut être détecté que grâce à sa raie spectrale située à 1 420 MHz. Rappelons qu'après avoir déterminé la répartition de cet élément dans notre Galaxie, la Voie lactée (voir la Figure 0.1), il a été possible de localiser le centre de la Galaxie, de cartographier ses bras spiraux sans ambiguïté et d'établir que la Terre se trouve dans un bras spiral externe. Il s'agit là d'aspects fondamentaux de l'environnement immédiat de l'humanité dans la Galaxie. Les observations radiofréquences ont joué un rôle essentiel en venant compléter de précédents travaux réalisés dans la région optique; en effet, si la poussière interstellaire obscurcit le centre de la Galaxie dans les longueurs d'onde optiques, les décalages Doppler des émissions HI, qui sont facilement mesurables, permettent, eux, de déterminer la distribution de cet élément le long de la ligne de visibilité. Une fois que l'on connaît la position exacte du centre de la Voie lactée, on montre, par mise en correspondance du rayonnement du continuum galactique, que ce centre coïncide avec une source radioélectrique très puissante; des travaux récents effectués dans l'infrarouge proche ont montré qu'il s'agissait d'un trou noir supermassif. Cet exemple montre bien les deux versants de la radioastronomie: d'un côté, elle fait partie intégrante de la recherche astronomique en

général, et, de l'autre, elle constitue une source complémentaire de données pour les observations effectuées sur d'autres longueurs d'onde du spectre électromagnétique.

FIGURE 0.1

**Plan central de notre Galaxie avec, au milieu, le centre galactique. L'image du haut montre la structure du continuum radioélectrique à 410 MHz. L'image du milieu présente l'émission intégrée de l'hydrogène neutre à 1 420 MHz. L'image du bas correspond à la région centrale en lumière optique et montre les structures de poussière sombres**



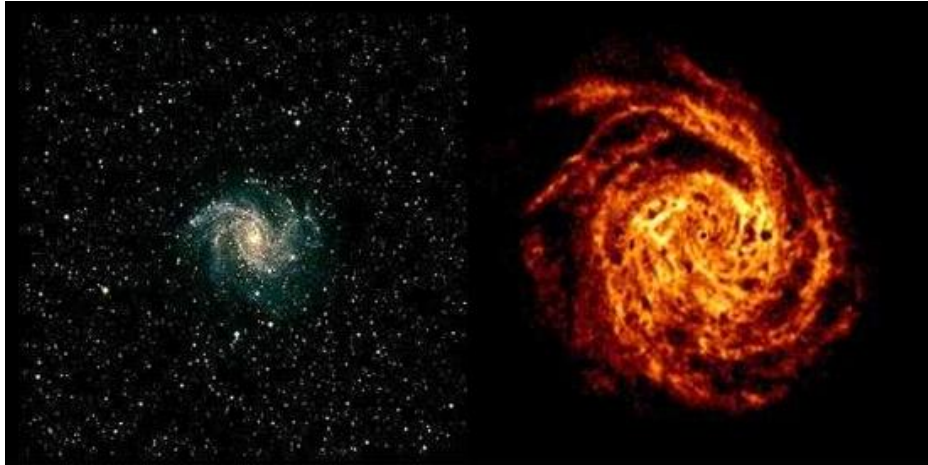
Radio-Astro\_01

A partir de photographies optiques, on peut recenser une multitude d'autres galaxies dans l'espace situé au-delà de la Voie lactée. L'hydrogène neutre (HI) est l'un de leurs composants; présent en abondance, il peut être facilement détecté dans les galaxies proches, ce qui permet d'étudier leur vitesse de récession et leurs mouvements internes. On obtient ainsi leur répartition à trois dimensions dans l'espace ainsi que leur masse précise. Si de nombreuses propriétés des galaxies peuvent être étudiées au moyen d'instruments de mesure exploitant les gammes du visible et de l'infrarouge proche, l'analyse de la répartition des gaz au sein des galaxies passe nécessairement par des techniques de type radioélectrique. Ce point est illustré à la Figure 0.2, qui montre la différence entre, d'un côté, la taille d'une galaxie brillante proche telle qu'observée sur une image optique et, de l'autre, la structure beaucoup plus étendue que révèle son hydrogène neutre. On notera toutefois que des observations du monoxyde de carbone (CO) effectuées à 115,271 GHz donnent un résultat exactement opposé, le CO étant concentré vers le centre de la galaxie. Cette différence dans la répartition du HI et du CO est une conséquence de la combustion nucléaire de l'hydrogène dans les étoiles; cette combustion produit des éléments plus lourds (C et O notamment), qui sont ensuite dissipés dans l'espace interstellaire. La densité des étoiles étant plus importante dans la zone centrale des galaxies, ce principe s'applique également à leurs sous-produits.



FIGURE 0.2

**Galaxie de face NGC 6946 présentée en lumière visible (à gauche) et en émission de la raie de l'hydrogène neutre<sup>1</sup> (HI) à 1 420 MHz (à droite), à la même échelle. Le rayonnement émis par l'hydrogène neutre fait apparaître des structures en bras spiraux de grande envergure, qui s'étendent bien au-delà de l'image optique et révèlent la dynamique de la galaxie. En de nombreux endroits (en particulier au niveau des «trous» de la distribution), des écoulements de gaz à haute vitesse correspondent à la formation d'étoiles en cours. Données radioélectriques fournies par le radiotélescope à synthèse d'ouverture de Westerbork, Pays-Bas**



Radio-Astro\_02

De nombreuses sources radioélectriques ont été découvertes au cours d'anciennes études du continuum céleste à certaines radiofréquences. Le but était ensuite d'être le premier à identifier ces sources par des moyens optiques. L'une des plus grandes surprises fut la découverte de paires de sources radioélectriques disposées, pour la plupart, à intervalles réguliers de part et d'autre de certaines galaxies; ces paires étaient associées à de gigantesques zones d'émissions radioélectriques, mais bien distinctes de ces zones, comme le montrent leurs images optiques. Avec l'amélioration des techniques d'instrumentation et grâce à des études réalisées à des fréquences supérieures, il est apparu que ces zones d'émission étaient en fait les restes de jets fortement relativistes émanant des noyaux galactiques. C'est également une caractéristique des quasars, qui sont aujourd'hui reconnus comme étant des trous noirs supermassifs accrétant de la matière au centre de leur galaxie hôte. Les jets relativistes, dont l'étude nécessite fréquemment l'utilisation de techniques radioélectriques, constituent un thème récurrent en astronomie moderne, cela pour deux raisons: d'une part, les lois physiques qui les sous-tendent ne sont pas encore pleinement comprises, d'autre part, ils se produisent chaque fois que de la matière est activement accrétée par un objet dense, que ce soit un trou noir supermassif, un trou noir stellaire ou une étoile à neutrons, voire le coeur dégénéré d'une étoile normale.

Les radioastronomes ont largement contribué à notre compréhension de l'Univers en tant qu'entité. Cela a commencé avec la découverte en 1964 du fond diffus cosmologique micro-onde (CMB, *cosmic microwave background*) quasi isotrope. Les chercheurs à l'origine de cette découverte reçurent le prix Nobel 1978; ce prix était décerné à des radioastronomes pour la deuxième fois. Les observations du continuum céleste aux fréquences comprises entre 30 et 300 GHz montrent que le CMB affiche une température de brillance de 2,73 K. Le CMB est attribué au rayonnement thermique émis par les gaz ionisés qui remplissaient l'Univers immédiatement après sa création lors du big-bang; autrement dit, il date de l'époque à laquelle les gaz de l'Univers sont devenus opaques vis-à-vis des émissions radioélectriques pour la première fois. Il s'agit du signal «fossile» observable le plus ancien. A la suite de sa découverte, le modèle du big-bang est devenu la description macroscopique communément admise de l'histoire de notre Univers, éliminant la théorie de l'état stationnaire. En 1992, une étude du CMB couvrant l'ensemble du ciel a été réalisée à l'aide d'instruments embarqués dans des satellites. Cette étude a permis de détecter la signature Doppler du mouvement Terre/Soleil/galaxies par

<sup>1</sup> Boomsma, R., Oosterloo, T. A., Fraternali, F., Van Der Hulst, J. M., Sancisi, R., *Astronomy and Astrophysics*, 490, 555 (2008).

rapport au CMB et a révélé l'existence de légères variations point à point (quelques  $10^{-5}$ ) de sa température de brillance. Le prix Nobel 2006 a été décerné pour ces mesures qui ont fait date. Des mesures plus fines de la structure faible de l'intensité du CMB ont ouvert une nouvelle ère de la cosmologie de précision en affinant considérablement les paramètres cosmologiques décrivant l'Univers et en confirmant, de façon indépendante, que sa vitesse d'expansion s'accélère, ce qui fut un résultat inattendu. Pour de futures missions par satellite, il est prévu d'exploiter les propriétés de polarisation du CMB.

Après avoir examiné les phénomènes qui se produisent à très grande échelle, intéressons-nous maintenant aux observations de très petite échelle. Dès 1934, peu après la découverte du neutron, les chercheurs ont émis l'hypothèse qu'il existait des étoiles à neutrons. C'est en 1967 qu'elles ont été découvertes et observées, sous la forme de sources radioélectriques sujettes à des pulsations rapides (pulsars). Cette découverte a été récompensée par le prix Nobel 1974, décerné pour la première fois à des radioastronomes. Parmi les possibilités majeures offertes par les pulsars, l'une est de servir de laboratoires pour la physique fondamentale. Certains pulsars à vitesse de rotation très rapide, avec des périodes de l'ordre de la milliseconde, peuvent servir d'horloges très précises. Certains d'entre eux sont en orbite autour d'un objet compagnon; la combinaison d'une horloge précise en orbite proche autour d'un compagnon, qu'il s'agisse d'une étoile à neutrons, d'une naine blanche ou d'une étoile plus classique, permet de déterminer de façon très précise des orbites et des masses de pulsars, et de mettre à l'épreuve de nombreuses prévisions de la relativité générale. La description, en termes de relativité générale, de l'évolution de l'orbite du premier pulsar découvert dans un système stellaire binaire a fourni la *première* démonstration de l'existence d'un rayonnement d'ondes gravitationnelles, comme le prévoyait la théorie. Le prix Nobel 1993 a été décerné pour cette découverte. En 1992, la première planète découverte au-delà du système solaire a été repérée en observant son effet sur la solution de l'équation horaire d'un pulsar.

Les lois physiques détaillées applicables au sein d'une étoile à neutrons dépendent de la masse de cette étoile. Les équations servant à décrire la matière nucléaire de l'étoile sont donc de plus en plus complexes à mesure que la masse du pulsar augmente. La plupart des pulsars affichent une masse proche de la limite de Chandrasekhar, soit 1,4 fois la masse du Soleil. La découverte d'objets dont la masse est supérieure ou égale à deux fois celle du Soleil suscite un vif intérêt, ce qui n'est guère surprenant, car leur existence même contraint leurs équations d'état, celles-ci étant en principe influencées par des mélanges de formes exotiques de matière au coeur de ces objets. Il n'existe aucun autre moyen de tester les lois physiques applicables. De même, des lois physiques, auxquelles il est impossible d'accéder autrement, peuvent être mises à l'épreuve en observant un ensemble rare de pulsars: les magnétars. Ces étoiles émettent des champs magnétiques ultrapuissants, très supérieurs à ceux que nous pouvons produire en laboratoire. Dans un tout autre domaine de la recherche, une campagne mondiale très complète est actuellement menée en vue de détecter directement des ondes gravitationnelles dans la bande des nanohertz, à partir d'observations horaires provenant d'un ensemble de pulsars milliseconde couvrant l'ensemble du ciel.

## **0.3 Valeur économique et sociétale**

### **0.3.1 Introduction**

Il est difficile d'évaluer la valeur économique que présente l'utilisation du spectre radioélectrique pour la recherche scientifique et ses applications en quantifiant simplement ses coûts et ses avantages par rapport à l'utilisation du spectre à d'autres fins. Il convient aussi de prendre en compte les effets indirects de la radioastronomie sur l'économie. En effet, certaines innovations technologiques apportées par les radioastronomes ont été mises en oeuvre dans de nombreuses applications qui profitent à la société tout entière. Par exemple, la recherche sur les récepteurs de radioastronomie (voir le § 0.3.2.1) est à l'origine de produits dérivés que l'on retrouve aujourd'hui dans certains équipements de télécommunication spécialisés ainsi que dans des applications grand public produites en série. Il est tout aussi difficile d'estimer les avantages économiques et sociétaux des algorithmes d'imagerie médicale qui ont été inspirés, à l'origine, par des techniques d'imagerie radioastronomique (voir le § 0.3.2.4).

### **0.3.2 Valeur économique et sociétale de la recherche en radioastronomie**

Les progrès de la radioastronomie dépendent des avancées réalisées dans deux autres domaines: les systèmes de réception d'une part, et les techniques numériques d'autre part. En règle générale, les instruments utilisés en

radioastronomie reposent sur les technologies les plus évoluées; les astronomes jouent à cet égard un rôle actif en poussant ces technologies à leurs limites. Les paragraphes suivants présentent des exemples de travaux de recherche en radioastronomie intégrés dans des applications qui servent les intérêts de la société dans d'autres domaines.

### **0.3.2.1 Techniques de télécommunication**

#### **Systemes de réception**

Les systèmes de radioastronomie comprennent des antennes à gain élevé, des récepteurs à faible bruit, des oscillateurs à semi-conducteurs et des multiplicateurs de fréquence. Amplificateurs paramétriques, amplificateurs TEC à arséniure de gallium et à refroidissement cryogénique, amplificateurs à mobilité électronique élevée (HEMT) et mélangeurs supraconducteur-isolant-supraconducteur (SIS), autant d'équipements dont le développement a été motivé ou influencé par des besoins exprimés par les radioastronomes. Ces équipements ont permis de concevoir des récepteurs fonctionnant dans des largeurs de bande extrêmement grandes et à des températures descendant jusqu'à 2 K. Les températures de bruit atteintes à certaines fréquences sont aujourd'hui proches de la limite quantique de ce qui est techniquement réalisable. Ces technologies sont utilisées dans certains systèmes de télécommunication dans l'espace lointain parmi les plus élaborés, leurs oscillateurs locaux étant synchronisés dans le temps par des étalons de fréquence atomiques à des niveaux inférieurs à la picoseconde. Ces étalons constituent le réseau dorsal du système de référence horaire utilisé pour la navigation terrestre et la navigation spatiale.

#### **Le principe d'homologie**

La déformation gravitationnelle est l'un des obstacles majeurs à la conception d'antennes paraboliques orientables de très grande dimension dotées de surfaces réfléchissantes précises. Ce phénomène modifie la forme des antennes lors du passage d'une position à la suivante. Ce problème a été résolu en 1967 grâce au principe d'homologie<sup>2</sup>. Les antennes conçues selon ce principe se déforment lentement sous l'effet du stress gravitationnel, le long d'une séquence de paraboloïdes, avec, pour conséquence, des changements de la position focale. Les effets de la déformation gravitationnelle et l'affaiblissement du signal qui en résulte sont réduits au minimum en s'assurant simplement que le récepteur et son alimentation suivent correctement ces changements de position focale. Toutes les antennes paraboliques réfléchissantes de grande dimension ont aujourd'hui recours à l'homologie. Ce point revêt une importance considérable dans les longueurs d'onde millimétriques.

#### **Technologie d'antenne**

Les radioastronomes ont été les premiers à utiliser des cornets d'alimentation à polarisation circulaire. Par la suite, les concepteurs d'émetteurs de satellite ont repris cette technique pour émettre les deux polarisations de façon indépendante via le même cornet d'alimentation, permettant ainsi de réduire la masse et la taille du système.

### **0.3.2.2 Technique d'interférométrie**

Les radioastronomes ont développé l'interférométrie pour améliorer la résolution angulaire et aussi en tant que technique d'imagerie. Ils l'ont ensuite utilisée pour produire des relevés numérisés du ciel radioélectrique pixel par pixel. Le Chapitre 7 décrit cette technique, qui, depuis sa mise au point, joue un rôle important dans divers domaines: astronomie sur l'ensemble du spectre électromagnétique, fibres optiques, métrologie pour l'ingénierie, métrologie optique, océanographie, sismologie, mécanique quantique, physique nucléaire et des particules, physique des plasmas et télédétection.

Les radioastronomes ont aussi été les premiers à développer des techniques de reconstruction et de nettoyage d'images, dont l'objet est d'éliminer, dans les images, la quasi-totalité des effets dus aux instruments et à l'environnement. Ces méthodes sont utilisées dans les études du ciel par voie de Terre et par satellite et pour l'étude de la Terre par le service d'exploration de la Terre par satellite (SETS).

---

<sup>2</sup> Von Hörner, S., "Design of large steerable antennas", *The Astronomical Journal*, 72 (1967), 35.

Dans la seconde moitié du XXe siècle, des systèmes de radio-interférométrie ont été couramment utilisés pour faciliter l'atterrissage automatique des avions. En fait, ce type de système a d'abord été développé par un laboratoire de radioastronomie puis commercialisé dans le monde entier. C'est la même technologie qui est aujourd'hui utilisée pour localiser les utilisateurs de téléphone mobile et permettre aux services d'urgence d'intervenir rapidement sur les lieux des accidents; elle permet aussi de faire du marketing ciblé et d'offrir des services reposant sur la localisation. Le réseau hertzien WiFi est un exemple bien connu de système opérationnel basé sur cette technique.

### **Applications WiFi**

Les réflexions ont été une difficulté majeure lors du développement des connexions sans fil entre terminaux d'ordinateur. Au niveau du récepteur, elles se présentent sous la forme d'une série d'échos qui arrivent après le signal émis. Or cette difficulté était bien connue des radioastronomes, qui avaient développé des techniques de traitement du signal pour surmonter des problèmes comparables causés par les réflexions qui se produisent dans l'atmosphère. Ainsi, les réseaux locaux par voie hertzienne envoient leurs données sur différentes fréquences et les signaux sont recombinaés au niveau du récepteur selon la même procédure que celle utilisée en radioastronomie.

### **Navigation**

Au fil des siècles, l'astronomie a apporté diverses contributions majeures à la navigation au sol et dans l'espace. Le développement des radiosextants pour la navigation maritime a permis la géolocalisation précise par ciel couvert et les jours de pluie. La géolocalisation des téléphones portables en urgence selon la méthode de la multilatération est une application récente de la radiointerférométrie. Cette application repose sur la puissance du signal reçu par des mâts d'antenne situés à proximité. Pour localiser un objet, on calcule précisément la différence entre les instants d'arrivée (TDOA) d'un signal émis par cet objet, au niveau de trois récepteurs ou plus. Cette technique peut aussi servir à localiser un récepteur en mesurant la TDOA d'un signal émis par trois émetteurs synchronisés ou plus.

#### **0.3.2.3 Technologie informatique**

Les radioastronomes ont développé des techniques numériques de pointe pour corrélérer et enregistrer les données fournies par les télescopes. Des réseaux d'ordinateurs modernes très puissants (traitement parallèle) servent ensuite à traiter les volumes de données extrêmement importants recueillis par les réseaux d'interféromètres. Parmi les méthodes de traitement les plus avancées, citons notamment la synthèse à faisceaux multiples simultanés, l'atténuation en temps réel du brouillage radioélectrique et la reconstruction de structures de sources radioélectriques complexes. En fait, le traitement de données radioastronomiques destiné à la corrélation en temps réel de données d'interférométrie provenant d'antennes situées sur les quatre continents est utilisé pour évaluer la capacité des réseaux de données à large bande en développement.

### **Le langage de programmation FORTH**

Le langage de programmation FORTH (ou Forth) développé à l'Observatoire national de radioastronomie des Etats-Unis d'Amérique (USA NRAO) au début des années 1970 est un produit dérivé bien visible de la radioastronomie. La première application de ce langage a été la commande et le traitement des données de l'un des télescopes du NRAO. Le langage FORTH a notamment été utilisé dans les premiers terminaux portatifs des livreurs du transporteur Federal Express et il est toujours utilisé dans de nombreux systèmes sous des formes améliorées. Parmi les autres applications, citons les logiciels de poursuite des satellites ainsi que le logiciel de simulation du bras embarqué à bord de la navette spatiale (bras de 15 m de long à six articulations, construit par le Canada). Ce bras a été utilisé dans des opérations de mise en service et de récupération de satellites, et pour aider les astronautes dans leurs tâches d'entretien (par exemple, la réparation et la mise à jour du télescope spatial Hubble)<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Pour en savoir plus sur les utilisations du langage FORTH, on pourra se reporter à l'adresse <http://www.forth.com/index.html>.

#### **0.3.2.4 Technologie médicale**

Les radioastronomes sont à l'origine des techniques mathématiques qui permettent de reconstruire des images à deux dimensions à partir d'acquisitions à une dimension, et des images à trois dimensions à partir d'images à deux dimensions<sup>4</sup>. Cette technique de reconstruction d'images a été intégrée dans plusieurs systèmes: tomographie moderne par ordinateur, tomographie par émission de positons et imagerie par résonance magnétique. Les observations radioélectriques des sources cosmiques éloignées sont, en substance, des mesures de la température de ces sources. Cette technique a été adaptée pour effectuer des mesures *non invasives* de la température des tissus humains.

La tomographie par ordinateur est une méthode d'imagerie médicale qui consiste à produire, à l'aide d'algorithmes numériques, une image à trois dimensions de l'intérieur d'un objet à partir d'un grand nombre de radiographies à deux dimensions acquises autour d'un seul axe de rotation.

Sur les images hyperfréquences des tissus profonds, les tumeurs malignes apparaissent comme des régions de température anormale et peuvent ainsi être facilement détectées. La thermographie à hyperfréquences permet de détecter les cancers du sein avec un taux de vrais positifs égal à 96%.

#### **Cancer de la peau**

L'extraction d'informations pertinentes à partir d'une masse de signaux est l'une des difficultés majeures que rencontrent les astronomes qui étudient les étoiles et les galaxies. Les radioastronomes ont été les premiers astronomes à manipuler des données numériques; ils ont donc développé les algorithmes nécessaires pour repérer des signaux de faible intensité dans un fond de «bruit» aléatoire. Ces algorithmes ont aidé d'autres astronomes à mettre en évidence des milliers de sources de rayons X ténues et à analyser la structure de ces sources de manière quantitative.

Ces techniques s'appliquent à de nombreux autres cas, lorsque des données très importantes sont enfouies dans un bruit de fond. En collaboration avec des médecins et avec le soutien de l'Agence spatiale allemande, des experts des radiofréquences ont ainsi développé un système destiné à reconnaître précocement les cancers de la peau. De petites différences de couleur peuvent permettre de détecter et de mesurer la croissance de cellules irrégulières; cette croissance est associée à des mélanomes malins, qui sont une forme particulièrement virulente de cancer de la peau.

#### **Radiographie numérique**

La technologie d'imagerie numérique a aussi été adaptée pour faciliter la mesure des émissions à rayons X provenant des amas de galaxies. Ces émissions sont importantes pour les astrophysiciens qui développent des théories en relation avec la cosmologie et les débuts de l'Univers.

Cette technique a ensuite été utilisée dans la conception d'un système de radiographie numérique destiné à améliorer l'efficacité, la souplesse et la rentabilité des examens radiographiques réalisés à l'hôpital. En éliminant les frais liés aux films à rayons X ainsi que d'autres procédures d'acquisition d'images, ce système permet de réduire les dépenses de fonctionnement de l'hôpital et des salles d'urgence. Les examens radiographiques sont menés de façon traditionnelle, si ce n'est que les images corporelles ne sont plus imprimées sur film, mais stockées dans la mémoire de l'ordinateur. Le médecin (et/ou le patient) peut immédiatement visualiser les images et celles-ci peuvent être rapidement transmises sans perte, via internet, à des spécialistes qui ne sont pas sur place.

#### **0.3.2.5 Etalons horaires et de fréquence**

Par nécessité, les spécialistes de l'interférométrie à très grande ligne de base (VLBI) ont mis au point des étalons horaires extrêmement stables et précis ainsi que des méthodes de comparaison d'horloges atteignant des niveaux d'incertitude de quelques  $10^{-16}$  s. Plus tard, ces systèmes ont été commercialisés. Ils sont aujourd'hui utilisés pour la navigation par satellite, la communication spatiale et la défense. Les systèmes horaires et de coordonnées des systèmes mondiaux du service de radionavigation par satellite (SRNS) (GPS,

---

<sup>4</sup> Bracewell, R.N. et Riddle, A.C., "Inversion of fan beam scans in radio astronomy", *Astrophys. Journal*, **150**, 427.

GLONASS, Galileo) sont liés à la Terre et au cosmos grâce aux activités de maintenance de l'IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry/service international de VLBI pour la géodésie et l'astrométrie).

Les horloges de précision fabriquées par l'homme ont marqué le début de l'ère moderne de la navigation en toute sécurité. Le Bureau International de l'Heure poursuit ses travaux sur la recherche d'horloges toujours plus précises et la détermination du temps à partir d'un ensemble d'horloges atomiques. Cela étant, le meilleur moyen de contrôler de façon indépendante la stabilité à long terme des étalons du temps atomique international est de recourir aux observations horaires des pulsars milliseconde effectuées par les radioastronomes. Ces observations sont réalisées sur un ensemble constitué des pulsars les plus stables, cela pour réduire au minimum les effets dus aux changements séculaires du contenu électronique du milieu interstellaire le long des lignes de visibilité et aussi pour s'affranchir au mieux des éventuels comportements erratiques des pulsars pris séparément. La stabilité à long terme des étalons du temps atomique est également contrôlée de façon indépendante en ajustant les observations horaires de pulsars milliseconde appartenant à des systèmes stellaires binaires pour refléter les paramètres orbitaux du système.

#### **0.3.2.6 Observation de la Terre**

Certaines méthodes d'interférométrie utilisées en radioastronomie ont servi à mettre au point des techniques de télédétection passive destinées à mesurer la température de l'atmosphère terrestre ainsi que d'autres caractéristiques de la surface de la Terre, comme la répartition de la vapeur d'eau, la teneur en eau des nuages, les précipitations et le niveau d'autres impuretés telles que le monoxyde de carbone.

La détection des feux de forêt à partir de leur rayonnement thermique hyperfréquences repose sur la même technique.

#### **0.3.2.7 Géodésie**

Pensée à l'origine comme un outil destiné à rassembler des données sur la structure détaillée et la position de sources astronomiques, la technique VLBI a aussi été appliquée à d'autres fins. Ainsi, les mesures VLBI extrêmement précises de la position de quasars et de sources radioélectriques distantes fournissent le référentiel spatial le plus précis de l'humanité. En prenant certaines sources célestes comme points de référence, il est possible, grâce à la VLBI de Terre, de mesurer les déplacements inhérents des télescopes placés au sol, notamment ceux causés par la dérive des continents ou par les glissements des plaques tectoniques au niveau des lignes de faille. Ces mesures facilitent l'estimation de la probabilité des séismes. L'IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry/service international de VLBI pour la géodésie et l'astrométrie) a été créé pour fournir des services qui viennent en appui des activités opérationnelles et de recherche en géodésie, en géophysique et en astrométrie<sup>5</sup>. Les techniques VLBI de Terre et la poursuite Doppler de précision sont également utilisées pour les missions de navigation spatiale de haute précision dans notre système solaire. C'est ainsi qu'on a pu déterminer la position de la sonde Huygens envoyée par l'Agence spatiale européenne au moment de son entrée dans l'atmosphère de Titan, le plus grand satellite de Saturne.

#### **0.3.2.8 Exploration minière**

Les techniques d'imagerie décrites au § 0.3.2.4 sont aussi directement applicables à la recherche de gisements de pétrole et de minéraux sous la surface de la Terre. Après avoir déclenché des explosions en chaîne de petite surface, on effectue des mesures au moyen d'un ensemble de sismomètres; les données résultantes sont soumises à un traitement comparable à celui utilisé en imagerie.

#### **0.3.2.9 Astronomie par radiodétection**

L'astronomie par radiodétection fait intervenir à la fois l'émission et la réception d'ondes radioélectriques; en cela, elle diffère de la radioastronomie. Il en résulte un affaiblissement géométrique bidirectionnel, qui limite son utilisation à l'étude d'objets situés au voisinage du soleil. Cela étant, il s'agit de la seule méthode capable de détecter des débris spatiaux de petite dimension. Une de ses applications types est la détection et la poursuite d'objets proches de la Terre (météorites et astéroïdes) qui se déplacent à proximité de notre planète ou qui sont susceptibles d'entrer en collision avec elle. L'astronomie par radiodétection fournit le moyen le plus complet

---

<sup>5</sup> Voir: <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/html>.

d'étudier ces objets et constitue, à ce titre, un service de prévision et de prévention des catastrophes à l'échelle planétaire. De plus, les radars permettent de détecter les débris spatiaux en orbite autour de la Terre; les opérateurs de satellites utilisent ces informations pour déplacer leurs engins spatiaux et ainsi éviter les collisions. L'astronomie par radiodétection est aussi le seul moyen d'étudier la densité des débris spatiaux dont la taille est inférieure à 1 cm environ.

Les techniques d'imagerie de l'astronomie par radiodétection (pour le champ proche) sont utilisées, à des fins civiles et militaires, pour les engins spatiaux imageurs en orbite.

## **0.4 Observation radioélectrique de l'activité solaire**

### **0.4.1 Introduction**

L'observation radioélectrique de l'activité solaire est une branche spécialisée de la radioastronomie. Elle joue un rôle actif dans la recherche en météorologie de l'espace, facilite les prévisions météorologiques spatiales et permet de signaler en temps utile les éruptions solaires susceptibles de perturber les activités humaines. Notre sensibilité au comportement du Soleil a conduit à l'étude d'une nouvelle discipline appelée «météorologie de l'espace». L'environnement spatial proche de la Terre y est analysé en effectuant des mesures des rayonnements électromagnétiques et du comportement du plasma solaire. Sur des échelles de temps longues et intermédiaires, les effets de la variabilité de l'activité solaire sur le climat sont tout aussi importants que l'activité volcanique et l'activité humaine. Sur des échelles de temps plus courtes, la météorologie de l'espace joue aussi un rôle majeur en raison des perturbations que les manifestations de l'activité solaire, en particulier les éjections de matière coronale, peuvent causer à nos infrastructures techniques, que ce soit dans l'espace, dans l'air ou sur Terre. Les éjections de matière coronale se produisent une fois par jour, ou plus fréquemment en période d'activité solaire maximale.

En combinant des données issues de radiospectrographes placés au sol avec des informations complémentaires obtenues par satellite, il est possible d'évaluer la masse, l'énergie, la vitesse et la direction des éjections de matière coronale, bien avant que celles-ci n'atteignent la Terre. La gravité et l'instant probable d'arrivée sur Terre d'une perturbation peuvent être calculés à partir de ces mesures, ce qui offre la possibilité d'atténuer les répercussions préjudiciables sur des technologies humaines très diverses: télécommunications, systèmes de navigation par satellite, activités spatiales (satellites, missions habitées), aviation, réseaux électriques, etc. L'activité solaire entraîne en outre une dégradation progressive des transformateurs électriques, une corrosion des canalisations à grande distance et de nombreux autres effets indésirables. Les répercussions des éruptions solaires géantes – autre phénomène naturel moins fréquent et aléatoire – peuvent aussi être graves. Ce type de manifestation de l'activité solaire, s'il n'est pas atténué, est susceptible de perturber, de façon majeure et à l'échelle de la planète, notre société tributaire de la technologie. Citons, à titre d'exemple, l'éruption solaire de très grande ampleur qui s'est produite en mars 1989 et dont les dégâts ont coûté plus de  $10^9$  USD. Aujourd'hui, si des mesures appropriées n'étaient pas prises avant qu'une telle éruption solaire géante ne frappe la Terre, les pertes financières pourraient être beaucoup plus importantes. A telle enseigne que selon certaines estimations, le coût probable d'un tel événement serait compris entre 2 et  $3 \times 10^{12}$  USD, auxquels s'ajouterait un temps de retour à la normale estimé entre 2 et 3 ans, car de nombreuses pièces de remplacement sont trop coûteuses pour être gardées en réserve (réparation du réseau électrique, etc.). Ce risque incontrôlable souligne le rôle crucial des systèmes d'alerte précoce qui reposent sur des installations d'observation de l'activité solaire en continu, installations parmi lesquelles figurent les radiotélescopes solaires situés au sol.

Il existe de nombreuses manières d'observer l'activité du Soleil, l'une d'elles consistant simplement à compter les taches solaires. Les mesures radioélectriques présentent plusieurs avantages: elles sont effectuées automatiquement à partir du sol, nécessitent peu ou pas d'interventions humaines et sont peu coûteuses. De plus, l'étalonnage, la qualité et la cohérence des données peuvent être maintenus sur de longues périodes.

### **0.4.2 Observation radioélectrique de l'activité solaire: vue d'ensemble**

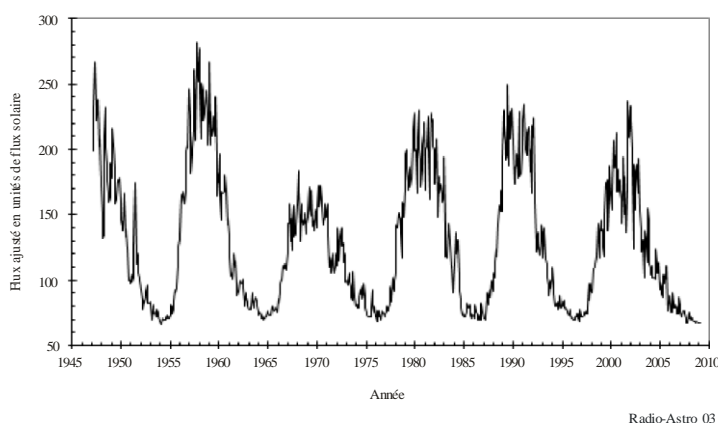
Les mesures radioélectriques du Soleil sont des indicateurs directs du niveau et de la nature de l'activité solaire. Elles peuvent aussi servir de valeurs indirectes pour d'autres paramètres qui sont difficiles ou impossibles à mesurer avec la précision requise, en continu et dans la durée. Les systèmes d'observation du flux solaire sont des radiotélescopes spécialement conçus à cet effet. Ils sont munis d'antennes suffisamment petites pour «voir»

la totalité du disque solaire avec la même sensibilité, ainsi que de récepteurs à dynamique linéaire très élevée, qui permettent de mesurer le flux solaire avec précision.

Des études ont montré que le flux solaire à 2,8 GHz (10,7 cm) est fortement corrélé avec les données, plus récentes, des flux de rayonnement X et ultraviolet fournies par les plates-formes spatiales et avec certaines caractéristiques du vent solaire. Tous ces flux d'énergie jouent un rôle direct dans le réchauffement des couches supérieures de l'atmosphère. Etant donné que les mesures spatiales ne sont disponibles que depuis les années 1990 et que leur continuité sur le long terme n'est pas garantie du fait de la durée de vie limitée des satellites spatiaux, on utilise l'indice du flux à 2,8 GHz pour prévoir la traînée atmosphérique qui s'exerce sur les satellites et ainsi les maintenir sur leur orbite. A l'origine, la fréquence 2,8 GHz a été choisie «au hasard», bien qu'il existe un large pic dans la composante S (ou composante à variation lente) de l'émission radioélectrique du Soleil aux longueurs d'onde centimétriques, au voisinage de 10 cm. Toutefois, il ne s'agit que d'un échantillon d'un continuum d'émission compris entre 0,5 et 10 GHz produit par divers phénomènes à la surface du Soleil. Pour mieux comprendre les sources de cette émission et mieux évaluer les indicateurs indirects du «climat» à long terme, il est nécessaire de mesurer le flux à plusieurs fréquences. Pour ce faire, l'Europe, l'Amérique du Nord et le Japon ont prévu de mettre en service de nouveaux systèmes d'observation du flux, sachant toutefois que les mesures absolues ne peuvent être effectuées que dans les bandes attribuées au SRA.

FIGURE 0.3

**Valeurs moyennes annuelles du flux solaire radioélectrique à 2,8 GHz, observées par le Conseil national de recherches Canada depuis 1947**



### 0.4.3 Impact et valeur sociétale

Les valeurs du flux radioélectrique solaire peuvent servir dans plusieurs domaines, que l'on peut regrouper en deux grandes catégories: environnement d'une part, technique/infrastructure d'autre part.

#### 0.4.3.1 Etudes d'application/surveillance de l'environnement

L'émission radioélectrique solaire est utilisée comme un indicateur indirect pour tous les flux de rayonnement qui ont de l'importance d'un point de vue environnemental et une incidence sur la structure de température verticale et sur d'autres paramètres de la partie de l'atmosphère située au-delà de 80 km d'altitude environ (appelée «ionosphère»). Ces paramètres sont mesurés au moyen de divers capteurs environnementaux. Cela étant, pour la modélisation, il est nécessaire de disposer d'informations de contexte et donc de quantifier les facteurs solaires. Par exemple, la densité de l'atmosphère au-dessus d'une centaine de kilomètres est modélisée au moyen du flux radioélectrique solaire à 2,8 GHz, qui est utilisé comme un paramètre d'entrée (empirique).

#### 0.4.3.2 Utilisations relevant de la technique/des infrastructures

Il arrive que les rayonnements solaires, en particulier dans la gamme des ondes métriques, soient suffisamment puissants pour perturber les systèmes radio (communications par exemple), et ce en augmentant leurs niveaux de bruit.



## **Effets des phénomènes solaires sur les satellites**

Les satellites évoluent dans un environnement rempli de particules à haute énergie provenant du Soleil. Ces particules peuvent dégrader temporairement ou endommager de façon permanente les composants électroniques, de même qu'une accumulation de charges sur un aéronef peut être à l'origine d'ordres fantômes qui perturbent son fonctionnement. En outre, les satellites en orbite terrestre basse sont soumis à des augmentations de la traînée atmosphérique, qui sont susceptibles de modifier leur position et d'augmenter la vitesse de leur déclin d'orbite. Le niveau général de l'activité solaire, indiqué au moyen d'indices tels que le flux radioélectrique solaire à 2,8 GHz, permet de prévoir le degré de réchauffement et d'expansion dans la haute atmosphère ainsi que les conséquences qui en résultent pour les orbites des satellites.

## **Effets ionosphériques**

Etant donné que l'ionosphère est produite par le Soleil, les variations de l'activité solaire se traduisent par des modifications concomitantes de l'ionosphère, ce qui peut avoir deux effets: augmentation de la capacité de communication ou extinction totale des signaux pendant des heures si les rayons X provenant du Soleil augmentent de façon significative le degré d'ionisation dans la région D. L'ionosphère étant un milieu de propagation essentiel pour les communications, il est capital de pouvoir prévoir les conditions ionosphériques: l'UIT utilise des données radioélectriques comme un outil de diagnostic ionosphérique dans les conditions habituelles et comme une aide pour prévoir l'évolution de ces conditions à court terme.

Sur les parcours à longue distance au-dessus des pôles, les aéronefs commerciaux utilisent les ondes décamétriques. Deux raisons à cela: d'une part, il n'existe pas d'infrastructures en ondes métriques aux latitudes élevées ( $>82^\circ$ ) et, d'autre part, la structure des satellites géosynchrones est proche de l'horizon. Les perturbations ionosphériques sont particulièrement fréquentes et perturbatrices aux latitudes hautes; il est donc nécessaire d'effectuer des mesures radioélectriques de l'activité solaire afin de prévoir les conditions ionosphériques au niveau des pôles et ainsi fournir aux compagnies aériennes des informations suffisantes pour qu'elles ajustent leurs plans de vol si nécessaire.

## **Effets géomagnétiques sur les systèmes au sol**

Les fluctuations lentes et rapides du champ magnétique terrestre sont dues aux variations de la vitesse et de la densité du vent solaire et, tout particulièrement, à l'impact de plasmoïdes projetés pendant les éruptions solaires et les éjections de matière coronale. Ces fluctuations induisent des courants électriques dans les structures métalliques longues, comme les lignes électriques, les canalisations, les câbles téléphoniques et les voies ferrées. Les courants induits par les lignes électriques provoquent un décalage des points de fonctionnement des transformateurs, ce qui, dans les transformateurs très chargés, peut entraîner une saturation du cœur et une surchauffe des bobinages. Cela étant, les orages magnétiques majeurs (celui du 13 mars 1989 par exemple) produisent des courants de beaucoup plus grande intensité, qui sont susceptibles de provoquer une panne immédiate du transformateur, comme ce fut effectivement le cas à Québec (Canada). Cet incident provoqua une panne du réseau de distribution électrique pendant plus de neuf heures. L'impact économique de cette panne d'infrastructure mesuré en termes de pertes de production industrielle a été chiffré à quelque  $10^9$  USD.

FIGURE 0.4

**Transformateur d'un réseau de distribution électrique brûlé en raison d'une manifestation de l'activité solaire le 13 mars 1989**



Radio-Astro\_04

Les courants induits dans les voies ferrées peuvent brouiller les systèmes de signalisation et de détection de la position des trains. Dans les canalisations, ils créent en outre de petites différences de potentiel de part et d'autre des inhomogénéités du métal et des soudures, ce qui augmente la vitesse de corrosion cathodique.

Les canalisations peuvent s'étendre sur des milliers de kilomètres, souvent dans des conditions topographiques et climatiques défavorables, où les coûts d'inspection et de maintenance peuvent être élevés. Cela étant, une panne peut se révéler encore plus coûteuse et s'accompagner de conséquences environnementales. Il est donc nécessaire de concevoir des modèles d'inspection et de maintenance reposant sur l'activité géomagnétique.

## **0.5 Evolutions actuelles en radioastronomie**

Dans le champ de la radioastronomie, on cherche aujourd'hui à améliorer encore les sensibilités à toutes les fréquences. Etant donné que les récepteurs actuels s'approchent de la limite quantique à de nombreuses fréquences, les efforts s'orientent désormais vers un agrandissement des aires de captation et l'utilisation de largeurs de bande opérationnelles plus importantes. Les télescopes existants sont mis à niveau pour accueillir des récepteurs à large bande (entre 1 et 8 GHz selon la fréquence), pour les observations du continuum et des raies spectrales. Des initiatives internationales sont en cours en vue de construire des radiotélescopes de nouvelle génération dont l'aire de captation est nettement plus grande.

Exemples:

- 1) Projet de réseau d'un kilomètre carré (SKA/*square kilometer array*), dont l'objet est de construire un réseau géant de radiointerféromètres; affichant une aire de captation totale d'un kilomètre carré et des lignes de base atteignant 3 000 km, il sera exploité sur des fréquences comprises entre 100 MHz et 25 GHz.
- 2) Réseau basses fréquences (LOFAR) situé aux Pays-Bas et dans les pays voisins: ce réseau de radiointerféromètres affiche une aire de captation totale de 100 000 m<sup>2</sup> et des lignes de base atteignant 1 000 km; il est exploité entre 30 et 250 MHz.
- 3) Grand réseau d'antennes millimétriques/submillimétriques de l'Atacama (ALMA): ce réseau, constitué de 64 antennes, est situé sur un plateau des Andes à 5 km d'altitude et fonctionne dans la gamme de fréquences 30-850 GHz.

## **0.6 Conclusions**

La radioastronomie a permis de découvrir des phénomènes radioélectriques totalement nouveaux et non prévus par la théorie. Citons notamment le fond diffus cosmologique micro-onde, les gaz et plasmas ionisés

interstellaires, mais aussi les pulsars, les quasars et les trous noirs. Cette discipline a également permis de valider, à maintes reprises, les théories fondamentales de la physique comme la relativité générale. Elle constitue en outre un laboratoire pour des phénomènes de physique fondamentale qui, sans cela, resteraient inaccessibles.

La gamme des fréquences utilisées par le service de radioastronomie présente une valeur sociétale et économique considérable. Cela étant, il est difficile de quantifier les avantages qui en découlent, car ceux-ci concernent la société tout entière, sont souvent portés par des applications développées dans le cadre d'autres technologies, ne se concrétisent souvent qu'après de nombreuses années et peuvent être difficiles à prévoir. Le SRA est à l'origine de technologies qui ont permis le développement d'applications aujourd'hui très répandues, et ce dans des domaines aussi divers que le diagnostic médical, les télécommunications, les étalons de temps et de fréquence, l'observation de la Terre, l'informatique, la navigation, la géophysique et l'exploration minière.

De nombreuses activités menées dans le cadre du SRA sont organisées à l'échelle mondiale. Les questions relatives à l'utilisation du spectre doivent donc être examinées à un niveau international. En effet, certaines décisions prises unilatéralement peuvent avoir des répercussions, dans le monde entier, sur l'utilisation des fréquences et sur la faisabilité des mesures.

Les instabilités du champ magnétique du Soleil peuvent se traduire par des éruptions solaires énergétiques et déclencher des éjections de matière coronale. Ces phénomènes sont susceptibles de dégrader ou d'endommager directement des technologies à base d'électronique et des infrastructures terrestres en grand nombre, engendrant ainsi des coûts considérables. Depuis plus de soixante ans, l'observation du rayonnement radioélectrique solaire à partir du sol offre un moyen fiable, cohérent et peu coûteux de surveillance de l'activité solaire. Il s'agit d'une technologie mature et désormais bien comprise, grâce à laquelle, il est possible de signaler l'arrivée d'événements transitoire en temps utile.



## CHAPITRE 1

### Introduction

#### 1.1 Le Secteur des radiocommunications et les conférences mondiales des radiocommunications

Le présent Manuel s'intéresse principalement aux aspects de la radioastronomie touchant à la coordination des fréquences, c'est-à-dire à l'utilisation du spectre radioélectrique réglementée par un accord mutuel qui vise à éviter les brouillages entre services radioélectriques. A l'échelle internationale, l'utilisation du spectre des fréquences est réglementée par l'Union internationale des télécommunications (UIT) qui est une institution spécialisée de l'Organisation des Nations Unies.

Le Secteur des radiocommunications (UIT-R), qui fait partie de l'UIT, a été créé le 1er mars 1993; il a remplacé le Comité consultatif international des radiocommunications (CCIR) et son secrétariat, qui exerçaient jusqu'alors des fonctions similaires. L'UIT-R englobe les conférences mondiales et régionales des radiocommunications, les assemblées des radiocommunications, le Comité du Règlement des radiocommunications, les Commissions d'études des radiocommunications, le Groupe consultatif des radiocommunications et le Bureau des radiocommunications, qui est dirigé par un directeur élu.

Le Règlement des radiocommunications de l'UIT, qui est à la base de la planification du spectre radioélectrique, est issu de Conférences mondiales des radiocommunications (CMR), autrefois appelées Conférences administratives mondiales des radiocommunications (CAMR), qui se tiennent périodiquement, à intervalles de quelques années. L'objectif de ces conférences est de présenter de nouvelles spécifications d'utilisation du spectre qui soient, autant que possible, acceptables pour l'ensemble des représentants des pays participants. Les résultats de chaque CMR se concrétisent sous forme d'un traité signé par les administrations participantes. Les CMR élaborent également l'ordre du jour de la CMR suivante ainsi que des Résolutions comprenant en général des invitations à procéder à des études liées aux points inscrits à cet ordre du jour, études qui seront menées par les Commissions d'études. Comme dans la plupart des domaines de la réglementation internationale, la mise en application de ces règlements est difficile et dépend en grande partie de la bonne volonté des participants. Les CMR sont précédées de Réunions de préparation à la Conférence (RPC), dont l'objet est d'élaborer des rapports sur des questions techniques, opérationnelles et réglementaires qui seront examinées à la Conférence.

Les Commissions d'études des radiocommunications (CE) sont constituées par l'Assemblée des radiocommunications. Elles sont chargées d'étudier les Questions et de préparer des projets de Recommandation portant sur les aspects techniques, d'exploitation, de procédures et de réglementation des radiocommunications. Les CE de l'UIT-R se voient attribuer l'étude d'un certain nombre de Questions telles que les bandes de fréquences préférées pour les différents services, les seuils de brouillage inacceptable, le partage des fréquences entre services, les limites d'émission souhaitées, etc. Elles contribuent aussi au projet de Rapport de la RPC pour ce qui concerne les points de l'ordre du jour qui relèvent de leurs compétences. Les CE sont organisées en Groupes de travail (GT) et Groupes d'action (GA) qui traitent chacun d'un aspect particulier du travail à réaliser. A ce jour (2013), les CE de l'UIT-R sont organisées selon la structure suivante:

- Commission d'études 1: Gestion du spectre
- Commission d'études 3: Propagation des ondes radioélectriques
- Commission d'études 4: Services par satellite
- Commission d'études 5: Services de Terre
- Commission d'études 6: Service de radiodiffusion
- Commission d'études 7: Services scientifiques

S'ajoutent à cela le Comité de coordination pour le vocabulaire (CCV) et la Commission spéciale chargée d'examiner les questions réglementaires et de procédure (SCRPM), qui sont chargés de questions communes à l'ensemble des commissions.

On trouvera de plus amples informations sur l'UIT-R, les CE et les GT et leurs travaux respectifs ainsi que de la documentation sur le site web de l'UIT-R: <http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&mlink=rhome&lang=fr>.

Le Groupe de travail 7D, qui traite de la radioastronomie, est l'un des quatre groupes de travail de la CE 7 de l'UIT-R «Services scientifiques», qui comprend également des GT chargés de questions relatives aux opérations spatiales, à la recherche spatiale, à la télédétection passive et active, à la météorologie et aux émissions de fréquences étalon et de signaux horaires. Traditionnellement, le GT 7D s'occupe de la recherche d'une intelligence extraterrestre (SETI), de l'astronomie par radiodétection depuis la surface de la Terre et de l'astronomie par radiodétection depuis l'espace au titre du service de recherche spatiale.

A intervalles réguliers, le plus souvent deux fois par an, les Commissions d'études et les Groupes de travail organisent des réunions internationales auxquelles participent des délégations de nombreux pays. Les Groupes d'action sont constitués pour une durée limitée en vue de mener des tâches spécifiques et ils se réunissent chaque fois que cela est nécessaire. Les méthodes de travail des Commissions d'études et de leurs Groupes de travail sont décrites en détail dans la Résolution 1 de l'UIT-R. En règle générale, les CE et les GT répondent à des Questions qui leur ont été attribuées. Les réponses à ces Questions sont généralement fournies sous la forme de Recommandations ou de Rapports UIT-R.

Les Recommandations UIT-R constituent un ensemble d'informations techniques, d'exploitation et de réglementation/de procédures qui ont reçu l'aval des administrations participantes. Ces informations sont utilisées dans les contributions élaborées en réponse à certains points de l'ordre du jour des CMR et de nombreux résultats des travaux des Groupes de travail sont de ce fait incorporés dans le Règlement des radiocommunications. Par ailleurs, les Recommandations et Rapports UIT-R sont, en eux-mêmes, généralement considérés par les utilisateurs du spectre comme des lignes directrices faisant autorité. Cela vaut particulièrement pour les Recommandations UIT-R, qui, bien que non contraignantes par nature, sont respectées par le plus grand nombre et régulièrement révisées et publiées. L'essentiel des informations importantes sur la radioastronomie figurant dans les Recommandations et Rapports du Groupe de travail 7 constitue le fondement du présent Manuel.

## **1.2 Le Règlement des radiocommunications et les attributions des bandes de fréquences**

Les attributions internationales des bandes de fréquences sont faites lors des CMR à quelque 40 services radioélectriques définis dans le Règlement des radiocommunications. Assistent aux CMR des représentants de plus de 190 administrations Membres de l'UIT venus du monde entier, de nombreuses entreprises du secteur des télécommunications et des technologies de l'information ainsi que des organisations scientifiques et internationales reconnues. Seules les administrations Membres sont autorisées à présenter des propositions et ont le droit de vote, les autres organisations ayant néanmoins la possibilité d'influer, par d'autres moyens, sur les conclusions des divers points inscrits à l'ordre du jour. Le fonctionnement des CMR et la participation des radioastronomes à ces conférences ont été décrits plus en détail dans d'autres ouvrages (voir par exemple Gergely [2002]).

Du point de vue de l'attribution des bandes de fréquences, le monde est divisé en trois régions: la Région 1 couvre l'Europe, l'Afrique et le nord de l'Asie; la Région 2 couvre l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud; la Région 3 couvre le sud de l'Asie et l'Australasie. Pour chaque bande de fréquences, les attributions peuvent être différentes d'une région à l'autre. Les bandes sont souvent partagées entre deux services ou plus. De manière générale, les attributions peuvent être faites à titre primaire ou à titre secondaire. Un service bénéficiant d'attribution à titre primaire peut causer des brouillages à un service avec attribution à titre secondaire, mais un service bénéficiant d'attribution à titre secondaire ne doit pas causer de brouillages à un service avec attribution à titre primaire dans la même bande. Les attributions des bandes de fréquences figurent à l'Article 5 du Règlement des radiocommunications. La plupart sont présentées dans le Tableau des attributions, sachant que des attributions additionnelles sont indiquées dans les renvois numérotés du Tableau.

Dans les pays, les questions d'attribution sont traitées par des organismes gouvernementaux, dont la nature est très variable d'une administration à l'autre. Dans de nombreux pays, la gestion du spectre radioélectrique relève

d'un organisme plus important qui a aussi parfois la responsabilité des services postaux et téléphoniques, du transport, du commerce, etc. Ces organismes jouent un rôle majeur dans la définition des positions nationales défendues pendant les CMR. Les administrations qui participent à la conclusion des traités lors de CMR conservent leur souveraineté sur le spectre à l'intérieur de leurs frontières nationales et peuvent s'écarter des réglementations internationales dans la mesure où cela ne cause pas de brouillage préjudiciable à l'intérieur du territoire d'autres administrations. Pendant l'établissement du Règlement des radiocommunications, beaucoup d'administrations ont demandé des dérogations dans certaines bandes afin de répondre à des besoins nationaux particuliers.

### **1.3 La radioastronomie: un service de radiocommunication**

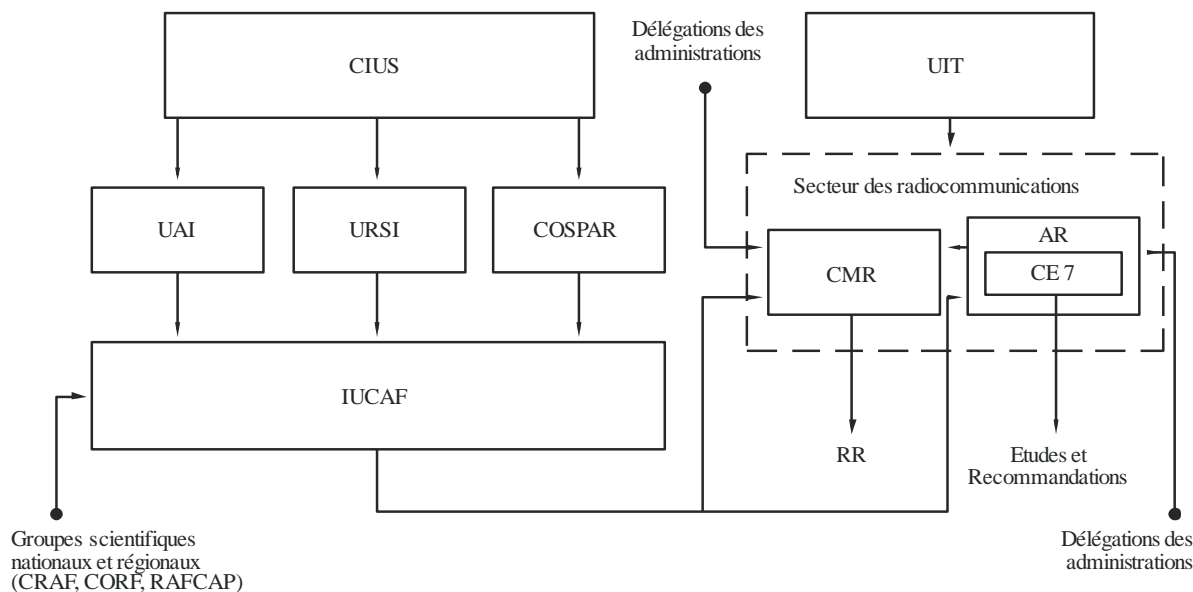
La radioastronomie a été reconnue officiellement comme un service de radiocommunication pour la première fois à la CAMR-59. A ce moment précis, sous les auspices du Conseil international des unions scientifiques (CIUS), trois unions scientifiques ont créé la Commission interunion pour l'attribution de fréquences à la radioastronomie et à la science spatiale (IUCAF) pour représenter l'utilisation du spectre radioélectrique à des fins scientifiques. Ces trois unions fondatrices sont l'Union astronomique internationale (UAI), l'Union radioscientifique internationale (URSI) et le Comité de la recherche spatiale (COSPAR) et sont aujourd'hui toutes membres de l'IUCAF. L'IUCAF participe aux CMR en tant qu'organisation internationale reconnue, mais n'a pas le droit de vote. Les radioastronomes agissent à travers leurs agences nationales ou l'IUCAF pour que leurs intérêts soient pris en compte par le Secteur des radiocommunications ou qu'ils soient inscrits à l'ordre du jour d'une CMR. En plus de l'IUCAF, des comités nationaux et régionaux, comme le Comité américain sur les fréquences radioélectriques de l'Académie nationale des sciences (CORF), le Comité des fréquences radioastronomiques de la Fondation scientifique européenne (ESF-CRAF) ou le Comité des fréquences radioastronomiques de la région Asie-Pacifique (RAFCAP), contribuent à ce que les astronomes participent de façon unifiée. La Figure 1.1 illustre quelques-unes des relations qui existent entre organismes intervenant dans les processus de coordination des fréquences pour la radioastronomie.

Dans l'Article 1 du RR, Section 1, du Règlement des radiocommunications, la radioastronomie est définie comme l'astronomie fondée sur la réception des ondes radioélectriques d'origine cosmique. Dans le Tableau d'attribution des bandes de fréquences, les bandes qui offrent le plus de protection à la radioastronomie sont celles qui sont attribuées à titre primaire au service de radioastronomie, en partage uniquement avec des services passifs (non émetteurs). Viennent ensuite les bandes qui lui sont attribuées à titre primaire, mais en partage avec un ou plusieurs services actifs (émetteurs). Une moindre protection est assurée dans les bandes qui lui sont attribuées à titre secondaire.

Dans le Règlement des radiocommunications, pour de nombreuses bandes de fréquences, la protection est indiquée non pas directement par une entrée dans le Tableau des attributions, mais sous forme de renvois. Les renvois sont de plusieurs types. Dans le cas d'une bande attribuée en exclusivité à des services passifs, le numéro 5.340 du RR indique que toutes les émissions sont interdites dans cette bande. D'autres renvois sont utilisés lorsque les fréquences attribuées à la radioastronomie ne concernent qu'une partie de la bande qui apparaît dans le Tableau. Une forme différente de renvoi est utilisée pour les bandes ou parties de bande qui ne sont pas attribuées à la radioastronomie, mais qui sont néanmoins utilisées pour des observations astrophysiques importantes. Dans les renvois de ce type, les administrations sont instamment priées de prendre toutes les mesures pratiquement réalisables pour protéger la radioastronomie lorsqu'elles font des assignations de fréquences pour d'autres services. Bien que ces renvois ne fournissent pas de protection légale, ils s'avèrent souvent précieux pour la radioastronomie lorsqu'une coordination avec d'autres services s'impose. Les bandes de fréquences attribuées au service de radioastronomie sont énumérées dans l'Appendice 1 du présent Manuel.

FIGURE 1.1

**Relations entre organismes internationaux intervenant dans la coordination des fréquences pour le SRA**



AR: Assemblée des radiocommunications  
 CE 7: Commission d'études 7

Radio-Astro\_11

Où (dans l'ordre alphabétique):

- AR Assemblée des radiocommunications
- CE 7 Commission d'études 7
- CIUS Conseil international des unions scientifiques
- CMR Conférence mondiale des radiocommunications
- CORF Comité américain sur les fréquences radioélectriques de l'Académie nationale des sciences
- COSPAR Comité de la recherche spatiale
- CRAF Comité des fréquences radioastronomiques
- IUCAF Commission interunion pour l'attribution de fréquences à la radioastronomie et à la science spatiale
- RAFCAP Comité des fréquences radioastronomiques de la région Asie-Pacifique
- UAI Union astronomique internationale
- UIT Union internationale des télécommunications
- URSI Union radioscientifique internationale

**1.4 Problèmes d'attribution de fréquences à la radioastronomie**

La radioastronomie diffère sur plusieurs points de la plupart des services qui utilisent le spectre radioélectrique. Il s'agit en effet d'un service passif concerné uniquement par la réception de données. Quelques autres services, comme le service d'exploration de la Terre par satellite, reposent également sur la détection passive.

Les signaux de radioastronomie sont très faibles, leur puissance surfacique étant inférieure de plusieurs ordres de grandeur (plusieurs dizaines de dB) à celle des signaux de la plupart des autres services. Les systèmes de réception très sensibles requis en radioastronomie sont très vulnérables aux brouillages. Cette vulnérabilité est accentuée par la nature des signaux cosmiques. La plupart des signaux ont la forme d'un bruit aléatoire et ne comportent pas de modulation caractéristique permettant de les distinguer des autres signaux. Le partage des bandes de fréquences avec les services actifs est difficile. Ce partage est généralement possible uniquement lorsqu'il n'y a pas de visibilité directe entre une antenne de radioastronomie et un émetteur dans la même bande.



Autre problème: les émissions non désirées produites dans une bande attribuée à la radioastronomie par des services actifs qui fonctionnent dans d'autres bandes. Ce phénomène devient de plus en plus problématique avec le développement des techniques de modulation numérique à large bande, à bande ultralarge et à étalement de spectre. L'utilisation massive de dispositifs hertziens non assujettis à licence comme les smartphones, les tablettes ou les ordinateurs portables, qui peuvent être facilement transportés ou installés à proximité des radiotélescopes, accentue encore ce problème. En raison de cette menace potentielle, la simple préservation des attributions ne suffit plus pour garantir des observations radioastronomiques exemptes de brouillage.

Les radioastronomes ne sont pas toujours libres de choisir arbitrairement leurs fréquences. De nombreux signaux cosmiques qu'ils étudient ont la forme de raies spectrales étroites. Ces raies sont générées à des fréquences caractéristiques associées aux transitions entre les états d'énergie quantifiés d'atomes ou de molécules. Aussi les attributions pour l'observation de ces raies doivent-elles être faites à des fréquences précises. Ces attributions ont été obtenues dans le passé pour de nombreuses raies importantes, lorsque le spectre radioélectrique était beaucoup moins utilisé par les autres services. Or de nouvelles raies importantes continuent d'être détectées et beaucoup d'entre elles sont situées hors des bandes attribuées. De plus, dans le cas des raies spectrales des galaxies lointaines, une fréquence observée qui se trouve normalement à l'intérieur d'une bande attribuée à la radioastronomie peut être déplacée à l'extérieur de la bande par effet Doppler en raison de la vitesse relative des galaxies par rapport à la Terre. Presque toutes les parties du spectre radioélectrique ont donc, potentiellement, un intérêt scientifique. Mais, à de nombreuses fréquences, les observations sont sévèrement restreintes, voire rendues impossibles en raison des attributions à des services actifs. Dans certains cas, il est possible de réduire les brouillages au minimum en installant les radiotélescopes sur des sites appropriés ou en choisissant des horaires d'observation adaptés. De nouvelles attributions de fréquences à la radioastronomie seraient souhaitables, mais difficiles à obtenir pour diverses raisons. A chaque CMR, un projet d'ordre du jour est élaboré pour la première conférence suivante, ainsi qu'un ordre du jour provisoire pour la deuxième conférence. C'est pourquoi, même dans le cas idéal, pour qu'un point inscrit à l'ordre du jour soit effectivement examiné lors d'une conférence, il faut prévoir un délai important et des efforts soutenus. Les administrations déposent leurs propositions pour les futurs points à l'ordre du jour en général en fonction de ce qui, pour elles, correspond aux intérêts nationaux les plus urgents, de sorte que d'autres services peuvent se voir accorder une plus grande priorité. Même lorsque des administrations exprimant un intérêt pour la radioastronomie soutiennent un point de l'ordre du jour portant sur ce domaine scientifique, elles sont relativement peu nombreuses au sein de l'UIT, où la plupart des décisions sont prises par voie de consensus.

Comme les radioastronomes ont beaucoup de difficultés à partager des fréquences avec les services actifs et qu'ils ne peuvent pas choisir arbitrairement leurs fréquences, la radioastronomie ne s'adapte pas facilement au système d'attributions et aux réglementations. Cela étant, les services passifs jouissent d'une bonne considération, ne serait-ce que pour deux raisons: d'une part, la série des bandes attribuées à la radioastronomie a permis de faire de nombreuses découvertes scientifiques majeures et, d'autre part, ces attributions sont toujours vitales pour la survie du service.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Gergely, T. [2002] World Radiocommunication Conferences in «Spectrum Management for Radio Astronomy; proceedings of the IUCAF summer school held at Green Bank, W. VA, June 9-14, 2002, Eds. B.M. Lewis and D.T. Emerson, Charlottesville, VA.



## CHAPITRE 2

### Caractéristiques du service de radioastronomie (SRA)

#### 2.1 Le SRA

La radioastronomie et le SRA sont définis aux numéros **13** et **58** de l'Article **1** du RR comme étant l'astronomie fondée sur la réception des ondes radioélectriques d'origine cosmique. L'ensemble de ces émissions constitue le fond diffus cosmologique micro-onde de l'ingénierie des radiocommunications. La radioastronomie, service passif, n'émet pas d'ondes radioélectriques dans les bandes qui lui sont attribuées. Par conséquent, l'utilisation de ces bandes ne cause pas de brouillages à d'autres services. En revanche, les émissions radioélectriques d'origine cosmique étant extrêmement faibles en intensité par rapport aux émissions artificielles, les observations radioastronomiques sont très sensibles aux brouillages causés par d'autres services radioélectriques. Actuellement, la radioastronomie utilise la portion du spectre électromagnétique comprise entre un peu moins de 1 MHz et environ 1 000 GHz. Cet intervalle est avant tout défini par les limites de la technologie, mais en principe, la totalité du spectre radioélectrique présente un intérêt scientifique pour le SRA.

La radioastronomie, qui remonte à la découverte par Karl G. Jansky, en 1932, de l'existence d'ondes radioélectriques d'origine extraterrestre [Jansky, 1935], est maintenant une branche importante et reconnue de l'astronomie d'observation. Dans le système solaire, elle a permis d'améliorer notre connaissance du Soleil, notamment des processus physiques responsables des émissions radioélectriques des plasmas, ainsi que des planètes et de l'espace interplanétaire. A une plus grande échelle, les études multifréquentielles des sources radioémettrices d'origine cosmique fournissent des renseignements sur les nuages de gaz interstellaires et la formation des étoiles en leur sein, sur les champs magnétiques interstellaires, sur la structure et l'évolution des galaxies et sur les paramètres cosmologiques de l'Univers dans son ensemble. D'un autre côté, les raies spectrales émises par les atomes et les molécules à des fréquences de transition naturelles nous renseignent sur la composition, les mouvements et les caractéristiques physiques des nuages de gaz interstellaires. La plupart des connaissances tirées de la radioastronomie sont uniques en leur genre et ne peuvent pas être obtenues autrement que par l'observation des ondes radioélectriques d'une certaine longueur. Ainsi, l'hydrogène neutre atomique (HI) – élément primitif de l'Univers – n'est décelable que par sa raie spectrale à 1 420 MHz, et sa distribution et son mouvement ne peuvent être étudiés qu'en mesurant l'intensité et les décalages Doppler de son rayonnement.

Lorsqu'ils étudient les radiosources cosmiques, les radioastronomes mesurent toutes les propriétés du rayonnement électromagnétique: intensité, fréquence, polarisation, direction (c'est-à-dire position dans le ciel) et variations temporelles de ces paramètres. En règle générale, lorsqu'elles parviennent sur Terre, les émissions radioélectriques d'origine cosmique se caractérisent par de faibles niveaux de puissance surfacique. La plupart présentent les caractéristiques d'un bruit aléatoire. Font exception: a) les pulsars, qui émettent des pulsations avec une périodicité extrêmement stable, b) les scintillations interplanétaires et ionosphériques de radiosources de petit diamètre, c) les salves irrégulières provenant de certaines étoiles (dont le Soleil), d) les variations à l'échelle de plusieurs mois dans le cas de certaines radiosources (en particulier les incidences des sursauts gamma) et e) les variations associées à la planète Jupiter. Le meilleur moment pour observer une radiosource est généralement dicté par des phénomènes naturels comme la position de la source dans le ciel et la rotation de la Terre. Contrairement à ce qui se passe dans les services actifs (émetteurs), le radioastronome ne peut pas modifier les caractéristiques du signal reçu: on ne peut ni augmenter la puissance émise ni coder le signal pour en faciliter la détection. On pourra consulter l'ouvrage [Burke et Graham-Smith, 2002] qui passe en revue la radioastronomie et décrit notamment l'instrumentation, les principaux résultats et l'interprétation astrophysique.

#### 2.2 Origine et nature des émissions radioélectriques d'origine cosmique

Divers mécanismes sont à l'origine des émissions radioélectriques d'origine cosmique. Le rayonnement thermique est émis par toute «chose» dont la température est supérieure au zéro absolu. Il est notamment émis par les plasmas chauds, par les gaz neutres (nuages de gaz interstellaires, enveloppes chaudes d'étoiles, etc.) et

par les corps solides. En outre, on pense que le fond diffus micro-onde universel correspond au rayonnement thermique résiduel émis par des gaz chauds présents à un stade très précoce du développement de l'Univers. Quant au rayonnement non thermique, il est principalement constitué d'un rayonnement synchrotron causé par des électrons relativistes décrivant des spirales dans un champ magnétique. Il s'agit notamment des rayonnements masers gyrosynchrotrons et cyclotrons électroniques ainsi que des émissions d'ondes plasmiques. Enfin, le rayonnement en raies spectrales résulte des transitions entre les différents états d'énergie atomiques et moléculaires.

Dans le domaine fréquentiel, ces processus se traduisent par deux types de rayonnement: le rayonnement à spectre continu à large bande («continuum») et le rayonnement en raies spectrales à bande étroite.

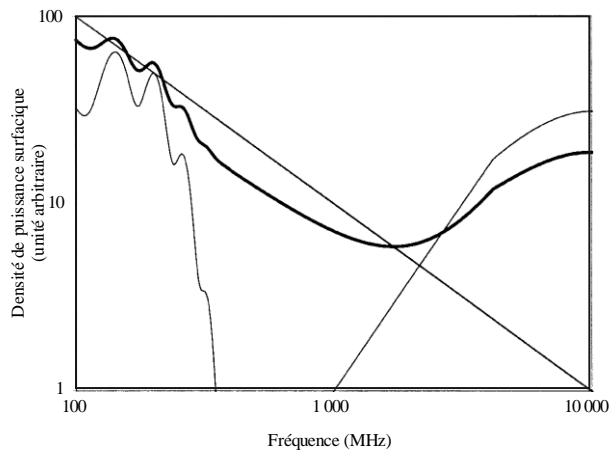
### **2.3 Rayonnement à spectre continu**

Des radiosources très diverses émettent un rayonnement à spectre continu, c'est-à-dire un rayonnement qui s'étale de façon relativement progressive sur la quasi-totalité du spectre radioélectrique. De manière générale, l'intensité des sources d'émission non thermiques affiche une dépendance à la fréquence différente de celle des sources d'émission thermiques. Cette dépendance peut toutefois être modifiée par les nuages de gaz et de poussière situés entre la source et l'observateur. L'observation du continuum du ciel révèle l'existence de nombreuses radiosources discrètes superposées à un vaste bruit de fond radioélectrique. Un bruit de fond quasi isotrope, caractérisé par une température de brillance de 2,73 K, est attribué au rayonnement thermique datant de l'époque à laquelle les gaz de l'Univers sont, pour la première fois, devenus opaques vis-à-vis des émissions radioélectriques. La structure angulaire très limitée de ce rayonnement, mesurée à des fréquences comprises entre 30 et 300 GHz, fournit des informations sur la densité cosmologique et sur d'autres paramètres de l'Univers. Pour réduire au minimum l'incidence de l'atmosphère terrestre, ces mesures ont été effectuées à l'aide de radiomètres placés à bord de ballons ou de satellites [Smoot et autres, 1992; Bennet et autres, 2003; Planck collaboration et autres, 2011] ou sur des sites terrestres à atmosphère sèche [Prike et autres, 2002]. Le bruit de fond radioélectrique comporte également une crête d'émission intense associée au plan de notre Galaxie (la Voie lactée), avec un maximum prononcé dans la direction du centre galactique. Dans certaines directions, des pointes d'émission s'étendent hors du plan. Le rayonnement galactique est généralement non thermique, mais la crête du plan galactique comporte aussi une composante thermique due aux gaz ionisés.

L'émission à spectre continu observée suivant de nombreuses directions du ciel résulte de l'association de plusieurs mécanismes physiques, comme l'illustre le spectre représenté à la Figure 2.1. Pour obtenir ce spectre, il faut effectuer des observations à de multiples fréquences. On peut ainsi évaluer le rôle des différents mécanismes d'émission et, partant, déterminer les conditions physiques qui règnent au sein et autour de la source.

FIGURE 2.1

**Spectre d'une source radioélectrique à spectre continu**



La densité spectrale de puissance surfacique est représentée en fonction de la fréquence. La courbe bosselée de gauche correspond au rayonnement plasma, la diagonale joignant le coin supérieur gauche au coin inférieur droit représente le rayonnement synchrotron, le rayonnement thermique étant représenté par la courbe en forme de bosse à droite. La courbe en gras correspond au spectre observé. Les amplitudes relatives des différentes composantes peuvent varier fortement d'une source à l'autre. Les bandes (jusqu'à 10 GHz)

Radio-Astro 21

La plupart des sources discrètes situées hors du plan galactique sont d'origine extragalactique. Il s'agit en majorité de sources non thermiques optiquement identifiables à des galaxies lointaines, et d'objets quasi stellaires (quasars) distribués d'une manière plus ou moins aléatoire dans le ciel. Les observations radioélectriques de ces sources ont permis d'élaborer un modèle faisant intervenir un noyau actif de galaxie (AGN, *active galactic nucleus*) composé en son centre d'une entité de forte masse (un trou noir par exemple) entourée d'un disque d'accrétion dans lequel entrent des gaz et duquel sortent des jets de particules hautement énergétiques, qui, après interaction avec des champs magnétiques, produisent de très grandes régions d'émissions radioélectriques. En revanche, la plupart des objets se trouvant à moins de quelques degrés du plan galactique appartiennent à notre Galaxie. Il s'agit notamment de sources thermiques associées à des régions d'hydrogène ionisé (régions HII), à des étoiles (dont le Soleil) ou à des planètes, et de sources non thermiques associées à des restes de supernovae (projections résultant d'explosions stellaires). A noter qu'on observe également des émissions radioélectriques provenant de régions HII et de restes de supernovae situés dans des galaxies voisines.

Le rayonnement non thermique provenant de sources extragalactiques et de sources situées dans le plan galactique (y compris le bruit de fond et les restes de supernovae) est souvent caractérisé par une polarisation linéaire partielle. Il s'agit d'un rayonnement synchrotron produit par la rotation (et donc l'accélération) d'électrons dans des champs magnétiques possédant une polarisation rectiligne dont la direction intrinsèque est perpendiculaire à celle du champ magnétique. L'existence d'une polarisation dans le rayonnement radioélectrique d'origine cosmique semble donc indiquer la présence d'un certain ordre dans les champs magnétiques associés. L'étude du rayonnement polarisé provenant des restes de supernovae a permis de mieux comprendre l'interaction qui existe entre ces restes et les champs magnétiques interstellaires environnants. Mais en général, la direction intrinsèque de polarisation diffère de la direction observée, car elle subit une rotation de Faraday due aux électrons situés dans des champs magnétiques entre la source de rayonnement et la Terre. Etant donné que la rotation de Faraday varie comme l'inverse du carré de la fréquence, elle peut être évaluée à partir des polarisations observées sur un intervalle fréquentiel. Aussi, l'étude de la rotation de Faraday est un moyen puissant d'évaluation des densités d'électrons et des champs magnétiques présents dans le milieu interstellaire.

Plusieurs phénomènes intéressants l'astrophysique ne sont observables qu'à des fréquences inférieures ou égales à 30 MHz. Citons par exemple l'absorption de l'émission du continuum par des gaz ionisés situés en avant-

plan dans notre Galaxie, l'auto-absorption dans les galaxies radioélectriques et les quasars, ainsi que les rayonnements à basses fréquences émis par des plasmas ténus présents dans des amas galactiques.

### 2.3.1 Variabilité temporelle du rayonnement à spectre continu

Les émissions à spectre continu varient assez fréquemment dans le temps. Cette variabilité peut prendre diverses formes: sursauts qui subsistent pendant une durée inférieure à quelques nanosecondes et jusqu'à quelques heures, pulsations de périodicité comprise entre quelques millisecondes et quelques secondes, variations apériodiques s'étendant sur des semaines ou des mois, variations sinusoïdales périodiques.

Le Soleil est une source exceptionnelle de brefs sursauts d'énergie radioélectrique de types très variés, qui apportent des informations importantes sur les processus physiques des plasmas à l'oeuvre [McLean et Labrum, 1985]. Ces sursauts sont très intenses aux fréquences inférieures à 300 MHz. En outre, les sursauts dus à des perturbations de l'atmosphère solaire peuvent progressivement augmenter en fréquence au cours de leur vie. On a détecté des éruptions optiques et radioélectriques corrélées en provenance d'autres étoiles. Jupiter est également une source de sursauts intenses et sporadiques à des fréquences inférieures à 30 MHz [Roberts, 1963].

Outre le rayonnement thermique constant de son disque et les sursauts mentionnés précédemment, Jupiter présente une forme particulière de variabilité, qui s'explique par la présence de ceintures de Van Allen dans sa magnétosphère. Ces ceintures donnent lieu à des émissions synchrotron polarisées non thermiques, qui sont très directives et concentrées vers les ceintures équatoriales de la planète. Etant donné que l'axe magnétique et l'axe de rotation de Jupiter sont décalés, l'intensité et la direction de polarisation de l'émission non thermique observée depuis la Terre varient avec la rotation de la planète de façon sinusoïdale.

Les naines blanches dotées de champs magnétiques puissants présentent souvent des éruptions intenses dans le régime radio aux fréquences atteignant quelques gigahertz, ce qui permet d'étudier le plasma de leur atmosphère.

L'ionosphère de la Terre et le milieu interplanétaire du système solaire peuvent provoquer une scintillation des émissions radioélectriques observées provenant de sources de faible ouverture angulaire; cette scintillation peut atteindre une fréquence de plusieurs Hertz. Ses caractéristiques fournissent des renseignements sur la dimension de la source et sur l'inhomogénéité et les mouvements du milieu interplanétaire. S'il apparaît que certains pulsars scintillent, ce phénomène est dû non pas au milieu *interplanétaire*, mais au milieu *interstellaire*.

Certaines radiosources, notamment les quasars, présentent une variabilité d'émission radioélectrique à l'échelle de la semaine. Les émissions radioélectriques des sources optiquement identifiées comme les supernovae, les novae ou les sources de rayons X varient en phase avec la brillance optique.

Les pulsars sont peut-être les sources de rayonnement pulsé les plus intéressantes d'un point de vue astrophysique. Leurs émissions, qui se caractérisent par des impulsions extrêmement régulières, ont été découvertes en 1967 [Hewish et autres, 1968]. Les pulsars sont des étoiles presque exclusivement composées de neutrons (c'est-à-dire de matière dans un état très condensé). La plupart de ceux que nous connaissons se trouvent dans notre Galaxie et présentent des périodes d'impulsion comprises entre 1 ms et 8 s. La période des impulsions est définie par la rotation de l'étoile; leur durée, qui dépend de l'angle entre la ligne de visibilité de l'observateur et l'axe de rotation de l'étoile, est généralement égale à quelques pourcents de la période. Les émissions des pulsars s'observent généralement dans la gamme 30 MHz-3 GHz au moyen de techniques d'intégration des impulsions; le calcul du profil moyen d'impulsion nécessite souvent des temps d'intégration de plusieurs heures. Certains pulsars présentent des impulsions à polarisation intrinsèquement linéaire. Pendant leur parcours vers la Terre à travers le milieu interstellaire, toutes les impulsions subissent une dispersion et leur direction de polarisation est modifiée sous l'effet de la rotation de Faraday (voir le § 2.3.2). Les mesures de la dispersion et de la rotation de Faraday permettent de déterminer la densité électronique ainsi que le champ magnétique le long de la ligne de visibilité. De même, les mesures, sur plusieurs années, des instants d'arrivée des impulsions permettent de déterminer les positions et les déplacements des pulsars dans le ciel (mouvements propres). Les données sur la stabilité à long terme des pulsars, en particulier ceux dont la période est de l'ordre de la milliseconde, conditionnent l'utilisation potentielle de ces sources comme futures horloges de référence pour les services horaires (voir le Chapitre 7). A noter par ailleurs que des observateurs du monde entier

effectuent en collaboration des mesures horaires sur un ensemble de pulsars milliseconde, dans l'espoir que ce projet d'avant-garde permettra, à terme, de détecter directement un rayonnement d'ondes gravitationnelles.

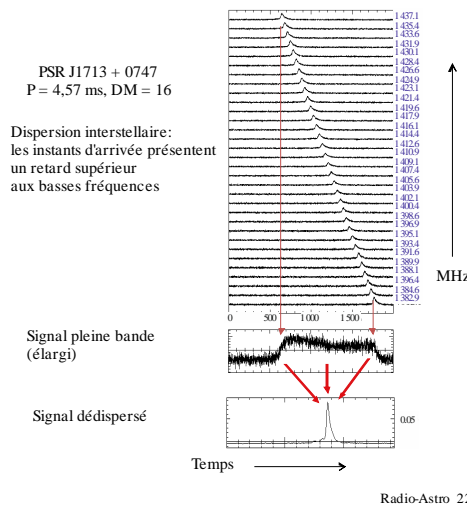
Les pulsars possèdent des champs de surface qui sont estimés entre  $10^4$  et  $10^9$  Tesla; dans les cas extrêmes des magnétars, ils peuvent même atteindre  $10^{10}$  T. Ce champ magnétique puissant couplé à la rotation rapide du pulsar induit des champs électriques de forte intensité et crée un plasma relativiste dense autour de l'étoile à neutrons, qui transporte un courant de forte puissance. L'émission radioélectrique cohérente de forte intensité est vue comme un produit dérivé de la dissipation de l'énergie dans la magnétosphère, mais, bien qu'elle soit clairement détectable, elle ne comprend qu'une très petite fraction ( $10^{-4}$ - $10^{-6}$ ) de la perte d'énergie globale du plasma. Ces conditions de champ électromagnétique exceptionnelles sont assez différentes de celles que l'on rencontre ailleurs dans l'Univers et ne sont pas reproductibles sur Terre en laboratoire. Les pulsars constituent un banc d'essai idéal pour la physique dans ce domaine et le fait même qu'après plus de quarante ans, leur processus d'émission radioélectrique ne soit pas encore parfaitement compris est la preuve que des travaux de recherche sont toujours nécessaires. Les émissions radioélectriques sont très facilement observables dans la gamme 30 MHz-1,5 GHz. Cela étant, de nombreuses sources possèdent encore des flux moyens de quelques centaines de  $\mu\text{Jy}$  ( $100\mu\text{Jy} = -300 \text{ dB}(\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1})$ ) à 40 GHz et peuvent être détectées au moyen de grandes antennes jusqu'à 90 GHz. On fait généralement appel à des techniques de sommation des impulsions à verrouillage de phase avec des temps d'intégration compris entre plusieurs minutes et plusieurs heures pour définir le profil moyen d'impulsion. La sensibilité de détection d'un radiotélescope dans le cas d'une émission pulsée périodique présentant un flux moyen  $S_{\min}$  est donnée par la formule [Lorimer & Kramer, 2005]:

$$S_{\min} = \frac{kT_{\text{sys}}}{G\sqrt{n_p}\Delta t \cdot \Delta\nu} \sqrt{\frac{W}{P-W}}$$

où  $G$  est le gain de l'antenne,  $n_p$  le nombre de polarisations dont on a pris la moyenne,  $\Delta t$  le temps d'intégration,  $\Delta\nu$  la largeur de bande observée,  $P$  la période des impulsions et  $W$  la largeur de l'impulsion. Ainsi, pour tout niveau d'émission moyen, le seuil de détection applicable aux impulsions étroites ( $W \ll P$ ) devient proportionnel à la racine carrée du rapport cyclique  $\eta = W/P$ . Dans le même temps, la valeur de crête du flux est supérieure au flux moyen d'un facteur  $\eta^{-1} = P/W$ . Il en résulte que le seuil de détection applicable aux impulsions étroites est proportionnel à  $\eta^{-1/2}$ ; il augmente à mesure que les impulsions rétrécissent, pour une même intensité moyenne.

FIGURE 2.2

**Dispersion des impulsions par le milieu interstellaire (bande L)**



La dispersion par le plasma interstellaire très tenu se traduit par une distorsion des impulsions radioélectriques: une impulsion à haute fréquence arrive plus tôt qu'une même impulsion émise à une fréquence inférieure. Le retard est proportionnel à l'inverse du carré de la fréquence. Du fait des longues distances en jeu, l'effet est assez marqué dans la plupart des bandes de fréquences et il entraîne une distorsion des profils d'impulsion même dans des largeurs de bande de quelques MHz. Pour que le profil puisse être détecté, le signal doit d'abord être dédispersé.

Les impulsions radioélectriques provenant de certaines sources présentent une polarisation rectiligne. Pendant leur parcours vers la Terre à travers le milieu interstellaire, les impulsions subissent une dispersion et leur direction de polarisation est modifiée sous l'effet de la rotation de Faraday (voir le § 2.3.2). Les mesures combinées de la dispersion et de la rotation de Faraday nous renseignent sur les densités électroniques et les champs magnétiques le long de l'axe de visée en direction du pulsar.

La mesure, sur quelques années, des instants d'arrivée des impulsions permet d'obtenir des renseignements sur les positions et les déplacements des pulsars dans le ciel (mouvements propres) et sur les déplacements orbitaux de l'étoile à neutrons si des compagnons sont présents. Les planètes extrasolaires observées pour la première fois étaient des planètes en orbite autour d'un pulsar. La stabilité et la prévisibilité exceptionnelles de leurs émissions radioélectriques à impulsions font des pulsars des instruments idéaux pour l'expérimentation de la relativité générale. Ainsi, en effectuant des mesures horaires des impulsions, on a pu valider l'une des prévisions de la relativité générale, à savoir l'émission d'ondes gravitationnelles par les pulsars gravitant en orbite proche autour d'autres étoiles à neutrons et de naines blanches. Les chercheurs effectuent d'autres tests touchant à la relativité générale et comparent les prévisions de cette théorie avec celles fournies par d'autres théories de la gravité. Ils s'appuient pour ce faire sur des mesures horaires et observent notamment les petites variations des instants d'arrivée des impulsions provenant de nombreux pulsars disséminés sur la sphère céleste. Cette méthode permettra peut-être de détecter des ondes gravitationnelles de grande longueur d'onde.

La précision horaire des pulsars à long terme est actuellement de l'ordre de  $0,1 \mu\text{s}$  dans le cas des sources offrant une qualité optimale et leur stabilité horaire s'approche de celle des meilleurs étalons de temps atomique. Du fait de leur stabilité horaire inhérente, les pulsars pourraient être utilisés à l'avenir comme des horloges de référence pour les services horaires (voir le Chapitre 7) ainsi que pour la navigation autonome des sondes destinées à l'exploration de l'espace lointain.

La plupart des quelque 2 000 pulsars recensés sont situés dans notre Galaxie. Les recherches de pulsars par les observatoires de radioastronomie visent de nombreux objectifs, parmi lesquels la découverte de pulsars gravitant en orbite autour d'autres objets compacts comme une autre étoile à neutrons, un pulsar, voire un trou noir. La méthode utilisée consiste à enregistrer le bruit radioélectrique provenant d'un endroit particulier, puis à rechercher des variations de périodicité comprise entre quelques millisecondes et plusieurs secondes.



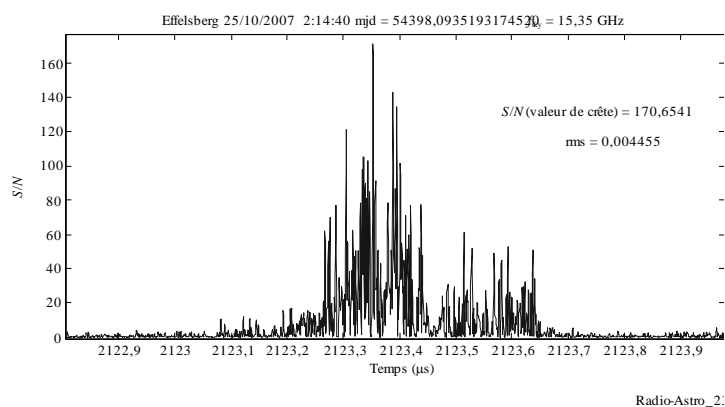
## Variabilité transitoire et de courte durée des pulsars

Les impulsions émises par un pulsar donné présentent des profils variés. Cela étant, le profil moyen reste stable pendant de nombreuses années; il représente en quelque sorte la «signature» du pulsar. Cette variabilité d'une impulsion à l'autre peut être plus ou moins marquée; elle est différente pour chaque objet. Dans les cas extrêmes, on observe ce que l'on appelle des impulsions radioélectriques géantes, pour lesquelles la valeur de crête du flux peut dépasser la valeur moyenne d'un facteur  $10^6 - 10^8$ .

FIGURE 2.3

### Impulsion radioélectrique géante émise par le pulsar du Crabe à 15,35 GHz [Jessner *et autres*, 2010]

La valeur de crête du flux est de 6 800 Jy ( $\sim 9\,000$  K pour une antenne de 100 m). La durée totale de l'enregistrement est égale à 1,2  $\mu$ s.



Les impulsions géantes sont fortement polarisées et leur pic d'émission se produit à une échelle de temps inférieure à la nanoseconde. On pense que leur mécanisme d'émission est une forme extrême du rayonnement pulsar ordinaire, mais ce point non plus n'est pas encore bien compris. Les radioastronomes détectent et analysent les impulsions géantes au moyen d'enregistreurs de phénomènes transitoires à vitesses d'échantillonnage élevées, dotés d'un mécanisme de déclenchement (*trigger*) qui permet de repérer, dans le bruit, les signaux brefs de forte intensité.

Les impulsions émises par les pulsars ne peuvent pas toutes être détectées en permanence. Les scintillations interstellaires (comparables au scintillement des étoiles, la nuit, dans le ciel, mais causées par la variabilité du milieu interstellaire) modulent les émissions radio des pulsars; cette modulation étant un effet de plasma, elle dépend fortement de la fréquence. L'étude de la scintillation des pulsars vise à mieux comprendre la distribution de la structure et de la densité électronique dans le milieu interstellaire à différentes échelles de longueur.

Certains pulsars émettent de façon assez irrégulière. Il arrive ainsi qu'il manque quelques impulsions (phénomène appelé «disparition» ou *nulling*) ou que le pulsar reste silencieux pendant plusieurs jours avant de reprendre ses émissions. On peut observer un cas extrême de ce comportement dans les transitoires radio tournants (RRATS, *rotating radio transients*): ces émetteurs puissants se caractérisent par des salves aléatoires qui ne durent que quelques secondes et qui ne sont éventuellement détectables qu'une ou deux fois par jour. Leur détection et leur analyse nécessitent l'utilisation d'une grande antenne fonctionnant dans une bande radioélectrique exempte de tout brouillage sporadique de type pulsé.

### 2.3.2 Mesure du rayonnement à spectre continu

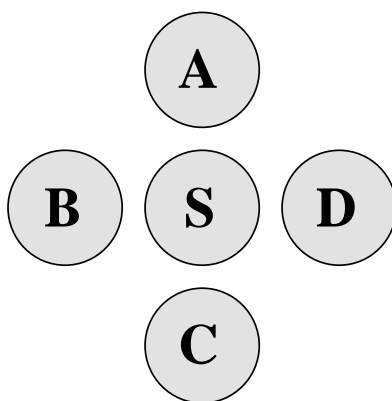
Pour déterminer la densité spectrale du rayonnement à spectre continu, il est nécessaire d'effectuer des mesures à un certain nombre de fréquences. La répartition fréquentielle du continuum étant globalement progressive, des intervalles de mesure d'une octave environ sont en général suffisants. Toutefois, des intervalles plus rapprochés sont souhaitables pour mesurer la dispersion des pulsars, la rotation de Faraday et les spectres d'auto-absorption. La sensibilité de la mesure est accrue si, pour chaque fréquence, on a recours à de grandes

largeurs de bande relatives, 10% étant considéré comme souhaitable et 2% comme un minimum. Les bandes du SRA attribuées à la mesure du rayonnement à spectre continu sont examinées au Chapitre 3.

La plupart des observations de sources radioélectriques aux fréquences supérieures à environ 100 MHz sont faites au moyen d'antennes à réflecteur parabolique («paraboles»). Il peut s'agir d'une seule antenne ou d'un réseau d'antennes. Le facteur limitant d'un radiotélescope monoparabole est sa résolution angulaire, qui correspond à l'ouverture de faisceau à mi-puissance. Un tel instrument ne peut efficacement cartographier qu'une structure céleste vue sous un angle au moins égal à plusieurs fois l'ouverture de faisceau (exemples: émissions radioélectriques provenant de la Voie lactée, du Soleil, de la Lune ou de certaines galaxies proches). La procédure usuelle consiste à diviser la zone à cartographier en une série de lignes de balayage parallèles séparées par moins d'une demi-ouverture de faisceau ou en une grille de points distants de moins d'une demi-ouverture. Dresser une telle carte peut prendre beaucoup de temps, sachant que l'on suppose implicitement que les caractéristiques de la source et de l'environnement de mesure ne varient pas au cours de la période d'observation. Pour les mesures, on s'arrange généralement pour que l'élévation du point d'observation reste identique pendant la durée d'un balayage, de telle sorte que l'incidence des rayonnements au sol dans les lobes latéraux reste constante et puisse facilement être supprimée. Toutefois, les télescopes monoparaboles présentent souvent une largeur de faisceau supérieure à ce qui serait nécessaire pour observer la source considérée. Dans ce cas, la mesure consiste à déterminer les propriétés (intensité et polarisation par exemple) du rayonnement suivant la direction de la source à l'étude et à les comparer à celles des rayonnements émanant de régions célestes voisines. Idéalement, on dresse une carte de la zone autour de la source (source comprise), de telle sorte que les rayonnements supplémentaires en provenance du fond cosmique puissent être estimés. Toutefois, lorsque le temps manque, des mesures de la source et d'un nombre limité de points voisins de la source sont effectuées, comme le montre la Figure 2.4. Dans la plupart des cas, les propriétés mesurées ne varient pas de façon significative au cours de l'observation et peuvent être moyennées dans le temps pour chaque direction dans le ciel. Les variations du niveau de sortie du récepteur sur une courte période sont illustrées à la Figure 2.5. La contribution de la source à la puissance totale reçue est évaluée à  $S - (A + B + C + D)/4$ ; dans cette formule, les lettres correspondent aux niveaux moyens de la puissance reçue suivant les directions de pointage indiquées à la Figure 2.4.

FIGURE 2.4

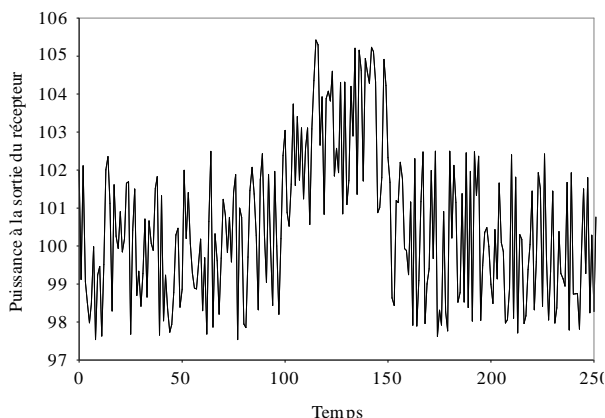
**Directions de pointage types associées aux mesures d'un télescope monoparabole**



Cette Figure illustre une des procédures types utilisées pour mesurer une source située dans le faisceau d'une antenne pointant vers S. Cette antenne «voit» alors, outre la source, les émissions du fond du ciel, les émissions réfléchies par le sol et parvenant dans les lobes latéraux et les rayonnements non désirés dont les propriétés peuvent être fonction de la direction et du temps. A, B, C et D sont des points célestes avoisinants. Les cercles définissent les niveaux de puissance inférieurs ou égaux à -10 dB du diagramme d'antenne.

FIGURE 2.5

**Exemple de la puissance de sortie du récepteur d'une antenne monoparabole**



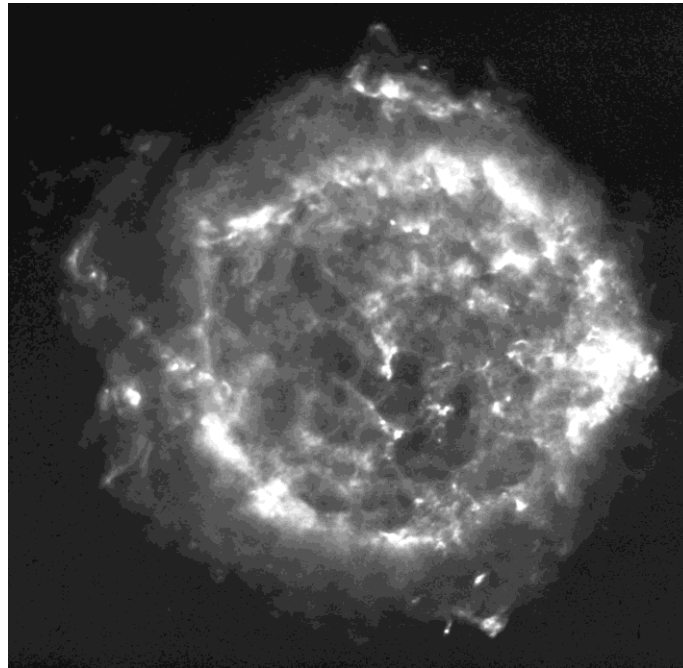
Puissance de sortie du récepteur (axe des ordonnées) en fonction du temps (axe des abscisses) pendant une fraction du temps d'observation (configuration de la Figure 2.4). Les portions de gauche, centrale et de droite de l'enregistrement correspondent respectivement aux directions de pointage B, S et D. Dans cet enregistrement, le temps d'intégration est de quelques secondes. On peut ensuite calculer la moyenne temporelle des données enregistrées suivant chaque

Radio-Astro\_25

Un réseau de plusieurs antennes utilisé comme instrument de cartographie ou d'imagerie permet de cartographier un champ angulaire à peu près égal à l'ouverture de faisceau à mi-puissance d'une des antennes du réseau, avec une résolution égale à l'ouverture du faisceau à mi-puissance du réseau. Chaque paire d'antennes du réseau forme un filtre spatial mesurant l'amplitude d'une composante de Fourier de l'image. Si le réseau comprend un nombre suffisant d'antennes placées suivant une configuration bidimensionnelle, on peut déterminer un nombre suffisant de composantes de Fourier sur une courte période pour générer une image à partir d'une seule observation. Certains réseaux, tels que le radiotélescope à synthèse d'ouverture de l'Observatoire fédéral de radiophysique du Canada, sont linéaires et s'appuient donc sur la rotation de la Terre pour balayer la source suivant diverses directions. Dans ce cas, on procède à des observations d'environ 12 h faisant intervenir des espacements d'antennes fixes. On peut ensuite ajouter à ces mesures d'autres observations réalisées ultérieurement avec des espacements d'antennes différents afin d'obtenir toutes les données nécessaires à l'élaboration de l'image. Les antennes ne sont repositionnées qu'entre chacune de ces périodes d'observation de 12 h. Le faisceau d'antenne à synthèse d'ouverture du réseau n'est formé qu'après traitement des données issues de toutes les séries d'observations relatives à une source; il correspond à la dimension d'un pixel de l'image résultante. Un exemple d'image de synthèse est donné à la Figure 2.6. Les observations associées à cette image radioélectrique ont été faites à une fréquence de 5 GHz par le radiotélescope VLA (*very large array*), réseau de 27 antennes situées au Nouveau-Mexique.

FIGURE 2.6

**Exemple d'une image radioélectrique**



Cette image radioélectrique a été réalisée dans le spectre continu à 5 GHz à partir d'observations du radiotélescope VLA à 27 antennes. La source radioélectrique ainsi cartographiée est Cassiopee A, reste d'une supernova ayant explosé il y a à peu près 300 ans. Le diamètre angulaire de la structure principale est de 4 min d'arc (environ 1/7 du diamètre de la Lune), et la résolution angulaire est d'environ 0,6 s d'arc. Lors de l'explosion de la supernova, les couches extérieures de l'étoile massive ont été éjectées à haute vitesse mais ont été ralenties par le gaz interstellaire et les matériaux à expansion plus lente (provenant de couches plus profondes de l'étoile) ont ensuite traversé ces couches gazeuses, générant ainsi des structures en bulles. Aux longueurs d'onde optiques, seuls quelques filaments de faible brillance sont visibles par les télescopes les plus larges (image gracieusement mise à disposition par l'Observatoire NRAO/AUI).

Radio-Astro\_26

La structure détaillée et la distribution spatiale des émissions radioélectriques des sources d'origine cosmique permettent de mieux comprendre les mécanismes qui sont à l'oeuvre dans la génération de ces émissions. Outre l'exploitation de circonstances spéciales, dans lesquelles une source est occultée par la Lune ou par une planète, la cartographie très détaillée du ciel nécessite des réseaux d'antennes de grande dimension. Pour une résolution angulaire de quelques secondes d'arc par exemple, les dimensions du système récepteur doivent être de 100 000 longueurs d'onde environ. Ainsi, pour distinguer les détails angulaires les plus fins, à l'échelle de quelque  $10^{-4}$  s d'arc, il faut recourir à l'interférométrie VLBI, avec certaines antennes distantes de plusieurs milliers de kilomètres. La résolution ainsi obtenue est au moins dix fois supérieure à la meilleure résolution angulaire actuellement susceptible d'être atteinte dans une autre partie du spectre électromagnétique. Le Système de référence céleste international adopté par l'Union astronomique internationale pour les mesures de positions est défini par les positions de plus de 200 sources radioélectriques extragalactiques, qui ont été mesurées avec une précision de 0,5 ms d'arc à partir d'observations VLBI [Ma et autres, 1998]. Etant donné que les antennes d'un réseau VLBI doivent toutes fonctionner à la même fréquence et qu'elles peuvent se trouver dans des pays différents ou sur l'orbite terrestre, il est nécessaire de protéger les bandes de fréquences de la radioastronomie à l'échelle mondiale.

## 2.4 Rayonnement en raies spectrales

Le rayonnement en raies spectrales provenant de nuages de gaz interstellaires est émis par les atomes et les molécules lorsqu'ils perdent ou acquièrent de l'énergie lors de collisions mutuelles, ou lorsqu'ils sont excités par des étoiles voisines. Pour un nuage contenant des atomes ou des molécules d'un type donné, ces collisions ou cette excitation provoquent des transitions entre niveaux d'énergie, qui se traduisent par une série de raies

spectrales discrètes. Les intensités relatives, les fréquences et les largeurs de ces raies sont déterminées par les conditions physiques et dépendent du type de molécule, de la densité moléculaire, de la température et de la distribution des vitesses. Dans certaines conditions, l'intensité d'une raie est massivement amplifiée par un effet maser; cela se produit souvent dans les régions de formation d'étoiles et dans les enveloppes circumstellaires d'étoiles évoluées. On observe également des raies spectrales lorsque les atomes ou les molécules d'un nuage absorbent de manière sélective le rayonnement d'une source du fond cosmique à spectre continu qui se situe dans l'alignement du nuage.

La fréquence intrinsèque (au repos) d'une raie spectrale est définie par le type d'atome/de molécule et par la transition concernée; cela étant, la raie observée est aussi déplacée par effet Doppler en fonction de la vitesse radiale de l'atome/de la molécule, c'est-à-dire sa vitesse par rapport à l'observateur le long de l'axe de visée. Aux grandes vitesses, la fréquence observée est déplacée de façon importante par rapport à sa valeur intrinsèque, souvent bien au-delà de la limite inférieure d'une bande spectrale attribuée à la radioastronomie. Les déplacements Doppler de la raie HI à 1 420 MHz en particulier ont permis d'élucider la structure en bras spiraux et la rotation de notre Galaxie ainsi que celles de nombreuses galaxies externes.

#### 2.4.1 Types de raies spectrales

Plusieurs types de raies spectrales ont été observés par les radioastronomes. C'est en 1951 qu'ils ont détecté la première raie, celle correspondant à la transition hyperfine d'inversion de spin de l'hydrogène neutre (HI) au voisinage de 1 420 MHz (longueur d'onde = 21 cm) [Ewen et Purcell, 1951]. Cette détection constitue un événement important de l'astronomie; en effet, c'est grâce à des observations ultérieures de cette raie, sur la totalité de la voûte céleste, que l'on a obtenu la toute première image d'ensemble de la vraie structure en spirale de notre Galaxie. Nous savons maintenant que l'hydrogène atomique neutre se trouve en grande quantité dans la plupart des galaxies, ce qui confère à cette raie spectrale une importance fondamentale pour l'étude des gaz interstellaires dans les galaxies en général. Cela étant, compte tenu des vitesses de récession élevées des galaxies lointaines, le rayonnement HI émis par ces sources est souvent déplacé par effet Doppler vers des fréquences en deçà de la limite inférieure de la bande protégée attribuée à la radioastronomie, à savoir 1 400-1 427 MHz. De fait, cette raie a été observée en absorption à des fréquences pouvant descendre jusqu'à 300 MHz.

La première raie moléculaire (celle du radical hydroxyle, OH, à 1,6 GHz) a été détectée en 1963. Quelques années ont passé avant que d'autres molécules soient détectées, mais depuis, plus de 10 000 transitions ont été observées pour plus de 125 molécules interstellaires et leurs isotopes. On trouvera dans [Lovas, 2004] une liste de transitions détectées dans la gamme 0,7-350 GHz. On comprend bien le Règlement des radiocommunications ne peut assurer une protection que pour un nombre limité de ces raies; cela étant, il est souhaitable de protéger les raies spectrales considérées comme étant les plus importantes pour l'astrophysique (voir le Chapitre 3).

Les raies moléculaires sont émises par différents types de nuages de gaz interstellaires: nuages diffus à faible densité, nuages sombres froids isolés contenant souvent des molécules instables sur Terre et nuages moléculaires denses géants contenant des régions III, jeunes étoiles chaudes et étoiles en formation. Ces nuages contiennent une grande part de la masse totale de notre Galaxie. Les molécules ne constituent toutefois qu'une fraction de leur masse, laquelle est essentiellement composée d'hydrogène atomique. Les raies d'effet maser sont un type particulier de raie spectrale; elles n'existent que pour quelques molécules. Elles sont créées par l'amplification d'un rayonnement du fond cosmique à spectre continu; dans notre Galaxie, elles sont intenses, très étroites et souvent polarisées. Elles sont particulièrement intéressantes, car elles repèrent les régions denses des nuages, là où des étoiles sont en formation. Certaines de ces raies peuvent être associées à l'enveloppe dilatée d'étoiles à un stade d'évolution avancée. Dans certaines galaxies, on observe des émissions masers ultraluminescentes à large bande (mégamasers) près du noyau galactique. L'étude des raies spectrales de notre Galaxie nous informe également sur les nuages moléculaires, les processus d'évolution des étoiles, la structure en spirale et l'évolution chimique de la Galaxie. Grâce aux nouveaux réseaux, qui affichent une plus grande sensibilité et une meilleure résolution angulaire, ces propriétés font aujourd'hui l'objet d'études dans d'autres galaxies. L'étude des galaxies plus lointaines s'appuie généralement sur l'observation des raies spectrales des molécules les plus abondantes, l'hydrogène et le monoxyde de carbone. Après avoir observé les raies moléculaires émises par les sources astronomiques, on a également cherché à simuler en laboratoire l'environnement de ces molécules afin de les synthétiser; ce fut notamment le cas de la molécule à chaîne

d'atomes de carbone  $\text{HC}_7\text{N}$  ou cyanoheptatriyne [Kroto et autres, 1978]. Une retombée intéressante de ces travaux de laboratoire a été la découverte de la molécule de carbone 60 à structure sphérique,  $\text{C}_{60}$  («Buckminsterfullerene») [Kroto et autres, 1985].

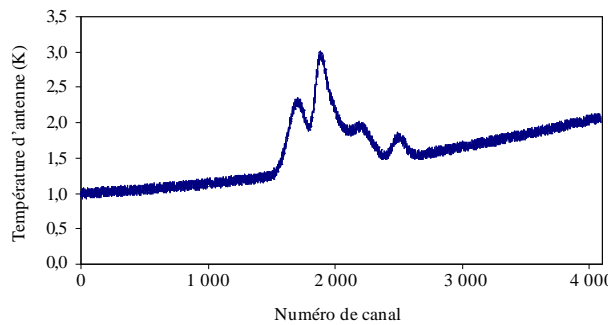
Des raies de recombinaison sont émises par les atomes d'hydrogène, d'hélium, de carbone, etc., lorsque leurs électrons sautent d'un état à un autre de plus faible énergie. Ce phénomène se produit généralement après la recombinaison d'un ion et d'un électron. Les premières raies de recombinaison ont été découvertes en 1964 par des astronomes soviétiques [Sorotchenko et autres, 1964]. Les régions de gaz chauds ionisés produisent de nombreuses raies de recombinaison qui sont présentes dans tout le spectre radioélectrique [Lilley et Palmer, 1968]; certaines d'entre elles sont situées dans des bandes du SRA attribuées à l'observation du continuum, et quelques-unes se trouvent dans des bandes du SRA attribuées, à l'origine, à l'observation spécifique d'autres raies, notamment les raies de HI et OH. S'agissant des raies de recombinaison, l'observation de leur intensité et de leur forme nous permet de déterminer les conditions physiques qui ont permis leur apparition. Parmi ces raies, les plus intenses sont dues à des transitions entre des niveaux d'énergie adjacents de l'hydrogène, leur intensité représentant le plus souvent quelques pourcents de celle du continuum thermique.

#### 2.4.2 Mesure des raies spectrales

Les observateurs des raies spectrales divisent la bande passante du récepteur en un grand nombre de canaux de fréquences d'égale largeur, le plus souvent par un traitement numérique du signal de fréquence intermédiaire (FI). La Figure 2.7 illustre la courbe type d'une observation obtenue à l'aide d'une antenne monoparabole. Les émissions des raies spectrales étroites par nature émanant d'un atome ou d'une molécule d'un nuage cosmique de gaz sont toujours élargies par déplacement Doppler en raison des mouvements internes au nuage. Aussi leur intensité et leur intervalle de fréquences permettent-ils de déduire le mouvement et la masse des constituants du nuage. Toutefois, les données spectrales non corrigées subissent une distorsion qui est due aux possibles imperfections de la bande passante de réception, à la présence d'ondes stationnaires dans l'antenne/le système d'alimentation et à l'éventuelle non-uniformité du spectre du fond diffus cosmologique. On élimine généralement ces effets en répétant l'observation: d'une part, à une fréquence centrale légèrement différente pour éliminer l'incidence de la pente et de l'ondulation dans la bande passante; d'autre part, pour des emplacements voisins dans le ciel afin de supprimer les émissions dues au fond cosmique. Il est difficile d'éliminer totalement les effets du rayonnement de l'hydrogène neutre (élément très répandu sur l'ensemble de la voûte céleste); cela nécessite une connaissance détaillée de l'intégralité du diagramme d'antenne et une certaine connaissance de la répartition des gaz cosmiques qui se trouveraient, par inadvertance, pointés par les lobes latéraux.

FIGURE 2.7

Exemple d'un profil, à la sortie du récepteur, de la raie spectrale de l'hydrogène neutre



On représente en ordonnée la puissance de sortie du récepteur (proportionnelle à la température d'antenne) et en abscisse le numéro du canal de fréquences. Les largeurs de bande des canaux sont choisies en fonction de la largeur des raies spectrales. L'élargissement observé sur la figure de la raie spectrale monofréquence s'explique par les mouvements de particules émettrices dans le nuage le long de la ligne de visée de l'antenne. L'inclinaison de la pente est due à l'association de plusieurs effets instrumentaux et peut être au rayonnement du bruit de fond cosmique, effets qui seront corrigés par un traitement de données ultérieures.

Radio-Astro\_27

Le profil observé d'une raie, c'est-à-dire la variation de l'intensité en fonction de la fréquence, subit un déplacement Doppler par rapport à la fréquence naturelle intrinsèque en raison de la vitesse radiale des atomes/molécules par rapport à l'observateur. En outre, la turbulence dans le nuage a pour effet d'élargir le profil de la raie. Si elle est petite par rapport à la vitesse,  $c$ , de la lumière, la vitesse radiale,  $v_r$ , est liée au déplacement relatif de fréquence  $\frac{\Delta f}{f}$  par la relation:

$$v_r = -c \frac{\Delta f}{f}$$

Notons ici que la vitesse est positive s'il s'agit d'une récession, d'où un déplacement négatif de la fréquence, c'est-à-dire une diminution de la fréquence, souvent appelée «déplacement vers le rouge». La rotation différentielle dans notre Galaxie impose que l'intervalle de vitesses radiales observées des objets galactiques soit compris entre plus et moins 300 km/s. De ce fait, les données de vitesse offrent effectivement une troisième dimension, le long de l'axe de visée, qui vient compléter la distribution de la matière projetée sur la carte du ciel. De plus, la polarisation de certaines émissions de raies spectrales, comme les émissions masers, peut nous renseigner sur les champs magnétiques présents dans ces nuages.

Dans le cas d'un nuage moléculaire, l'intensité du profil à une fréquence donnée dépend de la température, de la densité de colonne et de la profondeur optique à cette fréquence. La ségrégation de ces paramètres peut souvent être effectuée si la raie contient une structure associée aux composantes hyperfines des niveaux d'énergie en jeu dans la transition; sinon, ces paramètres peuvent être déterminés en comparant diverses transitions d'une même molécule. Cette dernière technique est particulièrement utile pour lever les ambiguïtés dues aux émissions épaisses d'un point de vue optique: il suffit d'étudier l'un de leurs isotopes interstellaires présents en moins grande quantité, par exemple  $^{13}\text{CO}$  au lieu de  $^{12}\text{CO}$ .

Les raies spectrales du domaine radioélectrique sont particulièrement bien adaptées à la mesure précise des déplacements Doppler, car il est facile de mesurer les fréquences radioélectriques avec une grande précision. En associant des mesures Doppler effectuées sur des sources masers en orbite rayonnant une raie d'eau à 22 GHz avec des mesures VLBI à haute résolution angulaire de la position de ces sources, on a déterminé

directement la distance à la galaxie NGC4258, à savoir  $7,2 \pm 0,3$  Mpc<sup>6</sup>. C'est ainsi qu'a été réalisée la première mesure directe de la distance d'un objet extragalactique totalement indépendante de toute autre séquence de mesures astronomiques [Herrnstein et autres, 1999].

Chaque canal d'un spectromètre correspond à une gamme de déplacements Doppler particulière; aussi, lorsqu'un réseau d'antennes est utilisé pour des observations de raies spectrales, une image distincte est réalisée pour chaque canal. Le déplacement Doppler pouvant souvent être interprété en termes de distance, on n'obtient plus une carte mais un cube de données, qui permet de représenter la distribution des particules de la source dans un cube spatial.

De nombreuses heures d'observation sont souvent nécessaires pour obtenir les sensibilités permettant de tirer des conclusions intéressantes en matière d'astrophysique. Il faut pour cela disposer de bandes de fréquences exemptes de brouillage préjudiciable et d'une largeur suffisante pour couvrir le déplacement des raies par effet Doppler et englober des bandes de comparaison bordant la raie d'émission.

## 2.5 Pratique moderne

Les radioastronomes tirent parti de nombreuses avancées techniques: augmentation progressive des fréquences centrales des récepteurs, baisse de la température de ces systèmes et augmentation de leur largeur de bande. Les infrastructures d'arrière-plan de type numérique sont aujourd'hui généralisées et l'acquisition des données est commandée par ordinateur. Ces innovations facilitent les intégrations courtes et les résultats sont analysés à la recherche de brouillages RFI avant de calculer la moyenne en vue d'obtenir la sensibilité souhaitée. Les progrès réalisés en matière de débit des données et le coût toujours plus faible des composants mémoires permettent de sauvegarder de vastes jeux de données en vue d'un traitement ultérieur par des algorithmes qui ne cessent de s'améliorer. Bon nombre de ces avancées bénéficient avant tout aux astronomes qui effectuent des observations de type VLBI. Ceux-ci peuvent aujourd'hui utiliser simultanément des télescopes situés en Amérique du Nord et en Amérique du Sud, ainsi qu'en Europe et en Afrique du Sud, et obtenir des données en temps réel sur des réseaux à fibre optique, réduire ces données et produire les images correspondantes en quasi-temps réel. La bande passante de cette classe d'observations a doublé plusieurs fois ces dix dernières années, ce qui s'est accompagné de gains de sensibilité. Autrefois en revanche, les observations VLBI étaient mémorisées sur des bandes magnétiques pour être réduites dans les mois suivants. Les observateurs de raies spectrales monoparabole n'ont pas eu à endurer une cadence aussi lente depuis les années 60.

Les évolutions technologiques ont modifié les modalités à privilégier en ce qui concerne l'observation du continuum. Ainsi est-il aujourd'hui préférable d'utiliser un spectromètre numérique permettant de détecter les brouillages radioélectriques de forte intensité, lesquels seront éliminés du spectre avant la mesure. De même, la large bande passante des récepteurs actuels a encouragé les radioastronomes qui ont la chance de disposer d'un mode d'observation assurant une protection inhérente contre les brouillages radioélectriques à effectuer des observations à l'extérieur des bandes attribuées au SRA. Pour obtenir des données valides d'un point de vue astronomique, d'autres observateurs recourent à des filtres coupe-bande (parfois du type supraconducteur à haute température) de façon à éliminer les signaux intenses non désirés qui sont adjacents à la bande passante choisie; ils utilisent aussi une résolution en fréquence élevée, qui permet d'appliquer aux paramètres anthropiques à bande étroite des techniques d'éradication. Quoi qu'il en soit, le SRA a toujours besoin de ses bandes d'attribution, d'une part pour permettre un étalonnage précis des données et, d'autre part, pour réduire au minimum l'ambiguïté associée au brouillage radioélectrique dans les observations des raies spectrales.

## 2.6 Conclusion

La radioastronomie joue un rôle essentiel dans l'étude de la physique fondamentale et de l'astronomie de l'Univers. Nombre de phénomènes étudiés ne sont pas observables dans d'autres parties du spectre électromagnétique. Citons, parmi de nombreux autres exemples, l'émission spectrale de l'hydrogène atomique neutre, l'émission du fond diffus cosmologique micro-onde et sa structure angulaire dont l'importance est fondamentale en cosmologie, les vastes régions d'émissions synchrotron associées aux galaxies radioélectriques ou encore les régions de formation d'étoiles obscurcies par la poussière aux ondes optiques. De plus, le domaine radioélectrique offre la plus grande résolution angulaire que l'on puisse atteindre, les

---

<sup>6</sup> Une mégaparsec (Mpc) =  $3,26 \times 10^6$  années-lumière.



positions angulaires les plus précises et les déplacements Doppler les plus exacts. La radioastronomie n'est donc pas un simple complément aux techniques optiques classiques, elle joue un rôle majeur dans la découverte de nombreux champs de l'astronomie et de l'astrophysique.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENNET, C. et al. [2003] «The Microwave Anisotropy Probe (MAP) Mission», *Astrophysical Journal*, Vol 583 (1), p. 1–23.
- BURKE, B. F. and GRAHAM-SMITH, F. [2002] *An introduction to radio astronomy*, 2nd ed., Cambridge University Press.
- EWEN, H. I. and PURCELL, E. M. [1951] Observations of a line in the galactic radio spectrum. *Nature*, Vol. 168, p. 356.
- HERRNSTEIN, J. R., MORAN, J. M., GREENHILL, L. J., DIAMOND, P. J., INOUE, M., NAKAI, N., MITOSHI, M., HENKEL, C. and RIESS, A. [1999] A geometric distance to the galaxy NGC4258 from orbital motions in a nuclear gas disk. *Nature*, Vol. 158, p. 539.
- HEWISH, A., BELL, S. J., PILKINGTON, J. D. H., SCOTT, P. F. and COLLINS, R. A. [1968] Observations of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, Vol. 217, p. 709-713.
- JANSKY, K. G. [1935] A note on the source of interstellar interference. *Proc. IRE*. Vol. 23, p. 1158-1163.
- JESSNER, A. et al. [2010] Giant pulses with nanosecond time resolution detected from the Crab pulsar at 8.5 and 15.1 GHz, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 524, id.A60
- KROTO, H. W., KIRBY, C., WALTON, D. R. M., AVERY, L. W., BROTON, N. W., MACLEOD, J. M. and OKA, T. [1978] The detection of cyanohexatriyne in Heiles's cloud 2. *Astrophys. J.*, Vol. 219, L133-L137.
- KROTO, H. W., HEATH, J. R., OBRIEN, S. C., CURL, R. F. and SMALLEY, R. E. [1985]  $C_{60}$ : Buckminsterfullerene. *Nature*, Vol. 318, p. 162-163.
- LILLEY, A. E. and PALMER, P. [1968] Tables of radio frequency recombination lines. *Astrophys. J.*, Suppl. Series, Vol. 16, p. 143-174.
- D. LORIMER, D. and KRAMER, M [2005]: *Handbook of Pulsar Astronomy*, CUP, Cambridge (U.K.).
- LOVAS, F. J. [2004] Recommended rest frequencies for observed interstellar molecular microwave transitions – 2002 revision. *J. Phys. and Chem. Ref. Data*. Vol. 33, p. 117-335.
- MA, C, ARIAS, E. F., FEY, A. L., GONTIER, A.-M., JACOBS, C. S., SOVERS, O. J., ARCHINAL, B. A. and CHARLOT, P. [1998] The international celestial reference frame as realized by very long baseline interferometry. *Astron. J.*, Vol. 116, p. 516-546.
- MCLEAN, D. J. and LABRUM, N. R. [1985] *Studies of the sun at metre wavelengths*. Cambridge University Press.
- Planck Collaboration et. al [2011] Planck early results. I. The Planck Mission, *Astron. and Astrophys*, Vol. 536, 1
- PRYKE, C., HALVERSON, N. W., LEITCH, E. M., KOVAC, J., CARLSTROM, J. E., HOLZAPFEL, W. L. and DRAGOVAN, N. [2002] Cosmological parameter extraction from the first season of observations with the degree angular scale interferometer. *Astrophys. J.*, Vol. 568, p. 46-51.
- ROBERTS, J. A. [1963] Radio emission from the planets. *Planet and Space Sci.*, Vol. 11, p. 221.

SMOOT, G. F. and 27 co-authors [1992] Structure of the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *Astrophys. J.*, Vol. 396, L1-L5.

SOROTCHENKO, R. L., BORODZITCH, O. S., DRAVSKIKH, Z. V. and KOLBASSOV, V. A. [1964] Proc. of the XIIth General Assembly of the International Astronomical Union, Hamburg, Germany.

## CHAPITRE 3

### Bandes de fréquences préférées pour les observations radioastronomiques

#### 3.1 Considérations d'ordre général

##### 3.1.1 Observations radioastronomiques à partir du sol

Le choix de fréquences pour les observations radioastronomiques à partir du sol dépend des phénomènes à observer et de l'atmosphère terrestre (troposphère et ionosphère). L'ionosphère influe considérablement sur les observations aux fréquences inférieures à 30 MHz; les mesures effectuées indiquent que la fréquence la plus basse utilisable pour les observations à partir du sol est d'environ 1,5 MHz (voir le § 3.2.1); la plupart des observations sont réalisées à des fréquences supérieures à 20 MHz environ. Quant à la troposphère, elle influe sur les mesures par un phénomène d'absorption, qui est essentiellement dû à l'oxygène ( $O_2$ ) et à la vapeur d'eau ( $H_2O$ ). L'affaiblissement dû aux résonances de ces molécules est représenté par les courbes de la Figure 3.1. Les autres constituants atmosphériques (CO, NO ou  $NO_2$  par exemple) n'ont qu'une influence négligeable. Si, parmi les premières découvertes d'émissions radioélectriques galactiques, certaines ont été faites à quelques dizaines de mégahertz (c'est-à-dire à des longueurs d'onde décimétriques), les radioastronomes se sont progressivement intéressés à des fréquences plus élevées.

La grande résolution angulaire que l'on peut obtenir avec des antennes paraboliques, le développement de préamplificateurs à faible bruit et la cascade de découvertes réalisées à des fréquences élevées ont contribué à cette tendance. Les radioastronomes ont été les précurseurs de l'utilisation des fréquences supérieures à 100 GHz, et les observations sont maintenant réalisées jusqu'à 1 000 GHz. Le grand réseau d'antennes millimétrique/submillimétrique d'Atacama (ALMA) est devenu opérationnel en 2010<sup>7</sup>. Situé dans le désert d'Atacama (Chili), il permet d'effectuer des observations entre 30 et 950 GHz, avec une résolution spatiale atteignant 0,01 seconde d'arc. Il devrait révéler la structure détaillée des sites de formation des planètes, la formation et l'évolution des galaxies, la relation entre l'Univers et l'origine de la vie, et maints autres champs inexplorés de la radioastronomie.

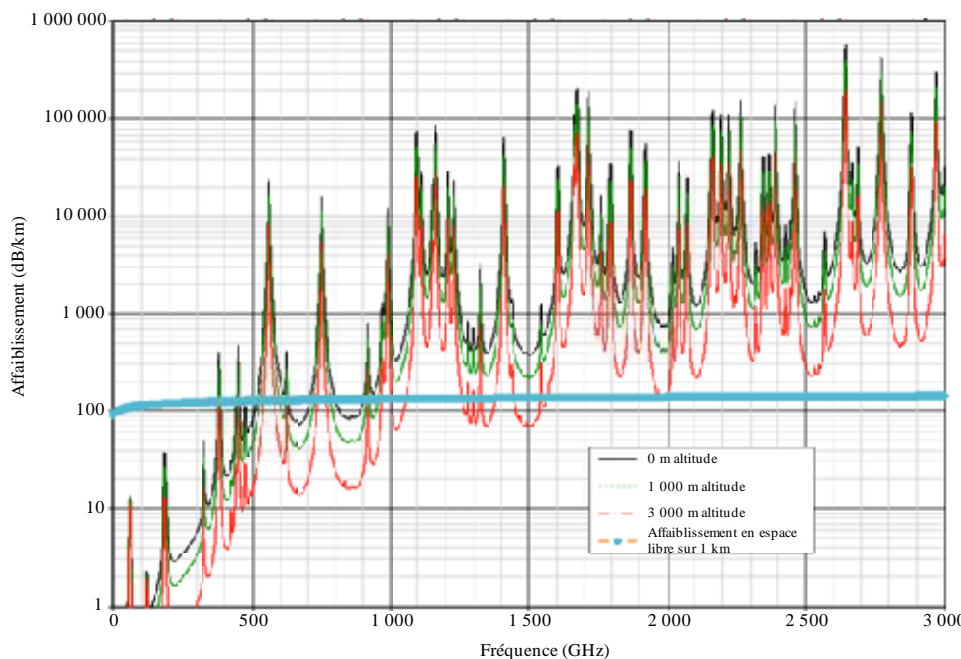
Indépendamment des nouveaux résultats obtenus aux hautes fréquences, certains des phénomènes intéressant l'astrophysique ne se produisent qu'aux basses fréquences, notamment l'absorption spontanée dans les régions ionisées de la Galaxie, l'auto-absorption dans les radiosources extragalactiques et les mécanismes d'émission à basse fréquence provenant de plasmas ténus dans les amas galactiques.

---

<sup>7</sup> <http://www.almaobservatory.org/>

FIGURE 3.1

**Affaiblissement atmosphérique calculé sur des trajets horizontaux de 1 km à quatre altitudes différentes. Pour comparaison: l'affaiblissement en espace libre sur 1 km est également représenté**



### 3.1.2 Observations radioastronomiques à partir de l'espace

Les observations à partir de l'espace constituent un domaine de la radioastronomie relativement nouveau. Plusieurs observations radioastronomiques de ce type ont été menées, par exemple par les satellites COBE, SWAS, ODIN, HALCA, WMAP et PLANCK.

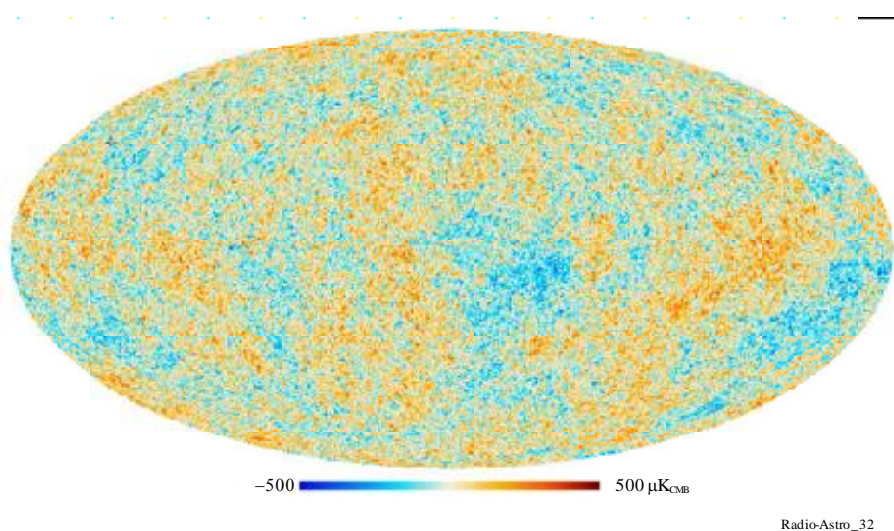
Les satellites COBE, WMAP et PLANCK ont détecté et cartographié l'anisotropie du rayonnement du fond diffus cosmologique micro-onde. La distribution de ce rayonnement mesuré entre 30 et 857 GHz par le satellite PLANCK (voir la Figure 3.2) a permis de déterminer l'âge de l'Univers, soit 13,8 milliards d'années, et de déduire le fait notable suivant: les atomes ordinaires (aussi appelés baryons) ne constituent que 4,9% de l'Univers; la matière noire (matière non composée d'atomes) représente 26,8%; et l'énergie noire (sous la forme d'une constante cosmologique) est présente à 68,3% et est responsable de l'accélération de la vitesse d'expansion de l'Univers.

Les satellites SWAS et ODIN ont utilisé des fréquences d'observation supérieures à 100 GHz et atteignant 500 GHz environ pour mesurer de très grandes quantités de molécules  $H_2O$  et  $O_2$  ainsi que d'autres raies spectrales dont l'observation est quasiment impossible à partir de la surface de la Terre.

Le satellite HALCA a été associé à des radiotélescopes au sol pour réaliser les premières expériences d'interférométrie VLBI spatiale à 1,4, 1,6 et 5 GHz. Puisqu'elle permet de s'affranchir de l'absorption atmosphérique, la radioastronomie à partir de l'espace joue un rôle majeur dans l'observation des plages de fréquences impropres aux observations au sol.

FIGURE 3.2

Image détaillée de l'ensemble du ciel montrant l'Univers naissant. Cette image a été réalisée à partir de mesures effectuées par le satellite PLANCK pendant 15,5 mois



L'image révèle des fluctuations de température datant de 13,77 milliards d'années (représentées par différentes couleurs); elles correspondent aux germes qui donneront naissance aux galaxies. Le signal provenant de notre Galaxie a été retranché au moyen des données multifréquences. L'image montre une plage de températures de  $\pm 500 \mu\text{K}$ .

Crédit: Agence spatiale européenne et Planck Collaboration<sup>8</sup>.

### 3.2 Bandes préférées pour l'étude du rayonnement à spectre continu

Par l'observation du rayonnement à spectre continu, la radioastronomie s'attache, entre autres, à déterminer de façon suffisamment précise la distribution spectrale du rayonnement pour en tirer des conclusions quant aux mécanismes physiques qui en sont à l'origine. Des observations effectuées sur chaque octave du spectre suffisent généralement à cet effet, encore que des mesures plus rapprochées puissent être nécessaires dans certains cas. Le choix des bandes de fréquences doit s'étendre de la fréquence la plus basse à la fréquence la plus haute pour lesquelles les observations à partir du sol sont généralement possibles, c'est-à-dire de 10 MHz environ à 1 000 GHz.

Le Chapitre 4 indique que le niveau minimal du signal détectable est inversement proportionnel à la racine carrée de la largeur de bande pour les observations du rayonnement à spectre continu. C'est pourquoi, en l'absence de brouillage, l'emploi de bandes de fréquences aussi larges que possible améliore la sensibilité des mesures et permet d'utiliser plus efficacement les instruments astronomiques d'importance majeure. Pour une bonne sensibilité d'observation, 2% sont considérés comme une largeur de bande minimale, la largeur souhaitable étant de 10%.

On trouvera au Tableau 3.1 la liste des bandes attribuées au SRA au-dessous de 275 GHz et qui conviennent le mieux à l'observation du rayonnement à spectre continu (voir également le Tableau 3 de la Recommandation UIT-R RA.314).

<sup>8</sup> <http://www.esa.int/Planck>.

TABLEAU 3.1

**Bandes de fréquences attribuées au SRA au-dessous de 275 GHz  
qui conviennent le mieux aux observations du continuum**

Bande de fréquences (MHz)	Largeur de bande (%)	Bande de fréquences (GHz)	Largeur de bande (%)
13,360-13,410	0,37	10,6-10,70	0,94
25,550-25,670	0,49	15,35-15,40	0,33
37,5-38,25	1,98	22,21-22,50	1,30
73-74,6 <sup>(1)</sup>	2,17	23,6-24,00	1,68
150,05-153 <sup>(2)</sup>	1,95	31,33-31,80	1,58
322-328,6	2,03	42,5-43,50	2,33
406,1-410	0,96	76-116	41,67
608-614 <sup>(3)</sup>	0,98	123-158,5	25,22
1 400-1 427	1,91	164-167	1,81
1 660-1 670	0,60	200-231,5	14,60
2 655-2 700	1,68	241-248	2,87
4 800-5 000	4,08	250-275	9,52

<sup>(1)</sup> Attribution (à titre primaire) dans la Région 2, protection recommandée dans les Régions 1 et 3.

<sup>(2)</sup> Attribution (à titre primaire) dans la Région 1, Australie et Inde.

<sup>(3)</sup> Attribution (à titre primaire) dans la Région 2, dans la Zone africaine de radiodiffusion (606-614 MHz), en Chine (606-614 MHz) et en Inde. Dans la Région 1 (à l'exception de la Zone africaine de radiodiffusion) et dans la Région 3, cette bande est attribuée à titre secondaire.

Le degré de protection dont bénéficie la radioastronomie n'est pas le même dans toutes ces bandes, et il est même parfois insuffisant pour permettre la pleine utilisation de la bande par les radioastronomes. Certaines de ces bandes sont partagées avec des services (émetteurs) actifs; on trouvera quelques exemples de ces problèmes de partage dans le Chapitre 5.

Si la protection est suffisante, certaines bandes énumérées dans le Tableau 3.1 répondent aux spécifications minimales (largeur de bande de 2%) pour ce qui est de la couverture en fréquence. Mais il est à noter que, parmi les bandes les plus utilisées dans la région des basses fréquences (au-dessous de 76 GHz), seule la bande des 1 414 MHz se rapproche du critère de largeur de bande minimale. La situation est très différente dans la région des fréquences supérieures à 76 GHz puisque la CMR-2000 y a élargi les attributions faites au SRA, et que quatre des bandes dépassent une largeur de 10%.

### 3.2.1 Observations à basses fréquences

Les observations radioastronomiques à des fréquences inférieures à environ 50 MHz posent des problèmes qui n'existent pas aux hautes fréquences. On manque d'instruments ayant une résolution angulaire élevée: il faudrait des antennes de plusieurs kilomètres de largeur pour que la résolution soit inférieure à un degré. Quelques observatoires de radioastronomie basse fréquence ont développé des interféromètres permettant de surmonter les problèmes de résolution spatiale. Au-dessous de 13 MHz, aucune bande n'est attribuée au service de radioastronomie. En outre, du fait que les télécommunications dans le monde, notamment le service de radiodiffusion, font un usage intensif des basses fréquences pour la propagation par réflexions ionosphériques, il est extrêmement difficile de trouver des sites radioastronomiques sur Terre qui soient à l'abri de signaux brouilleurs. Les observations à basses fréquences sont affectées par l'ionosphère terrestre, qui fluctue selon l'heure du jour, la période de l'année et l'activité solaire. Les observations ne sont possibles que si la densité électronique de la région F est suffisamment faible pour que la traversée de l'ionosphère soit possible et relativement exempte d'irrégularités à l'échelle du kilomètre afin de réduire au minimum la distorsion de

l'ouverture angulaire sous l'influence des scintillations. Les rares observations à partir du sol à des fréquences inférieures à 10 MHz ont été réalisées depuis la Tasmanie, qui est un site privilégié du point de vue des limitations ionosphériques et de l'absence de brouillage. Les observations réalisées dans cette région au début des années 1960 permettent de fixer à 1,5 MHz la limite pratique aux mesures radioastronomiques à partir du sol.

### 3.2.2 Observations du rayonnement à spectre continu dans les fréquences élevées

Aux fréquences supérieures à 20 GHz, les bandes sont choisies de telle sorte que les maxima d'absorption atmosphérique par l'oxygène (O<sub>2</sub>) et la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) soient évités. Les bandes choisies pour observer le continuum doivent se situer au voisinage des minima d'absorption atmosphérique aux environs de 30, 90, 150, 240, 410, 470, 670 et 850 GHz. Ainsi, malgré le choix limité, des intervalles d'échantillonnage convenables sont disponibles. Actuellement, les bandes attribuées à la radioastronomie ne vont pas au-delà de 275 GHz; la politique consistant à retenir des bandes contenant des raies spectrales importantes a dicté le choix de l'intervalle de fréquences pour de nombreuses bandes, en particulier aux hautes fréquences. On notera que les bandes 275-323 GHz, 327-371 GHz, 388-424 GHz, 426-442 GHz, 453-510 GHz, 623-711 GHz, 795-909 GHz et 926-945 GHz ont été identifiées en vue d'une utilisation par les administrations pour le service de radioastronomie. Au XXI<sup>e</sup> siècle, les services actifs exigent de plus en plus l'utilisation de bandes de fréquences élevées pour les communications à large bande. La CMR-12 a adopté le numéro **5.565** révisé, qui dispose que «toutes les fréquences de la gamme 1 000-3 000 GHz peuvent être utilisées à la fois par les services actifs et les services passifs».

Le Rapport UIT-R RA.2189 présente les résultats d'études de partage de fréquences entre 275 et 3 000 GHz. Ce Rapport indique en conclusion que le partage entre le service de radioastronomie et les services actifs dans la plage 275-3 000 GHz ne pose pas de problème, et ce pour les raisons suivantes:

*Au sol, à supposer que l'on se place dans les conditions quasiment les plus défavorables, il faudrait, pour produire au niveau du télescope un signal susceptible d'avoir un effet préjudiciable sur les observations de radioastronomie, qu'une liaison de Terre opérant dans la gamme 275-1 000 GHz se situe à une haute altitude et achemine la puissance maximale disponible via une grande parabole pointant directement vers le télescope. Au-dessus de 1 000 GHz, la source de brouillage devrait être à moins de 1 km, développer une puissance maximale et pointer directement vers le télescope pour que les seuils de brouillage soient dépassés; il est plus que probable qu'une telle liaison passant à proximité serait commandée par l'observatoire de radioastronomie lui-même ou qu'elle serait soumise à une coordination locale informelle avec l'observatoire brouillé.*

*S'agissant des brouillages causés par les émetteurs aéroportés, compte tenu de la faible ouverture de faisceau de la source de brouillage et du niveau élevé d'affaiblissement atmosphérique sur un trajet oblique, il faudrait que l'avion vole précisément à la verticale du radiotélescope pour que ce dernier subisse des brouillages. En survolant l'observatoire une seule fois à une altitude minimale de 7 000 m, un émetteur à 275 GHz ne produirait pas de brouillage dépassant le niveau spécifié dans la Recommandation UIT-R RA.769. Si l'avion s'écartait de sa route de plus de ~1/5 km, il ne pourrait en résulter fondamentalement aucun brouillage observable.*

*Pour ce qui est des brouillages causés par les satellites, les facteurs antagoniques «dimension du faisceau projeté», «vitesse relative» et «affaiblissement en espace libre» se combinent pour ménager une marge relativement constante au-dessus des seuils de brouillage de la Recommandation UIT-R RA.769 extrapolés. En admettant qu'il n'y ait pas de pertes supplémentaires dues à l'affaiblissement atmosphérique et que le satellite soit passé à la verticale du télescope, le niveau de signal moyen pour un temps d'intégration de 2 000 s est au moins inférieur de 18 dB par rapport au seuil de brouillage préjudiciable. Même les niveaux de signal émis par les satellites géostationnaires ne sont en principe pas suffisants pour produire un brouillage.*

### 3.3 Bandes pour les observations de raies spectrales

Les raies spectrales doivent être observées aux fréquences caractéristiques de l'émission spectrale des atomes ou des molécules à l'étude. Au-dessous de 1 000 GHz, les raies spectrales considérées comme les plus importantes en astrophysique sont énumérées dans les Tableaux 3.2 et 3.3 (voir également les Tableaux 1 et 2 de la Recommandation UIT-R RA.314). De plus, la Recommandation UIT-R RA.1860 intitulée «Bandes de fréquences préférées pour les mesures de radioastronomie entre 1 et 3 THz» contient une très longue liste de

raies spectrales de la plus haute importance pour la radioastronomie entre 1 000 et 3 000 GHz. Ces raies, qui se fondent sur une recommandation de l'Union astronomique internationale (UAI), ont été choisies parmi les milliers de raies détectées ou théoriques du spectre hyperfréquences<sup>9</sup>. La liste des raies les plus importantes est périodiquement mise à jour par l'UAI et les révisions sont incorporées dans les comptes rendus de l'UAI ainsi que dans les Recommandations UIT-R RA.314 et RA.1860.

Les largeurs de bande nécessaires à l'observation des raies énumérées dans les Tableaux 3.2 et 3.3 sont déterminées par le déplacement Doppler de leurs fréquences de repos; ce déplacement est dû à la vitesse radiale de la région d'émission par rapport à un observateur situé sur Terre. Pour la plupart des molécules, les vitesses radiales limites choisies sont de  $\pm 300$  km/s et tiennent donc compte du déplacement des raies spectrales dont la source est à l'intérieur de notre Galaxie. Cela équivaut à un déplacement Doppler de  $\pm 0,1\%$  de la fréquence de repos. Mais des raies spectrales de plus en plus nombreuses sont observées dans les émissions d'autres galaxies et les bandes minimales qu'il est suggéré d'attribuer pour couvrir certaines raies des tableaux ont été étendues vers le bas pour tenir compte des grandes vitesses de récession de ces galaxies. De nombreuses raies ont déjà été détectées dans les galaxies autres que la nôtre. Pour ces raies, les bandes minimales proposées devront être convenablement modifiées dans les futures révisions des différentes listes.

L'intérêt, pour le SRA, de nombreuses raies spectrales énumérées au Tableau 3.2 a été reconnu dans le Tableau d'attribution des fréquences du RR. Dans certains cas, les largeurs de bande reconnues sont au moins égales aux largeurs indiquées dans le Tableau 3.2, mais l'attribution n'est pas faite à titre primaire et la protection accordée est minimale. Cela vaut tout particulièrement aux grandes longueurs d'onde, car l'ouverture d'un lobe latéral isotrope,  $\lambda^2/4\pi$ , passe de  $10 \text{ mm}^2$  à  $30 \text{ GHz}$  à  $10^5 \text{ m}^2$  à  $300 \text{ MHz}$ . Pour certaines raies spectrales observables dans les émissions de galaxies éloignées, par exemple celles des molécules OH (1 612 MHz et 1 720 MHz), CH (3 263, 3 335 et 3 349 MHz), H<sub>2</sub>CO (4 830 MHz) et H<sub>2</sub>O (22,235 GHz), les largeurs de bande attribuées sont insuffisantes. La plupart des milliers de raies spectrales détectables qui ne sont pas citées dans le Tableau 3.2 ne bénéficient d'aucune protection. Avec l'utilisation croissante du spectre par des services actifs, l'observation d'un grand nombre de ces raies deviendra peut-être impossible. Cela vaut en particulier pour les raies spectrales situées à l'intérieur ou au voisinage des bandes de fréquences attribuées aux services qui émettent depuis des satellites.

---

<sup>9</sup> Splatalogue – Base de données pour la spectroscopie astronomique: <http://splatalogue.net/>; Base de données de Cologne pour la spectroscopie moléculaire: <http://www.astro.uni-koeln.de/cdms>; NIST, Fréquences de repos recommandées pour l'observation des transitions hyperfréquences moléculaires interstellaires: <http://physics.nist.gov/cgi-bin/micro/table5/start.pl>.



TABLEAU 3.2

**Raies de fréquence radioélectrique au-dessous de 275 GHz  
qui sont de la plus haute importance pour la radioastronomie**

Corps	Fréquence intrinsèque	Bande minimale proposée	Notes <sup>(1)</sup>
Deutérium (DI)	327,384 MHz	327,0-327,7 MHz	
Hydrogène (HI)	1 420,406 MHz	1 370,0-1 427,0 MHz	(2), (3)
Radical oxhydryle (OH)	1 612,231 MHz	1 606,8-1 613,8 MHz	(4)
Radical oxhydryle (OH)	1 665,402 MHz	1 659,8-1 667,1 MHz	(4)
Radical oxhydryle (OH)	1 667,359 MHz	1 661,8-1 669,0 MHz	(4)
Radical oxhydryle (OH)	1 720,530 MHz	1 714,8-1 722,2 MHz	(3), (4)
Méthyladyne (CH)	3 263,794 MHz	3 252,9-3 267,1 MHz	(3), (4)
Méthyladyne (CH)	3 335,481 MHz	3 324,4-3 338,8 MHz	(3), (4)
Méthyladyne (CH)	3 349,193 MHz	3 338,0-3 352,5 MHz	(3), (4)
Formaldéhyde (H <sub>2</sub> CO)	4 829,660 MHz	4 813,6-4 834,5 MHz	(3), (4)
Méthanol (CH <sub>3</sub> OH)	6 668,518 MHz	6 661,8-6 675,2 MHz	(3)
Hélium ( <sup>3</sup> He <sup>+</sup> )	8 665,650 MHz	8 657,0-8 674,3 MHz	(3), (6)
Méthanol (CH <sub>3</sub> OH)	12,178 GHz	12,17-12,19 GHz	(3), (6)
Formaldéhyde (H <sub>2</sub> CO)	14,488 GHz	14,44-14,50 GHz	(3), (4)
Cyclopropénylidène (C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> )	18,343 GHz	18,28-18,36 GHz	(3), (4), (6)
Vapeur d'eau (H <sub>2</sub> O)	22,235 GHz	22,16-22,26 GHz	(3), (4)
Ammoniac (NH <sub>3</sub> )	23,694 GHz	23,61-23,71 GHz	(4)
Ammoniac (NH <sub>3</sub> )	23,723 GHz	23,64-23,74 GHz	(4)
Ammoniac (NH <sub>3</sub> )	23,870 GHz	23,79-23,89 GHz	(4)
Monoxyde de soufre (SO)	30,002 GHz	29,97-30,03 GHz	(6)
Méthanol (CH <sub>3</sub> OH)	36,169 GHz	36,13-36,21 GHz	(6)
Monoxyde de silicium (SiO)	42,519 GHz	42,47-42,57 GHz	(3)
Monoxyde de silicium (SiO)	42,821 GHz	42,77-42,86 GHz	
Monoxyde de silicium (SiO)	43,122 GHz	43,07-43,17 GHz	
Monoxyde de silicium (SiO)	43,424 GHz	43,37-43,47 GHz	
Monosulfure de carbone (CS)	45,379 GHz	45,33-45,44 GHz	(6)
Monosulfure de carbone (CS)	48,991 GHz	48,94-49,04 GHz	
Oxygène (O <sub>2</sub> )	61,1 GHz	56,31-63,06 GHz	(5), (6), (7)

TABLEAU 3.2 (*fin*)

Corps	Fréquence intrinsèque	Bande minimale proposée	Notes <sup>(1)</sup>
Eau deutérée (HDO)	80,578 GHz	80,50-80,66 GHz	
Cyclopropénylidène (C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> )	85,339 GHz	85,05-85,42 GHz	
Monoxyde de silicium (SiO)	86,243 GHz	86,16-86,33 GHz	
Formylium (H <sup>13</sup> CO <sup>+</sup> )	86,754 GHz	86,66-86,84 GHz	
Monoxyde de silicium (SiO)	86,847 GHz	86,76-86,93 GHz	
Radical éthyne (C <sub>2</sub> H)	87,3 GHz	87,21-87,39 GHz	(5)
Cyanure d'hydrogène (HCN)	88,632 GHz	88,34-88,72 GHz	(4)
Formylium (HCO <sup>+</sup> )	89,189 GHz	88,89-89,28 GHz	(4)
Isocyanure d'hydrogène (HNC)	90,664 GHz	90,57-90,76 GHz	
Diazénylium (N <sub>2</sub> H <sup>+</sup> )	93,174 GHz	93,07-93,27 GHz	
Monosulfure de carbone (CS)	97,981 GHz	97,65-98,08 GHz	(4)
Monoxyde de soufre (SO)	99,300 GHz	99,98-100,18 GHz	
Méthylcétyle (CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H)	102,5 GHz	102,39-102,60 GHz	(5)
Méthanol (CH <sub>3</sub> OH)	107,014 GHz	106,91-107,12 GHz	
Monoxyde de carbone (C <sup>18</sup> O)	109,782 GHz	109,67-109,89 GHz	
Monoxyde de carbone ( <sup>13</sup> CO)	110,201 GHz	109,83-110,31 GHz	(4)
Monoxyde de carbone (C <sup>17</sup> O)	112,359 GHz	112,25-112,47 GHz	(6)
Radical cyano (CN)	113,5 GHz	113,39-113,61 GHz	(5)
Monoxyde de carbone (CO)	115,271 GHz	114,88-115,39 GHz	(4)
Oxygène (O <sub>2</sub> )	118,750 GHz	118,63-118,87 GHz	(7)
Formaldéhyde (H <sub>2</sub> <sup>13</sup> CO)	137,450 GHz	137,31-137,59 GHz	(6)
Formaldéhyde (H <sub>2</sub> CO)	140,840 GHz	140,69-140,98 GHz	
Monosulfure de carbone (CS)	146,969 GHz	146,82-147,12 GHz	
Monoxyde d'azote (NO)	150,4 GHz	149,95-150,85 GHz	(5)
Méthanol (CH <sub>3</sub> OH)	156,602 GHz	156,45-156,76 GHz	
Vapeur d'eau (H <sub>2</sub> O)	183,310 GHz	183,12-183,50 GHz	
Monoxyde de carbone (C <sup>18</sup> O)	219,560 GHz	219,34-219,78 GHz	
Monoxyde de carbone ( <sup>13</sup> CO)	220,399 GHz	219,67-220,62 GHz	(4)
Radical cyano (CN)	226,6 GHz	226,37-226,83 GHz	(5)
Radical cyano (CN)	226,8 GHz	226,57-227,03 GHz	(5)
Monoxyde de carbone (CO)	230,538 GHz	229,77-230,77 GHz	(4)
Monosulfure de carbone (CS)	244,953 GHz	244,72-245,20 GHz	(6)
Monoxyde d'azote (NO)	250,6 GHz	250,35-250,85 GHz	(5)
Radical éthyne (C <sub>2</sub> H)	262,0 GHz	261,74-262,26 GHz	(5)
Cyanure d'hydrogène (HCN)	265,886 GHz	265,62-266,15 GHz	
Formylium (HCO <sup>+</sup> )	267,557 GHz	267,29-267,83 GHz	
Isocyanure d'hydrogène (HNC)	271,981 GHz	271,71-272,25 GHz	

(1) Pour toutes les raies spectrales figurant dans ce Tableau, à l'exception de celles qui portent les Notes (2) ou (4), les limites des bandes sont les fréquences ayant subi un décalage Doppler dû à des vitesses radiales de ± 300 km/s (ce qui est compatible avec les raies émises dans notre Galaxie).

(2) Une extension vers les basses fréquences de l'attribution de la bande 1 400-1 427 MHz est nécessaire afin de tenir compte des effets Doppler importants qui agissent sur HI observés dans les galaxies éloignées.

(3) L'attribution internationale actuelle n'est pas une attribution à titre primaire et/ou ne répond pas aux besoins en matière de largeur de bande. On trouvera des précisions à ce sujet dans le RR.

(4) Ces raies spectrales étant observées également dans d'autres galaxies, les largeurs de bande ci-dessus tiennent compte des effets Doppler correspondant à des vitesses radiales allant jusqu'à 1 000 km/s. Il est à noter que HI a été observé à des fréquences décalées vers le rouge à 500 MHz, et que quelques raies spectrales correspondant aux molécules les plus abondantes ont été détectées dans des galaxies à des vitesses allant jusqu'à 50 000 km/s, ce qui correspond à une diminution de fréquence pouvant atteindre 17%.

(5) Plusieurs raies spectrales très proches les unes des autres sont associées à ces molécules. Les bandes indiquées sont suffisamment larges pour permettre l'observation de toutes ces raies.

(6) Cette fréquence de raie n'appartient à aucune des bandes attribuées à la radioastronomie ou mentionnées comme étant utilisées en radioastronomie dans l'Article 5 du RR.

(7) Ces raies ne sont observables qu'au-delà de l'atmosphère terrestre.

TABLEAU 3.3

**Raies de fréquence radioélectrique situées entre 275 GHz et 1 000 GHz  
qui sont de la plus haute importance pour la radioastronomie**

Corps	Fréquence intrinsèque (GHz)	Bande minimale proposée (GHz)	Notes <sup>(1)</sup>
Diazénylium (N <sub>2</sub> H <sup>+</sup> )	279,511	279,23-279,79	
Monosulfure de carbone (CS)	293,912	292,93-294,21	
Hydronium (H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> )	307,192	306,88-307,50	
Eau deutérée (HDO)	313,750	313,44-314,06	
Monoxyde de carbone (C <sup>18</sup> O)	329,330	329,00-329,66	
Monoxyde de carbone ( <sup>13</sup> CO)	330,587	330,25-330,92	
Monosulfure de carbone (CS)	342,883	342,54-343,23	
Monoxyde de carbone (CO)	345,796	345,45-346,14	
Cyanure d'hydrogène (HCN)	354,484	354,13-354,84	
Formylium (HCO <sup>+</sup> )	356,734	356,37-357,09	
Oxygène (O <sub>2</sub> )	368,498	368,13-368,87	
Diazénylium (N <sub>2</sub> H <sup>+</sup> )	372,672	372,30-373,05	(2)
Vapeur d'eau (H <sub>2</sub> O)	380,197	379,81-380,58	(2)
Hydronium (H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> )	388,459	388,07-388,85	
Monosulfure de carbone (CS)	391,847	390,54-392,24	
Oxygène (O <sub>2</sub> )	424,763	424,34-425,19	
Monoxyde de carbone (C <sup>18</sup> O)	439,088	438,64-439,53	
Monoxyde de carbone ( <sup>13</sup> CO)	440,765	440,32-441,21	
Monoxyde de carbone (CO)	461,041	460,57-461,51	
Eau deutérée (HDO)	464,925	464,46-465,39	
Carbone (CI)	492,162	491,66-492,66	
Eau deutérée (HDO)	509,292	508,78-509,80	
Cyanure d'hydrogène (HCN)	531,716	529,94-532,25	(2)
Monosulfure de carbone (CS)	538,689	536,89-539,23	(2)
Vapeur d'eau (H <sub>2</sub> <sup>18</sup> O)	547,676	547,13-548,22	(2)
Monoxyde de carbone ( <sup>13</sup> CO)	550,926	549,09-551,48	(2)
Vapeur d'eau (H <sub>2</sub> O)	556,936	556,37-557,50	(2)
Ammoniac ( <sup>15</sup> NH <sub>3</sub> )	572,113	571,54-572,69	(2)
Ammoniac (NH <sub>3</sub> )	572,498	571,92-573,07	(2)
Monoxyde de carbone (CO)	576,268	574,35-576,84	(2)
Monosulfure de carbone (CS)	587,616	587,03-588,20	(2)
Eau deutérée (HDO)	599,927	599,33-600,53	(2)
Vapeur d'eau (H <sub>2</sub> O)	620,700	620,08-621,32	(2)
Chlorure d'hydrogène (HCl)	625,040	624,27-625,67	
Chlorure d'hydrogène (HCl)	625,980	625,35-626,61	
Monosulfure de carbone (CS)	636,532	634,41-637,17	
Monoxyde de carbone ( <sup>13</sup> CO)	661,067	658,86-661,73	
Monoxyde de carbone (CO)	691,473	690,78-692,17	
Oxygène (O <sub>2</sub> )	715,393	714,68-716,11	(2)
Monosulfure de carbone (CS)	734,324	733,59-735,06	(2)
Vapeur d'eau (H <sub>2</sub> O)	752,033	751,28-752,79	(2)
Oxygène (O <sub>2</sub> )	773,840	773,07-884,61	(2)
Cyanure d'hydrogène (HCN)	797,433	796,64-798,23	
Formylium (HCO <sup>+</sup> )	802,653	801,85-803,85	
Monoxyde de carbone (CO)	806,652	805,85-807,46	
Carbone (CI)	809,350	808,54-810,16	
Monosulfure de carbone (CS)	832,057	829,28-832,89	
Oxygène (O <sub>2</sub> )	834,146	833,31-834,98	
Monosulfure de carbone (CS)	880,899	877,96-881,78	
Vapeur d'eau (H <sub>2</sub> O)	916,172	915,26-917,09	(2)
Monoxyde de carbone (CO)	921,800	918,72-922,72	(2)
Monosulfure de carbone (CS)	929,723	926,62-930,65	
Vapeur d'eau (H <sub>2</sub> O)	970,315	969,34-971,29	(2)
Monosulfure de carbone (CS)	978,529	977,55-979,51	(2)
Vapeur d'eau (H <sub>2</sub> O)	987,927	986,94-988,92	(2)

(1) Les limites des bandes sont les fréquences ayant subi un décalage Doppler dû à des vitesses radiales de ± 300 km/s (ce qui est compatible avec les raies émises dans notre Galaxie).

(2) Ces raies ne sont observables qu'au-delà de l'atmosphère terrestre.



## CHAPITRE 4

### Vulnérabilité des observations radioastronomiques au brouillage

#### 4.1 Introduction

Le rayonnement mesuré en radioastronomie se caractérise dans la plupart des cas par une amplitude de distribution gaussienne. A l'exception du cas des émissions de raies spectrales à bande étroite, il présente les mêmes caractéristiques statistiques que le bruit thermique rayonné par la Terre, le bruit thermique rayonné par l'atmosphère terrestre ou le bruit engendré à l'intérieur même des récepteurs. En outre, les émissions radioélectriques d'origine cosmique sont de très faible intensité. Dans les observations radioastronomiques, le rapport  $S/N$  dans les étages FI et RF du récepteur est généralement de l'ordre de  $-20$  dB à  $-60$  dB; autrement dit, la puissance provenant de la source étudiée est de  $10^{-2}$  à  $10^{-6}$  fois plus faible que celle du bruit parasite provenant de l'atmosphère, du sol et des circuits du récepteur. Dans la plupart des systèmes de communication, le rapport  $S/N$  correspondant est de l'ordre de l'unité ou plus. Exploitant des signaux très faibles par comparaison aux autres services, les observations radioastronomiques sont particulièrement vulnérables au brouillage radioélectrique, et, exception faite du cas des pulsars, les signaux d'origine cosmique ne présentent généralement aucune modulation caractéristique qui permettrait de les distinguer du bruit ou des nombreuses formes de signaux brouilleurs.

S'il est possible d'exploiter des observations ayant un très faible rapport  $S/N$ , c'est parce que, contrairement au cas d'autres services radioélectriques pour lesquels l'information figure généralement dans les modifications des propriétés de transmission (c'est-à-dire la modulation), les mesures de radioastronomie correspondent généralement aux valeurs moyennes des caractéristiques du signal. Il est possible de réduire dans une large mesure les fluctuations statistiques des valeurs mesurées en calculant la moyenne, sur plusieurs secondes ou dans certains cas sur plusieurs heures, du signal de sortie du détecteur qui mesure la puissance totale du bruit dans les étages FI du récepteur. Il est aujourd'hui possible de détecter des variations relatives du niveau total de bruit qui sont de l'ordre de  $10^{-8}$  fois le niveau moyen, ce qui nécessite de calculer la moyenne d'au moins  $10^{16}$  échantillons indépendants. Un exemple de la grande sensibilité des observations radioastronomiques est la cartographie de la structure angulaire du fond diffus cosmologique par le satellite PLANCK [Planck Collaboration et autres, 2011], lequel se situe actuellement au point de Lagrange L2 du système Soleil-Terre indiqué dans la Recommandation UIT-R RA.1417. On a mesuré des fluctuations de la température de fond à 2,8 K de l'ordre de  $10^{-6}$ , soit 75 dB ou plus au-dessous de la température de bruit des récepteurs embarqués dans le satellite. La grande sensibilité de ces observations a été obtenue aux dépens de l'information sur les courtes variations temporelles des différentes caractéristiques du signal, information perdue dans le processus de sommation, mais ceci était essentiel pour réduire les fluctuations de bruit. La découverte de ces fluctuations [Smooth et autres, 1992], qui indiquent l'origine de la structure à grande échelle de l'Univers tel qu'il se présente aujourd'hui, a valu à leurs auteurs de recevoir le prix Nobel de physique 2006, quatrième prix de cette catégorie décerné pour des travaux de recherche en radioastronomie.

Indiquons à titre de repère chronologique que la méthode d'analyse des niveaux de seuil de brouillage exposée dans le présent Chapitre est tirée de l'Annexe du Rapport 224-1 de l'ex-CCIR [Oslo, 1966]. Les seuils de brouillage préjudiciable indiqués dans ce Rapport, ses révisions ou ses adjonctions sont à la base de la coordination des fréquences en radioastronomie; ils sont inclus dans l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R RA.769 et dans les Tableaux 4.1 et 4.2 du présent Chapitre.

#### 4.2 Considérations de base pour le calcul des niveaux de brouillage

##### 4.2.1 Critère de seuil de brouillage nuisible

Dans la pratique, l'accroissement de puissance à la sortie du récepteur dû à la présence d'un signal brouilleur n'est pas suffisamment stable pour pouvoir être étalonné et soustrait de la puissance mesurée. Outre les variations inhérentes à la modulation des émissions, les signaux brouilleurs qui se sont propagés sur de longues distances présentent de grandes fluctuations d'amplitude dues à des variations de l'atmosphère et à d'autres facteurs qui ont une incidence sur l'affaiblissement le long du trajet. Les signaux provenant de stations mobiles

embarquées sur des véhicules en mouvement varient au gré des modifications du trajet entre l'émetteur et le radiotélescope. Même à puissance surfacique de brouillage constante, le niveau de puissance reçue varie lorsque le déplacement du radiotélescope poursuivant la source entraîne la variation des niveaux des lobes latéraux dans la direction de l'émetteur. Aux faibles niveaux, le brouillage a pour effet d'introduire des fluctuations qu'on risque généralement de ne pas pouvoir distinguer des fluctuations dues au bruit du système ou, dans certains cas, au signal astronomique. En principe toutefois, les fluctuations en sortie du récepteur dues au brouillage ne se stabilisent pas à une valeur moyenne constante lorsqu'on accroît le temps d'intégration, contrairement à ce qu'on observe pour un bruit purement aléatoire.

Le niveau de rayonnements non désirés se traduisant par une augmentation de 10% des erreurs de mesure par rapport aux erreurs dues au bruit du système seul est le critère utilisé pour définir l'intensité au-delà de laquelle un signal brouilleur est considéré comme nuisible (préjudiciable). Dans les calculs de brouillage, on admet en pratique que ce niveau de brouillage est le même que celui qui engendre un accroissement du signal de sortie du récepteur égal à 10% de la valeur efficace des fluctuations de sortie dues au bruit du système. Considérons une mesure classique dans laquelle la puissance reçue provenant d'une radiosource est mesurée en prenant la différence entre le signal de sortie du récepteur avec l'antenne pointée vers la source et celui obtenu en décalant l'antenne de manière à mesurer le niveau du bruit de fond du ciel. Supposons que le signal brouilleur est présent pendant la mesure de la radiosource et qu'il est absent pendant la mesure de référence du bruit de fond, ou vice versa, comme cela peut se produire avec un signal de communication intermittent. Si le brouillage à la sortie du récepteur représente 10% de la valeur efficace du niveau de bruit, l'erreur totale de la mesure de la puissance de la source est alors augmentée de 10%. Cet effet peut être visualisé en accroissant de 10% la fourchette d'erreur lors de la mesure de l'intensité d'une radiosource, intensité qui peut être représentée en fonction d'un autre paramètre astronomique. Il convient également de noter qu'en l'absence de brouillage, un accroissement de 10% de la valeur efficace de l'incertitude de mesure équivaut à une diminution de 20% du temps d'observation. Des mesures utiles restent possibles dans ces conditions, même si les données sont très dégradées.

#### 4.2.2 Diagramme de sensibilité de l'antenne

En radioastronomie, on utilise en général des réseaux d'antennes ou des antennes de grande dimension à gain élevé pour obtenir la sensibilité et la résolution angulaire requises en direction du ciel. Un radiotélescope peut comprendre une seule antenne de grande dimension ou un réseau de plusieurs antennes. Avec une ouverture angulaire allant généralement de quelques secondes d'arc à quelques degrés, la probabilité pour qu'une source de brouillage se retrouve dans le lobe principal est généralement suffisamment petite pour n'avoir à considérer que le problème posé par la réception de signaux brouilleurs par les lobes latéraux. La Recommandation UIT-R SA.509 (appartenant à la série «Applications spatiales et météorologie») indique le modèle recommandé pour le calcul des lobes latéraux des antennes paraboliques de grande dimension; il est basé sur les données empiriques recueillies sur un certain nombre de grandes antennes. Il s'applique aux antennes de diamètre supérieur à 100 longueurs d'onde, pour des fréquences comprises entre 2 GHz et 30 GHz et pour des angles  $\varphi$  mesurés à partir de l'axe du lobe principal supérieurs à  $1^\circ$ . Le gain du lobe latéral varie sur une amplitude angulaire de l'ordre de  $\lambda/D$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $D$  la largeur de l'ouverture d'antenne. Le modèle pour l'enveloppe du gain ( $G$ ) des lobes latéraux est alors donné par:

$$\begin{aligned} G &= 32 - 25 \log \varphi & \text{dBi} & & \text{pour } 1^\circ < \varphi < 47,8^\circ \\ G &= -10 & \text{dBi} & & \text{pour } 47,8^\circ < \varphi < 180^\circ \end{aligned} \tag{4.1}$$

L'effet d'un signal brouilleur dépend à l'évidence de son angle d'incidence par rapport à l'axe du faisceau principal de l'antenne (l'axe de visée), puisque le gain des lobes latéraux donné par le modèle varie de +32 à -10 dBi en fonction de l'angle d'incidence considéré. Toutefois, il est utile (voir le § 4.3) de calculer les niveaux de seuil du brouillage nuisible pour une valeur particulière du gain des lobes latéraux, que nous posons égale à 0 dBi. Dans le cas du modèle de lobes latéraux de l'équation (4.1), on observe une valeur de 0 dBi (c'est-à-dire un gain égal à celui d'un émetteur isotrope) à  $19,1^\circ$  du faisceau principal. Il convient de noter que si l'on calcule le niveau de seuil de la puissance surfacique ou de la densité spectrale de puissance surfacique sur la base d'une réception avec un gain de lobe latéral de 0 dBi, le seuil de brouillage du récepteur de

radioastronomie sera dépassé en cas de réception de signaux brouilleurs dans des lobes latéraux de gain supérieur à 0 dBi, c'est-à-dire pour des valeurs de  $\varphi$  inférieures à  $19,1^\circ$ . Ainsi, en cas d'incidence d'un signal dont l'intensité est celle du niveau de seuil de brouillage et dont la direction appartient au cône de  $19,1^\circ$  de demi-angle centré sur l'axe du faisceau principal, la puissance reçue sera supérieure au critère de brouillage nuisible. L'angle solide de ce cône exprimé en radians,  $\Sigma$ , est égal à  $2\pi(1 - \cos \varphi)$ . Une mesure grossière de la probabilité de brouillage reçu dans le cône de  $19,1^\circ$  de demi-angle est donnée par le résultat de la division de  $\Sigma$  par le cône solide de  $2B$  stéradians au-dessus de l'horizon d'où peuvent provenir des signaux brouilleurs. Pour  $\varphi = 19,1^\circ$ ,  $\Sigma/2B = 5,5\%$ . Pour les antennes de conception plus récente, un modèle de lobes latéraux obéissant à la loi  $29 - 25 \log \varphi$  a été proposé (voir par exemple la Recommandation UIT-R S.580). Suivant ce modèle, la valeur de  $\varphi$  pour un gain de 0 dBi est égale à  $14,5^\circ$ ,  $\Sigma/2B$  étant alors égal à  $3,2\%$ . Un autre modèle de lobes latéraux (voir la Recommandation UIT-R S.1428) est régi par la loi  $34 - 30 \log \varphi$ , aux termes de laquelle la valeur de  $\varphi$  pour un gain de 0 dBi est égale à  $13,6^\circ$  et la valeur correspondante de  $\Sigma/2B$  vaut  $2,8\%$ . Il est spécifié dans la Recommandation UIT-R RA.1513 que la limite supérieure du pourcentage de temps cumulatif au cours duquel un niveau de brouillage supérieur au seuil de brouillage nuisible peut être toléré est égale à  $5\%$ , dont au plus  $2\%$  peuvent provenir de l'un quelconque des réseaux brouilleurs (voir le § 4.2.4). Les trois valeurs susmentionnées de  $\Sigma/2B$  ( $5,5\%$ ,  $3,2\%$  et  $2,8\%$ ) sont raisonnablement conformes à ces chiffres et semblent indiquer que le choix d'un niveau de lobes latéraux de 0 dBi est pertinent pour le calcul du niveau de puissance surfacique et du niveau de densité spectrale de puissance surfacique associés au seuil de brouillage nuisible.

Le cas particulier des satellites non OSG correspond à une situation «dynamique», puisque les positions des satellites par rapport au faisceau de l'antenne de radioastronomie varient beaucoup au cours des 2 000 s du temps d'intégration. Pour analyser les brouillages, il faut alors intégrer la réponse sur les différents niveaux des lobes latéraux, en utilisant par exemple le concept de puissance surfacique équivalente (epfd) défini dans le numéro **22.5C** du RR. En outre, il est généralement nécessaire de combiner au niveau du radiotélescope les contributions dues à un certain nombre de satellites d'un système donné. En attendant la mise à disposition d'un modèle spécifique aux antennes de radioastronomie, il est suggéré d'utiliser le diagramme applicable aux antennes de plus de  $100 \lambda$  de diamètre figurant dans la Recommandation UIT-R S.1428 (voir l'Annexe 1 du présent Chapitre) pour les calculs relatifs aux antennes de radioastronomie.

Le modèle de lobes latéraux ci-dessus s'applique aux paraboloïdes symétriques, qui souffrent d'une dispersion de rayonnement dû à la structure support du foyer. Les niveaux des lobes latéraux pour les réflecteurs à source primaire excentrée avec ouverture non masquée sont généralement de 10 à 15 dB inférieurs à ceux donnés par le modèle. Seules quelques antennes de type excentré ont été développées pour la radioastronomie. Dans le cas d'antennes de grande taille, des conceptions symétriques sont plus économiques et pourraient également être préférées pour des mesures de polarisation.

### **4.2.3 Temps de calcul de la moyenne (temps d'intégration)**

Le processus d'intégration temporelle des mesures, qui permet de réduire les fluctuations de bruit, s'effectue habituellement en deux étapes ou plus. Les données sont généralement moyennées sur quelques dizaines de millisecondes à quelques dizaines de secondes et sont ensuite enregistrées numériquement. Cette première étape réduit le volume de données, mais permet par la suite de supprimer certains éléments (brèves salves de brouillage intense par exemple) sans que cela entraîne une perte dommageable de données. Une nouvelle intégration a souvent lieu hors ligne dans le cadre d'une réduction ultérieure des données. Une observation peut consister par exemple à répéter des mesures en deux positions du ciel ou plus, afin de comparer le niveau de puissance reçu d'un signal émanant d'une radiosource (mêlé au bruit de fond du ciel) avec celui d'une position de référence en arrière-plan. Il est nécessaire de calculer séparément des moyennes pour chaque position. Les données enregistrées au cours de différentes séances d'observation peuvent être regroupées; le temps total d'intégration peut alors atteindre plusieurs dizaines ou centaines d'heures [Owen et Morrison, 2009; Walter et autres, 2012]. Sur les grands radiotélescopes, la limite est souvent imposée par le temps d'observation imparti. Un si long temps d'intégration s'impose pour détecter des signaux de puissance exceptionnellement faible, la pratique courante consistant à effectuer la moyenne à partir de nombreux enregistrements spectraux d'un même point du ciel. Dans l'étude des seuils de brouillage, des temps d'intégration de 2 000 s sont représentatifs de ce qui se fait couramment. On utilise également fréquemment des temps d'intégration plus longs, un temps de 360 000 s (100 h) pouvant être considéré comme représentatif pour des observations au sol nécessitant une

sensibilité exceptionnellement élevée. La sensibilité d'une observation variant comme la racine carrée du temps d'intégration, la différence entre 2 000 et 360 000 s correspond à une différence de sensibilité de 11,3 dB tant pour les signaux astronomiques que pour le brouillage. Il existe également certaines observations de phénomènes variables dans le temps (observations de sursauts stellaires ou solaires et de scintillations interplanétaires par exemple) auxquelles on pourra appliquer des temps d'intégration beaucoup plus courts.

#### 4.2.4 Pourcentage de temps perdu en raison du brouillage

Le brouillage est souvent de nature sporadique (lorsqu'il est causé par des signaux de communications mobiles par exemple) ou présente de fortes variations temporelles d'intensité en raison des conditions de propagation. Pour déterminer si ces signaux dégradent les observations de radioastronomie, il est nécessaire de spécifier un pourcentage maximal de temps durant lequel un brouillage nuisible peut être toléré. Ces pourcentages de temps sont indiqués pour la plupart des services dans diverses recommandations; ils varient généralement de 0,01% (pour des communications mettant en jeu la sauvegarde de la vie humaine) à plusieurs pourcents (cas des services nécessitant des collectes de données susceptibles d'être répétées). Dans le cas de la radioastronomie, une perte nette de 5% pour l'ensemble des sources est le chiffre maximal admissible. Puisqu'un grand nombre d'observations de radioastronomie risquent d'être perturbées par des brouillages causés par plusieurs sources exploitées dans des bandes de fréquences voisines, le pourcentage de perte maximal admissible dû à l'un quelconque des services est de 2% du temps.

Ces chiffres sont spécifiés dans la Recommandation UIT-R RA.1513. Ils sont essentiels pour effectuer les calculs de Monte-Carlo en vue de déterminer la façon de limiter les sources sporadiques de brouillage (voir le § 4.8).

### 4.3 Sensibilité des systèmes de radioastronomie et seuils de brouillage nuisible

#### 4.3.1 Considérations théoriques

La sensibilité d'une observation radioastronomique peut se mesurer par l'accroissement du niveau de puissance à l'entrée du récepteur entraînant une variation du signal de sortie du récepteur égale à la valeur quadratique moyenne des fluctuations de bruit. Le signal à la sortie du détecteur d'un récepteur est fonction de la puissance totale à l'entrée du récepteur, qui est la somme de la puissance du signal utile et de la puissance du bruit perturbateur (par exemple, le bruit thermique et le bruit interne du récepteur). Ces deux composantes étant dues à des phénomènes aléatoires, on ne peut pas les distinguer qualitativement. Cela étant, elles se caractérisent chacune par un niveau moyen de puissance, et si l'on arrive à déterminer ces niveaux avec une précision suffisante, on peut détecter la présence du signal utile. (On suppose que le gain et les autres paramètres du système de réception restent constants pendant l'observation.) La moyenne statistique d'une variable aléatoire stationnaire telle qu'une puissance de bruit,  $P$ , peut être déterminée avec une précision qui est inversement proportionnelle à la racine carrée du nombre d'échantillons indépendants,  $N$ , et l'écart type de cette moyenne a pour expression:

$$\Delta P \approx \frac{P}{\sqrt{N}} \quad (4.2)$$

Comme ci-dessus,  $\Delta P$  et  $P$  peuvent être définies soit en termes de puissance de bruit dans la largeur de bande du récepteur, soit en termes de densité spectrale de puissance (W/Hz). Dans la suite de l'analyse, ces grandeurs désigneront des densités spectrales de puissance. L'écart type,  $\Delta P$ , est également une moyenne quadratique. A condition d'observer un nombre suffisant d'échantillons,  $N$ , on peut mesurer la puissance du bruit radioélectrique avec une grande précision. En réduisant les fluctuations  $\Delta P$  à une valeur inférieure à la puissance du signal utile, on peut détecter des signaux très faibles. A l'intérieur d'une bande de largeur  $\Delta f$ , le récepteur peut mesurer environ  $2\Delta f$  échantillons indépendants par seconde, et en augmentant le temps d'établissement de la moyenne,  $t$ , (appelé aussi temps d'intégration), on peut rendre  $N$  très grand. On peut donc écrire:

$$N \approx 2\Delta f t \quad (4.3)$$

et en combinant cette expression avec l'équation (4.2), on obtient:



$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{K}{\sqrt{\Delta f t}} \quad (4.4)$$

où  $K$  est une constante de proportionnalité qui dépend des caractéristiques de l'équipement et de la technique d'observation [Kraus, 1966]. Pour un système de base à puissance totale (c'est-à-dire un système qui mesure la puissance de bruit totale délivrée par une antenne),  $K = 1$  et on adoptera ici cette valeur pour plus de généralité. (Il est cependant à noter que  $t$  correspond à la moitié du temps total d'observation dans le cas où le temps d'observation est partagé à égalité entre la radiosource et une position de référence selon la procédure décrite au § 4.2.1. Par ailleurs, l'erreur quadratique moyenne sur la différence entre les mesures de la radiosource et celles de la position de référence est égale à l'erreur sur la mesure de la source multipliée par  $\sqrt{2}$ .)

$\Delta P$ , qui représente la fluctuation de bruit dans la densité spectrale de puissance intervenant dans l'équation de la sensibilité (4.4), est égal au produit de la sensibilité globale du système (fluctuations de bruit) exprimée en fluctuations de température,  $\Delta T$ , par la constante de Boltzmann,  $k$ , soit:

$$\Delta P \approx k \Delta T \quad (4.5)$$

de sorte que nous pouvons écrire l'équation de la sensibilité sous la forme:

$$\Delta T = \frac{T}{\sqrt{\Delta f t}} \quad (4.6)$$

où:

$$T = T_A + T_R \quad (4.7)$$

où  $T$ , température du système, est égal à la somme de  $T_A$ , température de bruit de l'antenne résultant des émissions d'origine cosmique, de l'atmosphère terrestre et du rayonnement de la Terre, et de  $T_R$ , température de bruit interne du récepteur.

### 4.3.2 Estimation de la sensibilité et des niveaux de brouillage préjudiciable

Les équations (4.4) ou (4.6) permettent d'estimer les sensibilités et les niveaux de brouillage pour les observations radioastronomiques. Les résultats sont donnés dans les Tableaux 4.1 et 4.2; on suppose un temps d'observation (ou d'intégration)  $t$  de 2 000 s comme cela est indiqué au § 4.2.3. La sensibilité, exprimée en unités de température ou de densité spectrale de puissance, est le niveau du signal d'entrée du récepteur nécessaire pour accroître le signal de sortie d'une quantité égale à la moyenne quadratique des fluctuations de bruit. Dans le Tableau 4.1 (observation du rayonnement à spectre continu), pour des fréquences inférieures à 71 GHz, on suppose que  $\Delta f$  est la largeur de la bande attribuée à la radioastronomie. Au-dessus de cette fréquence, on utilise une valeur de 8 GHz, représentative de la largeur de bande généralement utilisée pour les observations du rayonnement à spectre continu dans cette gamme. Dans le Tableau 4.2 (observation de raies spectrales),  $\Delta f$  est la largeur de bande du canal caractéristique d'une raie spectrale. Les valeurs adoptées pour  $\Delta f$  correspondent à une vitesse d'environ 3 km/s, valeur intermédiaire entre les valeurs couramment utilisées pour les raies spectrales des radiosources situées dans notre Galaxie et les valeurs correspondant aux radiosources dans les autres galaxies. Il convient de noter que les cinq dernières lignes des Tableaux 4.1 et 4.2 correspondent à des fréquences supérieures à 275 GHz, pour lesquelles aucune attribution n'a été faite au moment de la rédaction du présent Manuel. Ces fréquences sont choisies arbitrairement et les valeurs correspondantes au seuil de brouillage nuisible ne visent qu'à fournir une première estimation.

Les niveaux de brouillage nuisible indiqués dans les Tableaux 4.1 et 4.2 sont les niveaux de brouillage qui introduisent dans la mesure de  $\Delta P$  (ou de  $\Delta T$ ) une composante égale à 10% de la moyenne quadratique des fluctuations dues au bruit du système, c'est-à-dire:

$$\Delta P_H = 0,1 \Delta P \Delta f \quad (4.8)$$

En résumé, on peut calculer les valeurs des colonnes des Tableaux 4.1 et 4.2 de la manière suivante:

- $\Delta T$ , au moyen des équations (4.6) et (4.7);
- $\Delta P$ , au moyen de l'équation (4.5);
- $\Delta P_H$ , au moyen de l'équation (4.8).

On peut également exprimer le brouillage en termes de puissance surfacique incidente au niveau de l'antenne sur la largeur de bande totale, ou en termes de densité spectrale de puissance surfacique,  $S_H$ , sur une largeur de bande de 1 Hz<sup>10</sup>. Comme indiqué au § 4.2.2, les valeurs correspondent à une antenne dont le gain, dans la direction d'arrivée de l'onde brouilleuse, est égal à celui d'une antenne isotrope (antenne dont l'aire de captation équivalente est  $c^2/4\pi f^2$ ,  $c$  étant la vitesse de la lumière et  $f$  la fréquence). On obtient les valeurs de  $S_H \Delta f$  (dB(W/m<sup>2</sup>)) à partir de  $\Delta P_H$  (dBW), en ajoutant la quantité:

$$20 \log f - 158,5 \quad \text{dB} \quad (4.9)$$

$f$  étant exprimé en Hz. Pour obtenir  $S_H$ , il suffit alors de retrancher la quantité  $10 \log \Delta f$  afin de tenir compte de la largeur de bande.  $S_H$  peut également être obtenu directement par l'équation suivante:

$$S_H = \frac{0,4 \pi k (T_A + T_R) f^2}{c^2 \sqrt{\Delta f t}} \quad (4.10)$$

Le graphique de la Figure 4.1 représente la variation, en fonction de la fréquence, des seuils  $S_H$  (dB(W/(m<sup>2</sup> · Hz)) du brouillage nuisible au SRA, les valeurs numériques étant déduites des Tableaux 4.1 et 4.2. La courbe correspondant au rayonnement à spectre continu n'est pas lisse, car les largeurs de bande attribuées diffèrent selon la fréquence.

La sensibilité d'un récepteur radioastronomique à un rayonnement à spectre large (continuum) croît avec la largeur de bande analysée (équations (4.4) et (4.6)). La raison en est la suivante: la puissance du bruit augmente avec la largeur de bande, mais comme le signal est lui aussi un bruit à spectre large, sa puissance augmente également. Le rapport de puissance  $S/N$  dans les étages RF et FI avant le détecteur reste constant quelle que soit la largeur de bande. Cependant, quand la largeur de bande augmente, la précision avec laquelle les niveaux de puissance sont déterminés croît proportionnellement à la racine carrée de la largeur de bande, ce qui améliore d'autant la sensibilité.

Les équations (4.4) et (4.6) laissent penser qu'il serait possible d'améliorer indéfiniment la sensibilité en augmentant suffisamment la largeur de bande et/ou le temps d'intégration. Mais en réalité, la sensibilité d'une observation radioastronomique est limitée en pratique par des facteurs autres que les facteurs statistiques décrits ci-dessus. La stabilité du récepteur, les fluctuations d'affaiblissement et de phase au cours de la traversée de l'atmosphère terrestre en sont des exemples. Les sensibilités indiquées dans les Tableaux 4.1 et 4.2

---

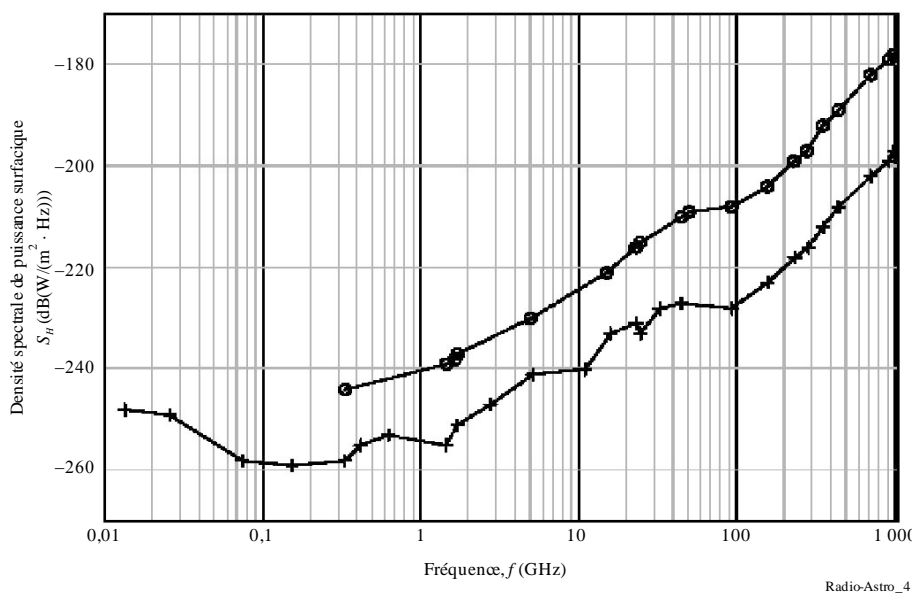
<sup>10</sup> Ici, on applique la terminologie recommandée par le Secteur des radiocommunications (Recommandation UIT-R V.574), selon laquelle la "puissance surfacique" s'applique aux grandeurs exprimées en W/m<sup>2</sup> et la "densité spectrale de puissance surfacique" s'applique aux grandeurs telles que  $S_H$ , exprimées en W/(m<sup>2</sup> · Hz). En radioastronomie,  $S_H$  est désignée par le terme "densité de flux". Elle est exprimée dans une unité appelée le Jansky (Jy):

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{Hz)}, \text{ soit } -260 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz))}.$$

correspondent à des valeurs de largeur de bande et de temps d'intégration pour lesquelles ces autres facteurs sont généralement négligeables. Mais il est important de souligner que ces valeurs de sensibilité ne correspondent pas à des limites fondamentales et qu'elles sont couramment dépassées dans les cas où les mesures peuvent être intégrées sur des périodes de plusieurs heures.

FIGURE 4.1

**Seuils de brouillage nuisible en fonction de la fréquence  
(valeurs déduites des Tableaux 4.1 et 4.2)**



Sur la Figure 4.1 sont représentées, en fonction de la fréquence, les valeurs de seuil de brouillage (densité spectrale de puissance surfacique) pour les observations du rayonnement à spectre continu (croix) et pour les observations de raies spectrales (cercles) (valeurs déduites des Tableaux 4.1 et 4.2).

Le Rapport UIT-R RA.2131 intitulé *Supplementary information on the detrimental threshold levels of interference to radio astronomy observations in Recommendation ITU-R RA.769* (informations supplémentaires concernant les seuils de brouillage préjudiciable aux observations de radioastronomie figurant dans la Recommandation UIT-R RA.769) fournit les valeurs équivalentes du champ électrique correspondant aux entrées des Tableaux 4.1 à 4.3.

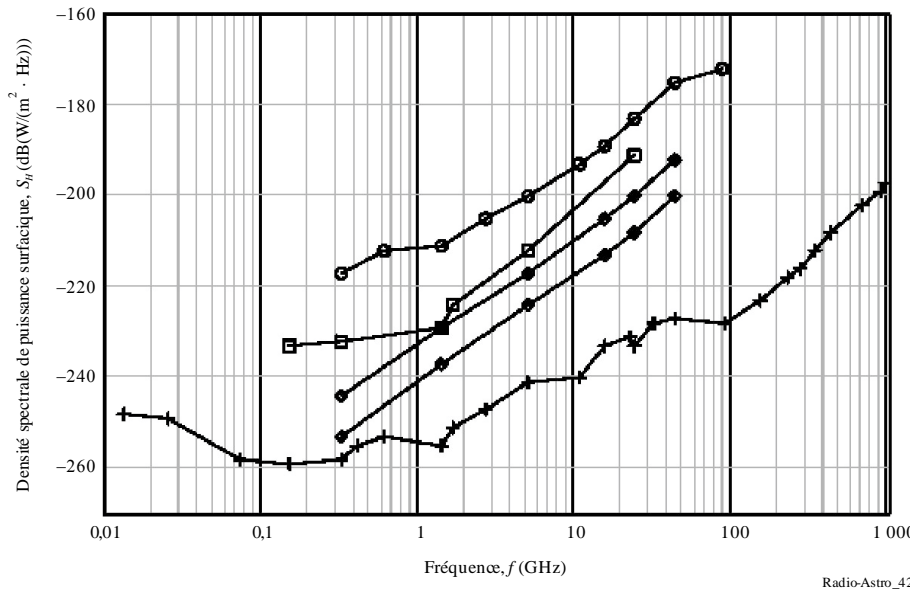
#### 4.4 Réaction des interféromètres et des réseaux d'antennes au brouillage radioélectrique

La nécessité d'obtenir une résolution angulaire élevée pour les observations radioastronomiques a conduit au développement d'interféromètres et de réseaux d'antennes, qui jouent un rôle de plus en plus important dans l'étude des sources dont les dimensions angulaires sont de quelques minutes d'arc ou moins. Les interféromètres ont une résolution angulaire type de  $\lambda/L$  radians, où  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $L$  l'écartement projeté le plus grand entre les antennes, vu depuis la radiosource. Dans ces instruments, deux phénomènes réduisent l'effet du brouillage. Ils sont liés à la fréquence d'oscillation des franges d'interférence observées lorsque les sorties de deux antennes sont combinées, et au fait que les composantes du signal brouilleur reçu par des antennes très espacées subissent des retards relatifs différents avant d'être recombinaées. Le traitement de ces effets est plus compliqué que dans le cas des antennes uniques du § 4.3. Ce sujet est abordé par [Thompson, 1982] et par [Thompson et autres, 1986 et 2001]. D'une manière générale, le résultat principal est que le temps d'intégration effectif pendant lequel le brouillage perturbe les mesures est ramené de la durée totale d'observation à la durée moyenne d'une oscillation naturelle de frange. Cette durée d'oscillation peut aller de quelques secondes pour un réseau compact où  $L \sim 1\,000 \lambda$  à moins d'une milliseconde pour des réseaux

intercontinentaux où  $L \sim 10^7 \lambda$ . Ainsi, comparé à une antenne radioastronomique unique, l'interféromètre possède une certaine immunité au brouillage, qui augmente avec la dimension du réseau exprimée en longueurs d'onde.

FIGURE 4.2

**Seuils de brouillage nuisible aux observations du rayonnement à spectre continu, pour différents types de radiotélescope**



La Figure 4.2 représente les seuils de brouillage nuisible calculés pour quelques réseaux représentatifs pour les observations du rayonnement à spectre continu. Les losanges se rapportent à la configuration VLA, la courbe inférieure à la configuration D (espacement d'antennes maximal de 1 km) et la courbe supérieure à la configuration A (espacement d'antennes maximal de 36 km). Les carrés se rapportent au réseau MERLIN et les cercles ouverts au système VLBI (Tableau 4.3). Pour le VLA de l'Observatoire national de radioastronomie du Nouveau-Mexique (Etats-Unis d'Amérique), l'espacement des antennes atteint 1 km dans la configuration D et 36 km dans la configuration A. Pour le réseau MERLIN des Laboratoires de radioastronomie de Nuffield à Jodrell Bank au Royaume-Uni, l'espacement des antennes atteint 218 km. Etant donné que les résultats dépendent de l'espacement, les deux configurations VLA et le réseau MERLIN présentent des courbes distinctes. Il a de plus été supposé que l'émetteur brouilleur est fixe par rapport à la Terre et que la puissance du signal brouilleur reçu par les lobes latéraux des antennes reste constante pendant l'observation.

TABLEAU 4.1

## Seuils de brouillage nuisible dans le cas des observations du rayonnement à spectre continu en radioastronomie

Fréquence centrale <sup>(2)</sup>  $f$ (MHz)	Largeur de bande supposée <sup>(3)</sup>  $\Delta f$ (MHz)	Température de bruit minimale de l'antenne  $T_A$ (K)	Température de bruit du récepteur  $T_R$ (K)	Sensibilité du système (fluctuations de bruit)		Seuils de brouillage <sup>(1)</sup>		
				Température	Densité spectrale de puissance	Puissance reçue à l'entrée	Puissance surfacique (pfd)	Densité spectrale de puissance surfacique (spfd)
				$\Delta T$ (mK)	$\Delta P$ (dB(W/Hz))	$\Delta P_H$ (dBW)	$S_H \Delta f$ (dB(W/m <sup>2</sup> ))	$S_H$ (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz)))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
13,385	0,05	50 000	60	5 000	-222	-185	-201	-248
25,610	0,12	15 000	60	972	-229	-188	-199	-249
73,8	1,6	750	60	14,3	-247	-195	-196	-258
151,525	2,95	150	60	2,73	-254	-199	-194	-259
325,3	6,6	40	60	0,87	-259	-201	-189	-258
408,05	3,9	25	60	0,96	-259	-203	-189	-255
611	6,0	20	60	0,73	-260	-202	-185	-253
1 413,5	27	12	10	0,095	-269	-205	-180	-255
1 665	10	12	10	0,16	-267	-207	-181	-251
2 695	10	12	10	0,16	-267	-207	-177	-247
4 995	10	12	10	0,16	-267	-207	-171	-241
10 650	100	12	10	0,049	-272	-202	-160	-240
15 375	50	15	15	0,095	-269	-202	-156	-233
22 355	290	35	30	0,085	-269	-195	-146	-231
23 800	400	15	30	0,050	-271	-195	-147	-233
31 550	500	18	65	0,083	-269	-192	-141	-228
43 000	1 000	25	65	0,064	-271	-191	-137	-227
89 000	8 000	12	30	0,011	-274	-189	-129	-228
150 000	8 000	14	30	0,011	-278	-189	-124	-223
224 000	8 000	20	43	0,016	-277	-188	-119	-218
270 000	8 000	25	50	0,019	-276	-187	-117	-216
335 000	8 000	55	64	0,030	-274	-185	-113	-212
420 000	8 000	95	80	0,044	-272	-183	-109	-208
670 000	8 000	185	130	0,079	-270	-181	-103	-202
875 000	8 000	175	170	0,086	-269	-180	-100	-199
940 000	8 000	235	180	0,104	-268	-179	-98	-197

<sup>(1)</sup> On a supposé un temps d'intégration de 2 000 s; si on utilise des temps d'intégration de 15 min, 1 h, 2 h, 5 h ou 10 h, les valeurs correspondantes dans le Tableau devront être modifiées respectivement de +1,7, -1,3, -2,8, -4,8 ou -6,3 dB. Les seuils de brouillage indiqués sont ceux qui s'appliquent à la mesure de la puissance totale reçue par une seule antenne. Des seuils moins restrictifs peuvent convenir à d'autres types de mesures, comme on l'indique dans le § 4.4. Pour les émetteurs situés sur l'orbite OSG, il est souhaitable que les seuils soient diminués de 15 dB, comme on l'explique dans le § 4.7.3.

<sup>(2)</sup> Ce Tableau ne vise pas à donner la liste complète des bandes utilisées pour les observations de radioastronomie. Il ne contient que des exemples représentatifs pris dans le spectre. Le calcul des seuils de brouillage est basé sur la fréquence centrale indiquée dans la colonne (1) bien que toutes les régions n'aient pas les mêmes attributions.

<sup>(3)</sup> Aux fréquences supérieures à 71 GHz, une valeur de 8 GHz est utilisée dans la colonne (2), ce qui est représentatif de la largeur de bande généralement utilisée pour les observations du rayonnement à spectre continu dans cette plage de fréquences.

TABLEAU 4.2

## Seuils de brouillage nuisible dans le cas des observations de raies spectrales en radioastronomie

Fréquence centrale <sup>(2)</sup>  $f$ (MHz)	Largeur de bande supposée du canal pour la raie spectrale  $\Delta f$ (kHz)	Température de bruit minimale de l'antenne  $T_A$ (K)	Température de bruit du récepteur  $T_R$ (K)	Sensibilité du système (fluctuations de bruit)		Seuils de brouillage <sup>(1)</sup>		
				Température	Densité spectrale de puissance	Puissance reçue à l'entrée	Puissance surfacique (pfd)	Densité spectrale de puissance surfacique (spfd)
				$\Delta T$ (mK)	$\Delta P$ (dB(W/Hz))	$\Delta P_H$ (dBW)	$S_H \Delta f$ (dB(W/m <sup>2</sup> ))	$S_H$ (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz)))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
327	10	40	60	22.3	-245	-215	-204	-244
1 420	20	12	10	3.48	-253	-220	-196	-239
1 612	20	12	10	3.48	-253	-220	-194	-238
1 665	20	12	10	3.48	-253	-220	-194	-237
4 830	50	12	10	2.20	-255	-218	-183	-230
14 500	150	15	15	1.73	-256	-214	-169	-221
22 200	250	35	30	2.91	-254	-210	-162	-216
23 700	250	35	30	2.91	-254	-210	-161	-215
43 000	500	25	65	2.84	-254	-207	-153	-210
48 000	500	30	65	3.00	-254	-207	-152	-209
88 600	1 000	12	30	0.94	-259	-209	-148	-208
150 000	1 000	14	30	0.98	-259	-209	-144	-204
220 000	1 000	20	43	1.41	-257	-207	-139	-199
265 000	1 000	25	50	1.68	-256	-206	-137	-197
335 000	1 000	55	64	2.66	-254	-204	-132	-192
420 000	1 000	95	80	3.91	-253	-203	-129	-189
670 000	1 000	185	130	7.04	-250	-200	-122	-182
875 000	1 000	175	170	7.71	-250	-200	-119	-179
940 000	1 000	235	180	9.28	-249	-199	-118	-178

<sup>(1)</sup> On a supposé un temps d'intégration de 2 000 s; si on utilise des temps d'intégration de 15 min, 1 h, 2 h, 5 h ou 10 h, les valeurs correspondantes dans le Tableau devront être modifiées respectivement de +1,7, -1,3, 2,8, -4,8 ou -6,3 dB. Les seuils de brouillage indiqués sont ceux qui s'appliquent à la mesure de la puissance totale reçue par une seule antenne. Des seuils moins restrictifs peuvent convenir à d'autres types de mesures, comme on l'indique dans le § 4.4. Pour les émetteurs situés sur l'orbite OSG, il est souhaitable que les seuils soient diminués de 15 dB, comme on l'explique dans le § 4.7.3.

<sup>(2)</sup> Le présent Tableau ne vise pas à donner la liste complète des bandes/raies spectrales. Il ne contient que des exemples représentatifs pris dans le spectre.

*Description des colonnes des Tableaux 4.1 et 4.2:*

Colonne

- (1) Fréquence centrale de la bande attribuée à la radioastronomie (Tableau 4.1) ou fréquence nominale de la raie spectrale (Tableau 4.2).
- (2) Largeur de bande supposée ou attribuée (Tableau 4.1) ou largeur supposée des canaux représentant les valeurs types pour l'observation de raies spectrales (Tableau 4.2).
- (3) Température de bruit minimale de l'antenne, comportant des termes dus à l'ionosphère, à l'atmosphère terrestre, au rayonnement de la Terre, au rayonnement galactique et au fond diffus cosmologique.
- (4) Température de bruit du récepteur représentative d'un système à sensibilité élevée. Pour les fréquences supérieures à 1 GHz, ces valeurs s'appliquent aux récepteurs à refroidissement cryogénique.
- (5) Sensibilité totale du système, en millikelvins, calculée par l'équation (4.6) en utilisant les températures de bruit combinées de l'antenne et du récepteur, la largeur de bande indiquée et un temps d'intégration de 2 000 s.
- (6) Comme pour (5), mais exprimée en densité spectrale de puissance de bruit à l'aide de l'équation  $\Delta P_s = k\Delta T$ , avec  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  (J/K) (constante de Boltzmann). Les valeurs de  $\Delta P_s$  sont exprimées en décibels.
- (7) Puissance à l'entrée du récepteur que l'on considère comme préjudiciable pour des observations de grande sensibilité,  $\Delta P_H$ . Le critère, examiné au § 4.2.3, se calcule à partir de l'expression  $\Delta P_H = 0,1 \Delta P \Delta f$ . Les valeurs de  $\Delta P_H$  sont exprimées en décibels.
- (8) Puissance surfacique nécessaire à l'obtention d'une puissance  $\Delta P_H$  dans un système récepteur équipé d'une antenne isotrope. Les valeurs de  $S_H \Delta f$  sont exprimées en décibels.
- (9) Densité spectrale de puissance surfacique nécessaire à l'obtention d'un niveau de puissance  $\Delta P_H$  dans la largeur de bande de réception (Tableau 4.1) ou dans un canal de raie spectrale (Tableau 4.2), avec une antenne de réception isotrope. Les valeurs de  $S_H$  sont exprimées en décibels. Pour obtenir les niveaux de puissance correspondants dans une largeur de bande de référence de 4 kHz ou 1 MHz, ajouter respectivement 36 dB ou 60 dB.

Les considérations précédentes ne s'appliquent généralement pas au cas des systèmes VLBI, dont les antennes sont très espacées et pour lesquels la probabilité d'un brouillage corrélé est donc très faible (le cas d'un satellite OSG visible simultanément par plusieurs stations VLBI pouvant constituer une exception à cette règle). Le seuil de brouillage est alors déterminé par le niveau à partir duquel le brouillage commence à altérer la corrélation mesurée entre les signaux provenant de deux antennes. On peut adopter pour ce seuil un niveau de brouillage égal à 1% de la puissance de bruit du récepteur [Thompson et autres, 1986 et 2001]. (Il est à noter que ce niveau est beaucoup plus élevé que les 10% de fluctuation de bruit après détection et intégration, comme dans le critère du système à puissance totale applicable à une antenne unique.) Les valeurs des seuils de brouillage pour les systèmes VLBI, calculées sur la base du critère de 1% de la puissance de bruit et exprimées sous forme de densités spectrales de puissance surfacique (spfd), sont égales à  $1,930 \times 10^{-23} (T_A + T_R) f^2$ ; elles sont données en décibels dans le Tableau 4.3 et représentées sur le graphique de la Figure 4.2. Les températures de système adoptées sont les mêmes que dans les Tableaux 4.1 et 4.2, un facteur de 1,4 ayant été introduit pour tenir compte des effets de quantification dans l'échantillonnage numérique intervenant dans l'enregistrement des données. Les résultats ne dépendent pas de l'écartement exact des antennes. Dans tous les cas, on suppose que le signal brouilleur est reçu dans des lobes latéraux de gain 0 dBi. A titre de comparaison, les valeurs relatives aux observations de la puissance totale (pour une seule antenne), tirées du Tableau 4.1, sont indiquées par la courbe inférieure.

TABLEAU 4.3

**Seuils de brouillage pour les observations VLBI**

Fréquence centrale (MHz)	Seuils de brouillage préjudiciable (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz)))
325,3	-217
611	-212
1 413,5	-211
2 695	-205
4 995	-200
8 400	-196
10 650	-193
15 375	-189
23 800	-183
43 000	-175
89 000	-172
150 000	-167
224 000	-162
270 000	-160

Pour mieux appréhender la vulnérabilité des systèmes VLBI au brouillage, il est à noter que la Figure 4.1 indique que les seuils de brouillage préjudiciable pour les systèmes VLBI sont de 40 dB plus élevés environ que pour les systèmes d'observation du continuum à puissance totale à la même fréquence. La zone comprise entre la courbe du VLBI et celle d'un système à puissance totale couvre l'ensemble des seuils de brouillage pour tous les types de radiotélescopes. Il faut souligner que l'utilisation d'interféromètres et de réseaux est généralement limitée à l'étude des sources discrètes de forte brillance dont les dimensions angulaires n'excèdent pas quelques minutes d'arc pour des réseaux comme le VLA ou quelques dizaines de secondes d'arc pour les réseaux VLBI. Les résultats indiqués dans les Tableaux 4.1 et 4.2 pour les mesures de puissance totale restent donc valides pour la protection générale de la radioastronomie.

#### 4.5 Pulsars

Les caractéristiques des pulsars sont décrites au Chapitre 2. On utilise généralement un système de réception de raies spectrales pour l'observation des pulsars, de telle sorte que les signaux détectés dans différents canaux de fréquences puissent être alignés dans le temps (afin de supprimer l'effet de dispersion des fréquences) puis combinés. Pour détecter les pulsars, les données sont enregistrées puis analysées en utilisant un ensemble de valeurs de dispersion et un ensemble de temps de répétition des impulsions. La correction de la dispersion a pour objet de «lisser» tout pic temporel du niveau de brouillage susceptible d'être observé, sans toutefois modifier significativement la valeur quadratique moyenne de ce brouillage. Après détermination de la dispersion et du temps de répétition, les impulsions peuvent être alignées dans le temps puis moyennées en vue d'étudier leur forme et d'améliorer la précision de mesure de l'alignement temporel. En ce qui concerne la sensibilité de ces observations vis-à-vis du brouillage nuisible, la largeur de bande à considérer est la largeur de bande totale du récepteur, alors que le temps d'intégration effectif est celui de la présence de l'impulsion. Le seuil de brouillage nuisible est donc égal à la valeur équivalente associée aux observations du rayonnement à spectre continu divisée par la racine carrée de la fraction de temps pendant laquelle l'impulsion est présente. Cette fraction de temps est le résultat de la division de la durée de l'impulsion par l'intervalle de répétition; elle peut varier de quelques pourcents à quelques dizaines de pourcents. Les seuils de brouillage nuisible associés aux observations de pulsars sont donc supérieurs de 2 à 10 dB aux valeurs équivalentes relatives aux observations du rayonnement à spectre continu figurant dans le Tableau 4.1. Les observations de pulsars sont généralement réalisées grâce à des antennes de grande dimension, qui servent également pour les observations



habituelles de la puissance totale; aucune contrainte spécifique ne doit donc compléter les spécifications générales de protection contre les brouillages applicables à ces antennes.

#### 4.6 Sensibilités obtenues

Pour les radioastronomes, la sensibilité associée au rayonnement de sources situées dans le lobe principal d'une antenne radioastronomique est encore plus importante que celle associée au rayonnement parvenant aux lobes latéraux, lesquels ont été pris en compte pour le brouillage. Ceci vaut aussi bien pour une antenne unique utilisée pour mesurer la puissance totale reçue que pour chacune des antennes d'un réseau. Soit par exemple une antenne unique de 70 m de diamètre fonctionnant à 5 GHz, et ayant une aire de captation équivalente d'environ 2 700 m<sup>2</sup> et un gain de 70 dB. La sensibilité du lobe principal en termes de puissance surfacique serait alors supérieure de 70 dB à celle correspondant au rayonnement entrant dans les lobes latéraux de niveau isotrope. La colonne 6 du Tableau 4.1 indique que la sensibilité à l'entrée du récepteur pour un signal d'intensité égale au bruit du système est de  $2 \times 10^{-27}$  W/Hz (-267 dB(W/Hz)); pour une aire de captation de 2 700 m<sup>2</sup>, la densité spectrale de puissance surfacique correspondante vaut donc:

$$2 \times 2 \times 10^{-27} / 2700 = 1,5 \times 10^{-30} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz}) \quad (4.11)$$

$$= -298,2 \quad \text{dB W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz}) \quad (4.12)$$

Le membre de gauche est multiplié par un facteur 2 car l'une quelconque des sorties d'une antenne représente la moitié de la puissance d'une onde radioélectrique à polarisation aléatoire. Cela traduit les très grandes sensibilités pratiquées en radioastronomie, supérieures de plusieurs ordres de grandeur aux sensibilités considérées comme réalistes par les autres services radioélectriques.

Le Tableau 4.4 cite des exemples d'observations très sensibles de raies et du continuum rapportés par des publications de radioastronomie. Les puissances observées sur une antenne unique sont comparées aux seuils de brouillage nuisible des Tableaux 4.1 et 4.2, et les puissances observées sur un réseau d'antennes sont comparées à des valeurs calculées ou à des valeurs relevées sur la Figure 4.2. Les mesures astronomiques relevées sont beaucoup plus faibles que les seuils de brouillage nuisible, car elles sont réalisées dans le lobe principal des antennes radioastronomiques alors que les seuils correspondent à la réception des signaux brouilleurs sur les lobes latéraux; en d'autres termes, la différence est liée au gain des antennes. Ces résultats montrent que des observations à très grande sensibilité sont effectuées dans les observatoires radioastronomiques, et confirment que les paramètres des Tableaux 4.1 et 4.2 conviennent pour les systèmes actuels.

TABLEAU 4.4

Comparaison des résultats des observations avec les seuils de brouillage

Fréquence (GHz)	Type d'instrument	Raie spectrale ou spectre continu	Densité spectrale de puissance surfacique observée (spfd) (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz)))	Seuil de brouillage préjudiciable (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz))) <sup>1</sup>	Références
1,4	Réseau	Spectre continu	-309	-255	[Owen & Morrison 2008]
5,0	Réseau	Spectre continu	-308	-222	[Fomalont et autres, 1991]
1,42	Parabole unique	Raie (hydrogène neutre)	-288	-239	[Lockman et autres, 2011]
37,3	Réseau	Raie (CO déplacé vers le rouge)	-295	-211	[Walter et autres, 2012]
93,2	Réseau	Raie (CO déplacé vers le rouge)	-289	-208	[Walter et autres, 2012]

<sup>(1)</sup> Tiré des Tableaux 4.1 et 4.2 et interpolé à partir de la Figure 4.1

On peut supposer que la sensibilité des observations radioastronomiques tant au brouillage qu'aux signaux cosmiques continuera à augmenter avec l'apparition d'équipements de réception de plus en plus sensibles. Jusqu'à des fréquences d'environ 100 MHz, la température du récepteur ne représente qu'une faible part de la température totale du système (voir le Tableau 4.1), et c'est dans la partie haute du spectre que les développements de la technologie des récepteurs imprimeront probablement leurs effets les plus marquants. Toutefois, les plus fortes améliorations de sensibilité découleront sans doute de la mise au point d'antennes et de réseaux d'antennes de taille plus grande que les instruments réalisables par le passé.

## 4.7 Réflexions sur la limitation des brouillages

### 4.7.1 Niveaux de brouillage

Les signaux brouilleurs dont la puissance est comprise entre les seuils de brouillage nuisible qui viennent d'être définis et ces valeurs augmentées de 10 dB environ sont souvent les plus dommageables pour la radioastronomie. Cela est dû au fait qu'ils sont suffisamment intenses pour introduire des erreurs dans les données, mais suffisamment faibles pour que leur présence ne soit pas facile à identifier. Un niveau de brouillage supérieur de 20 dB ou plus aux valeurs seuils se reconnaît facilement en général. Dans ce cas, les mesures sont presque toujours inexploitable pour la radioastronomie et les données contaminées doivent être écartées.

### 4.7.2 Brouillage d'origine cosmique

Un nombre restreint de radiosources d'origine cosmique sont suffisamment intenses pour brouiller les observations très sensibles. Leur densité spectrale de puissance surfacique peut excéder les seuils indiqués dans le Tableau 4.1, le cas du Soleil, source puissante d'émission, en constituant l'exemple le plus frappant. En raison du brouillage solaire, certaines observations ne peuvent être menées que la nuit. D'autres expériences sont possibles le jour, sauf pendant les périodes de forte activité solaire. Les sursauts radioélectriques solaires sont particulièrement intenses aux fréquences inférieures à 200 MHz environ. Le Soleil «calme», qui possède un large diamètre angulaire et une puissance surfacique constante, présente généralement moins de difficultés.

En dessous de 1 GHz, plusieurs autres radiosources d'origine cosmique dépassent les densités spectrales de puissance surfacique données dans le Tableau 4.1. Toutefois, elles sont localisées avec précision et se caractérisent par une intensité stable et connue, qui ne varie que lentement avec la fréquence. En principe et

en pratique, le radioastronome peut corriger leurs effets lorsqu'il effectue des observations avec le plus haut niveau de sensibilité possible. En revanche, on ne connaît généralement pas la position, la puissance surfacique et le spectre des signaux brouilleurs terrestres de faible niveau, dont les variations temporelles peuvent être importantes; c'est pourquoi il n'est généralement pas possible d'atténuer les effets de ces signaux tels qu'ils se manifestent sur les observations, à moins de supprimer les données inutilisables.

#### **4.7.3 Cas particuliers des émetteurs à bord de satellites géostationnaires**

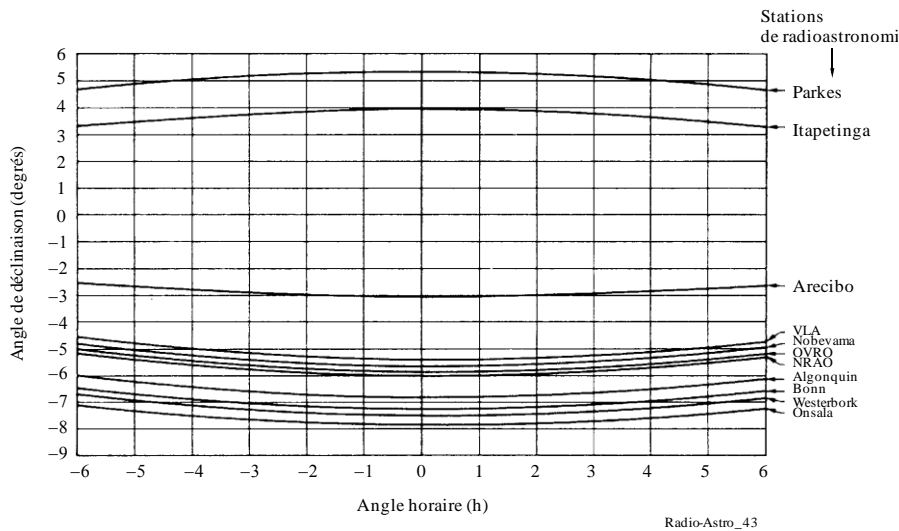
Le brouillage dû aux émissions des satellites géostationnaires est un cas particulièrement important. Il faut d'abord noter que la présence de signaux de liaisons descendantes sur la même bande de fréquences rend impossible l'observation radioastronomique. Les problèmes de brouillage dû aux satellites se rapportent donc en général à des rayonnements non désirés se produisant à l'intérieur des bandes radioastronomiques.

Les niveaux de puissance figurant dans les Tableaux 4.1 et 4.2 ayant été calculés en supposant un gain d'antenne de 0 dBi, des brouillages nuisibles se produiront lorsqu'un lobe latéral de gain supérieur à 0 dBi se trouvera pointé dans la direction d'un émetteur rayonnant aux niveaux indiqués dans ces Tableaux. Pour une antenne radioastronomique ayant des lobes latéraux égaux à ceux de l'antenne de référence définie par l'équation (4.1), le brouillage se produira si l'antenne est pointée à  $19^\circ$  ou moins dans la direction d'un satellite rayonnant à ces niveaux. Ainsi, une série de satellites semblables répartis sur l'orbite géostationnaire interdirait les observations radioastronomiques de grande sensibilité dans une bande de la voûte céleste large de  $38^\circ$  ou plus et centrée sur l'orbite géostationnaire. La perte d'une portion aussi importante de la voûte céleste pénaliserait fortement les observations radioastronomiques.

Un critère utile pour protéger la radioastronomie contre les émissions des satellites géostationnaires apparaît à l'examen de la Figure 4.3. Celle-ci représente la projection en coordonnées célestes de l'orbite géostationnaire, telle qu'elle est vue des latitudes de plusieurs grands observatoires radioastronomiques. S'il était possible de pointer un radiotélescope jusqu'à  $5^\circ$  de l'orbite sans qu'il soit soumis à un brouillage nuisible, seule une bande de ciel large de  $10^\circ$  resterait inaccessible aux observations de haute sensibilité de cet instrument. Cela constituerait cependant une perte importante pour l'observatoire considéré. Toutefois, avec un réseau de radiotélescopes répartis dans les hémisphères nord et sud et fonctionnant aux mêmes fréquences, la totalité du ciel serait accessible. On peut donc adopter la valeur de  $5^\circ$  comme l'écart angulaire minimal nécessaire entre le lobe principal d'une antenne radioastronomique et l'orbite géostationnaire.

FIGURE 4.3

**Projection de l'orbite géostationnaire sur la sphère céleste telle qu'elle est vue depuis plusieurs observatoires radioastronomiques**



Suivant l'antenne modèle donnée par l'équation (4.1), le niveau des lobes latéraux à  $5^\circ$  du lobe principal est de 15 dBi. Pour éviter qu'un radiotélescope pointé à  $5^\circ$  de l'émetteur ne subisse un brouillage nuisible, les émissions des satellites à l'intérieur des bandes attribuées à la radioastronomie doivent être réduites de 15 dB en dessous des puissances surfaciques indiquées aux Tableaux 4.1 et 4.2. Lorsque l'espacement des satellites sur l'orbite n'est que de quelques degrés, les niveaux des p.i.r.e. de chaque émission en direction d'un observatoire doivent être encore plus faibles pour satisfaire à la condition stipulant que la somme des puissances de tous les signaux brouilleurs reçus doit être inférieure de 15 dB aux seuils  $\Delta P_H$  spécifiés dans les Tableaux 4.1 et 4.2.

Il est clair qu'on peut améliorer encore la protection contre les émissions des satellites en réduisant au minimum le niveau du gain des lobes latéraux proches du lobe principal. Ce point doit bénéficier d'une attention particulière lors de la conception des futures antennes radioastronomiques.

#### 4.7.4 Filtrage

L'énergie des signaux brouilleurs extérieurs à la bande passante d'un récepteur radioastronomique est éliminée par des filtres passe bande. Plusieurs filtres peuvent être insérés à divers étages du système de réception pour s'assurer qu'en aucun point les signaux brouilleurs ne sont suffisamment intenses pour générer des non-linéarités. Une sélectivité très élevée peut être obtenue en utilisant des filtres numériques, qui doivent cependant être précédés d'un étage amplificateur suffisamment important pour permettre la numérisation des signaux. Il faut parfois que la réponse en limite de bande atteigne jusqu'à  $-100$  dB par rapport au centre de la bande; il arrive donc que la largeur du filtre définie par les fréquences de coupure à  $-3$  dB soit inférieure à la largeur totale de la bande attribuée. Comme les fréquences intermédiaires sont relativement basses (généralement comprises entre 100 MHz et 10 GHz), il est possible de construire des filtres à pente relativement raide. La pente du filtre au niveau des fréquences de coupure dépend du nombre d'éléments du filtre et de la réponse voulue. Les questions liées au filtrage seront précisées dans le Chapitre 6.

#### 4.7.5 Niveaux de brouillage susceptibles d'endommager ou de saturer un récepteur de radioastronomie

D'après le Rapport UIT-R RA.2188 intitulé *Power flux-density and e.i.r.p. levels potentially damaging to radio astronomy receivers* (puissance surfacique et niveaux de p.i.r.e. susceptibles d'endommager les récepteurs de radioastronomie), des puissances en entrée de l'ordre de 25 mW peuvent suffire à endommager ou à détruire la plupart des récepteurs de radioastronomie, tandis que des niveaux d'entrée beaucoup plus faibles peuvent être suffisants pour entraîner une saturation de leur gain. Plusieurs scénarios mettant en jeu des radars existants sont susceptibles de produire de tels niveaux en entrée des récepteurs.

- *Interaction entre lobes principaux.* Le gain élevé des antennes de radioastronomie conjugué à la forte puissance et à la faible dimension des faisceaux de divers radars d'exploration de la Terre gravitant en orbite et fonctionnant à des fréquences comprises entre 1 et 94 GHz représente une telle possibilité [SFCG Ref] pour peu que les faisceaux principaux des deux systèmes se recouvrent à un moment donné. Si, d'un point de vue statistique, une telle interaction a peu de chances de se produire, ses conséquences pour l'opérateur de radioastronomie seraient néanmoins désastreuses.
- *Interaction entre lobes principaux et lobes latéraux.* Comme l'indique la Recommandation UIT-R RA.1750 intitulée *Planification entre le service d'exploration de la Terre par satellite (active) et le service de radioastronomie dans les bandes à 94 GHz et à 130 GHz*, un récepteur de radioastronomie saturera chaque fois que l'antenne sur laquelle il est installé est directement éclairée par un radar d'exploration de la Terre de forte puissance placé en orbite, même si le signal du radar est capté par un lobe latéral à 0 dBi de l'antenne du récepteur. Inversement, le récepteur de radioastronomie saturera lorsque le faisceau principal de l'antenne associée sera éclairé par un lobe latéral à 0 dBi ou moins d'un radar gravitant en orbite, étant donné que le gain d'une telle antenne est plus élevé que le gain du radar.

Même des émetteurs assez modestes comme les radars pour véhicules fonctionnant à 76-77 GHz et 77-81 GHz décrits dans la Recommandation UIT-R M.1452 intitulée *Systèmes de radiocommunication en ondes millimétriques pour les applications des systèmes de transport intelligents* peuvent produire des niveaux de puissance susceptibles de saturer ou d'endommager une antenne de radioastronomie située à proximité, compte tenu du gain élevé et de la faible empreinte de leur faisceau ponctuel aux fréquences auxquels ils fonctionnent.

#### 4.8 Analyse de Monte-Carlo

L'analyse de Monte-Carlo est parfois utilisée pour évaluer la fraction de temps au cours de laquelle le niveau d'un signal brouilleur sera supérieur au seuil de brouillage nuisible applicable aux observations de radioastronomie. La mise en oeuvre de cette procédure est utile lorsque l'angle entre la direction de la source brouilleuse et le faisceau principal du radiotélescope varie rapidement. Cette variation peut être due au déplacement de la source de brouillage (cas d'un satellite non OSG par exemple) et/ou aux modifications du pointage du radiotélescope nécessaires aux termes du programme d'observations radioastronomiques. Le nombre de sources actives de brouillage et la distance de ces dernières au radiotélescope peuvent également varier (cas par exemple des brouillages causés par des véhicules mobiles au sol). La méthode de Monte-Carlo s'appuie sur l'analyse d'un grand nombre de configurations d'essai; pour chacune d'elles, la valeur de chaque paramètre inconnu est choisie aléatoirement parmi un ensemble de valeurs caractérisé par une représentation statistique appropriée. L'analyse de Monte-Carlo est en fait une méthode statistique faisant intervenir un certain nombre d'essais indépendants. Tous les paramètres sont choisis aléatoirement pour chaque essai sur la base de distributions de probabilité fixes et prédéterminées.

La proportion des essais pour lesquels le seuil de brouillage est dépassé donne une indication de la probabilité de brouillage en situation réelle. Toutefois, si, par exemple, il n'y a pas plus de 2% des essais qui indiquent un niveau de brouillage supérieur au seuil de brouillage nuisible, on ne peut pas affirmer avec certitude que la probabilité de brouillage n'est pas supérieure à 2%, mais on peut en déduire, avec un certain degré de certitude, une limite supérieure correspondante de probabilité de brouillage. Les équations associées à cette méthode sont brièvement présentées ci-dessous, conformément à l'analyse proposée dans [Ponsonby, 2002]. Notons que dans le cas d'un événement présentant une faible probabilité d'occurrence, l'utilisation de la méthode de Monte-Carlo n'est pas adaptée à la détermination précise de ladite probabilité, car un très grand nombre de simulations d'essai sont alors requises pour établir des statistiques significatives.

Considérons une analyse à  $N$  essais, dont  $n$  cas présentent des résultats inacceptables (c'est-à-dire un dépassement du seuil de brouillage nuisible). Soit  $p$  la probabilité que l'un quelconque des essais présente un résultat inacceptable. La valeur de  $p$  déduite des essais tend vers  $n/N$  lorsque  $N$  tend vers l'infini. Pour une valeur finie de  $N$ , la probabilité d'avoir  $n$  résultats inacceptables pour une certaine valeur de  $p$  est donnée par la distribution de Bernoulli:

$$P_p(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{(N-n)} \quad (4.12)$$

Pour interpréter le résultat d'une analyse de Monte-Carlo, nous avons besoin de connaître  $P_n(p)$ , c'est-à-dire la distribution de probabilité de  $p$  pour  $n$  résultats inacceptables parmi un nombre fini d'essais. Il s'agit du problème inverse au précédent, pour lequel la résolution de l'intégrale suivante est nécessaire aux fins de normalisation de la distribution:

$$\frac{N!}{n!(N-n)!} \int_0^1 x^n (1-x)^{(N-n)} dx = \frac{1}{N+1} \quad (4.13)$$

On trouve alors que la probabilité inverse est égale à:

$$P_n(p) = \frac{(N+1)!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{(N-n)} \quad (4.14)$$

Supposons que l'on veuille être sûr à 90% que la véritable valeur de  $p$  ne soit pas supérieure à une certaine valeur  $p_{90}$ . L'intégrale ci-après, qui fait intervenir la variable  $P_n(p)$ , doit alors être satisfaite:

$$\int_0^{p_{90}} P_n(p) dp = 0,9 \quad (4.15)$$

Si la probabilité de résultat inacceptable est de 2%,  $p_{90} = 0,02$  et l'équation (4.15) permet de trouver des valeurs de  $N$  et  $n$  telles que, connaissant le résultat de  $N$  essais, on peut affirmer avec 90% de certitude que la probabilité de résultat inacceptable de l'un quelconque des essais n'est pas supérieure à 2%. Le Tableau 4.5 indique, pour différentes valeurs de  $N$ , les valeurs de  $n$  qui ne doivent pas être dépassées pour que, avec 90% de probabilité, on puisse conclure que la probabilité d'avoir un résultat inacceptable pour l'un quelconque des essais n'est pas supérieure à 2%. Notons que lorsque  $N$  devient très grand,  $n/N$  tend vers 2%. Pour  $N = 390$  par exemple, une valeur  $n/N$  inférieure ou égale à 1% est requise pour qu'avec 90% de certitude, la probabilité de résultat inacceptable soit inférieure ou égale à 2%.

TABLEAU 4.5

**Valeurs de  $N$  et  $n$  pour que la probabilité d'obtenir un résultat inacceptable soit inférieure ou égale à 2%, avec une certitude de 90%**

$N$	$n$	$n/N$ (%)	$p_{90}$ (%)
292	1	0,52	2,0
397	4	1,01	2,0
776	10	1,29	2,0
1 900	30	1,58	2,0
10 000	181	1,81	2,0
50 000	960	1,92	2,0

## ANNEXE 1

### DU CHAPITRE 4

#### Modèle de gain des lobes latéraux tiré de la Recommandation UIT-R S.1428

Le modèle de gain des lobes latéraux tiré de la Recommandation UIT-R S.1428 et applicable à des antennes de diamètre,  $D$ , supérieures à 100 longueurs d'onde,  $\lambda$ , est le suivant:

$$\begin{array}{ll} G(\varphi) = G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \{D\varphi/\lambda\}^2 & \text{dBi pour } 0^\circ < \varphi < \varphi_m \\ G(\varphi) = G_1 & \text{pour } \varphi_m < \varphi < \varphi_r \\ G(\varphi) = 29 - 25 \log(\varphi) & \text{dBi pour } \varphi_r < \varphi < 10^\circ \\ G(\varphi) = 34 - 30 \log(\varphi) & \text{dBi pour } 10^\circ < \varphi < 34,1^\circ \\ G(\varphi) = -12 & \text{dBi pour } 34,1^\circ < \varphi < 80^\circ \\ G(\varphi) = -7 & \text{dBi pour } 80^\circ < \varphi < 120^\circ \\ G(\varphi) = -12 & \text{dBi pour } 120^\circ < \varphi < 180^\circ \end{array}$$

où:

$$\begin{array}{l} G_{max} = 10 \log\{\eta(\pi D/\lambda)^2\} \quad \text{dBi} \\ \eta: \text{rendement d'ouverture, pour } \eta = 0,7, G_{max} = 20 \log\{D/\lambda\} + 8,4 \quad \text{dBi} \\ G_1 = -1 + 15 \log\{D/\lambda\} \quad \text{dBi} \\ \varphi_m = \{20\lambda/D\}(G_{max} - G_1)^{1/2} \quad \text{degrés} \\ \varphi_r = 15,85 \{D/\lambda\}^{-0,6} \quad \text{degrés} \end{array}$$



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARNBAUM, C. and BRADLEY, R. F. [1998] A new approach to interference excision in Radio Astronomy: real-time adaptive cancellation. *Astron. J.*, Vol. 116, p. 2598-2614.
- CCIR [1966] Report 224-1. Documents of the XIth Plenary Assembly, ITU, Geneva, Vol. IV, p. 537-548.
- ELLINGSON, S. W. and CAZEMIER, W. [February 2003] Efficient multibeam synthesis with interference nulling for large arrays. *IEEE Trans. Ant. Prop.*
- FOMALONT, E. B. *et al.* [1991] The micro-jansky radio source population at 5 GHz. *Astron. J.*, Vol. 102, p. 1258-1277.
- KRAUS, J. D. [1966] *Radio Astronomy*. McGraw Hill, New York, NY, Second ed. 1986, Cygnus-Quasar Books, Powell, OH.
- LOCKMAN, F. J., FREE, N. L. and SHIELDS, J. C. [2012] The Neutral Hydrogen Bridge Between M31 and M33, *Astron. J.*, Vol. 144, p. 52 – 67.
- OWEN, F. and MORRISON, G. E., [2008] The Deep Swire Field I. 20 cm Continuum Radio Observations: A Crowded Sky, *Astron. J.*, Vol. 136, p. 1889-1900.
- PONSONBY, J. E. B. [10-14 June 2002] On 2% by Monte Carlo, Proc. of IUCAF Summer School In Spectrum Management And Frequency Coordination, NRAO, Green Bank, West Virginia.
- Planck Collaboration *et. al* [2011] Planck early results. I. The Planck Mission, *Astron. and Astrophys.*, Vol. 536, 1
- SFCG: information available at <https://www.sfcgonline.org>
- SMOOT, G. *et al.* [1992] Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *Astrophys. J. (Letters)*, Vol. 396, L1-L5.
- THOMPSON, A. R. [1982] The response of a radio-astronomy synthesis array to interfering signals, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-30, p. 450-456.
- THOMPSON, A. R., MORAN, J. M. and SWENSON, G. W. Jr. [1986 and 2001] *Interferometry and synthesis in radio astronomy*. John Wiley, New York, NY, reprinted by Krieger Press, Melbourne, FL., see Chapter 14. Second ed., John Wiley, 2001, see Chapter 15.
- WALTER, F. *et al* [2012] *Nature*, The intense starburst HDF 850.1 in a galaxy overdensity at  $z \approx 5.2$  in the Hubble Deep Field, Vol. 486, p 233-238.



## CHAPITRE 5

### Partage des bandes de radioastronomie avec les autres services

#### 5.1 Remarques d'ordre général

La radioastronomie partage la plupart des bandes qui lui sont attribuées avec des services actifs qui émettent. Un tel partage est particulièrement difficile pour la radioastronomie, qui est un service passif très sensible aux brouillages. En raison de l'éloignement considérable des sources astronomiques, les puissances surfaciques des émissions étudiées sont souvent inférieures de 100 dB ou plus à celles des signaux artificiels émis à proximité des observatoires de radioastronomie. L'intensité et les caractéristiques des signaux astronomiques, déterminées par les lois de la nature, échappent au contrôle du radioastronome. De plus, cette science étant par nature une exploration, le radioastronome est souvent incapable de connaître par avance les caractéristiques des émissions. Ces facteurs rendent la radioastronomie particulièrement vulnérable au brouillage. Le brouillage peut être préjudiciable non seulement quand il est intense et qu'il masque complètement les signaux astronomiques, mais aussi quand il est faible. Un signal brouilleur dont la puissance est située juste en dessous du niveau auquel il peut être reconnu dans les différentes mesures et qui est présent pendant une grande partie du temps total d'observation recèle un danger insidieux pour la radioastronomie. Dans ce cas, il peut n'exister aucun moyen pour détecter la présence de brouillage au cours de l'expérience, et les résultats obtenus peuvent comporter de graves erreurs.

Les observatoires de radioastronomie sont habituellement installés sur des sites spécialement choisis pour réduire au minimum le brouillage causé par les autres services. Ces sites sont généralement très éloignés des principales sources terrestres de brouillage, et, lorsque les observations ne concernent pas les longueurs d'onde millimétriques (pour lesquelles il importe de couvrir la plus grande surface possible du ciel), ils bénéficient souvent de l'effet d'écran des hauts reliefs avoisinants. Cette protection de l'observatoire, à laquelle s'ajoute celle que procure la courbure de la Terre, permet de partager des fréquences avec les émetteurs terrestres à condition que leur puissance soit faible et que l'éloignement géographique soit suffisant. Mais les systèmes utilisés en radioastronomie étant très sensibles, un grand éloignement est habituellement nécessaire. On verra au § 5.3 que le partage n'est généralement pas possible lorsque l'émetteur brouilleur se trouve en visibilité directe de l'antenne radioastronomique ou de sa source primaire. Il faut généralement que l'émetteur se situe bien au-delà de l'horizon, à des distances de 100 km ou plus. Les émetteurs installés à bord d'aéronefs, d'engins spatiaux, de stations placées sur des plates-formes à haute altitude ou de ballons peuvent demeurer en visibilité directe d'un observatoire jusqu'à de très grandes distances, réduisant à néant les avantages tant du choix réfléchi du site de l'observatoire que de l'affaiblissement dû à la courbure de la Terre. Aux fréquences des ondes décamétriques (de 3 à 30 MHz), tout signal brouilleur reçu s'est presque inmanquablement propagé à travers l'ionosphère. Dans ce cas également, le choix du site et la courbure de la Terre n'assurent aucune protection, et le signal brouilleur peut même provenir dans certains cas d'un émetteur situé n'importe où sur Terre et fonctionnant dans le même canal.

Il est utile de distinguer les problèmes de partage locaux, régionaux et mondiaux. Un problème local tel que le brouillage dû à un émetteur situé à proximité d'un observatoire de radioastronomie devra être résolu à un niveau local, en prenant en compte des facteurs tels que les effets d'écran protégeant le site. Des problèmes régionaux tels que le brouillage dû aux émetteurs de télévision doivent être traités à l'échelon régional, en tenant compte des plans nationaux d'assignation de fréquences ainsi que d'autres facteurs régionaux comme les différences de conditions et les assignations de fréquence dans des pays géographiquement proches. Les problèmes mondiaux tels que le brouillage dû à des émetteurs à bord de satellites ne peuvent être résolus qu'au niveau de l'UIT. Chaque classe de problèmes de partage nécessite un type de solution qui lui est propre.

##### 5.1.1 Critères de protection applicables au SRA

Un critère de protection important pour la radioastronomie est le niveau de puissance du brouillage considéré comme préjudiciable. Comme on l'a vu au Chapitre 4, le seuil préjudiciable dépend de la fréquence de

l'observation et du type de mesure réalisée. Il peut également être nécessaire de prendre en compte les caractéristiques détaillées du brouillage.

Un deuxième critère concerne la partie du ciel dans laquelle les observations radioastronomiques doivent être protégées. Dans le cas des sources de brouillage au sol, on adopte la valeur 0 dBi pour le gain de l'antenne radioastronomique dans la direction de la source brouilleuse ou dans la direction de l'horizon pour un émetteur éloigné. L'adoption de cette valeur signifie que les signaux brouilleurs potentiels atteignant les niveaux seuils de brouillage préjudiciable précisés dans la Recommandation UIT-R RA.769 ne causeront pas de brouillages nuisibles aux observations effectuées suivant des angles d'élévation supérieurs à 19° (selon le diagramme de rayonnement de référence donné dans la Recommandation UIT-R SA.509). Les observations effectuées au-dessous de 19° d'élévation seront brouillées si les émissions provenant de la source brouilleuse (terrestre) sont reçues par des lobes latéraux de gain supérieur à 0 dBi. Dans ce cas, une partie du ciel est effectivement impropre aux observations de radioastronomie, comme on l'explique dans l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R RA.1513. De fait, les radioastronomes sont peut-être disposés à accepter cette limitation de la couverture du ciel, puisque la plupart des objets de la voûte céleste sont observables sous un angle d'élévation plus favorable du fait de la rotation de la Terre. Cette occultation du ciel peut toutefois s'avérer très pénalisante pour l'observation de sources célestes n'apparaissant que brièvement au-dessus de l'horizon (par exemple, les observations du centre galactique à partir des latitudes nord élevées) ou lorsque la durée d'observation est un facteur critique. Dans le cas de brouillages causés par un engin spatial en orbite géostationnaire, une valeur de 12 à 15 dBi du gain d'une antenne de radioastronomie est souhaitable pour permettre des observations à moins de 5° d'un satellite en orbite géostationnaire, comme on l'a indiqué au Chapitre 4. L'application du concept d'occultation du ciel à des cas de brouillages causés par des émetteurs à bord d'aéronefs ou d'engins spatiaux en orbite non géostationnaire est décrite dans les Recommandations UIT-R S.1586 et UIT-R M.1583.

Un troisième critère à considérer est le pourcentage du temps pendant lequel un seuil de brouillage peut être dépassé sans pour autant perturber gravement le fonctionnement du service. Ce critère de pourcentage de temps et la question associée relative à l'occultation du ciel sont traités dans la Recommandation UIT-R RA.1513, qui spécifie, s'agissant des émetteurs de tous les services dans l'une quelconque des bandes de fréquences attribuées au SRA à titre primaire, une perte globale de données égale à 5%, et, s'agissant des émetteurs d'un service quelconque, une perte de données inférieure ou égale à 2%. Il convient de noter que le concept de perte globale de données n'est pas encore complètement établi et que des études complémentaires sur la répartition des brouillages entre différents réseaux et services sont nécessaires. Il est également préconisé dans la Recommandation UIT-R RA.1513 de définir le pourcentage de perte de données comme le pourcentage des périodes d'intégration de 2 000 s durant lesquelles la valeur moyenne de la densité spectrale de puissance surfacique détectée par le radiotélescope est supérieure aux valeurs définies dans la Recommandation UIT-R RA.769 (en supposant un gain d'antenne de 0 dBi). L'effet des brouillages périodiques sur des échelles de temps ne dépassant pas les quelques secondes nécessite des études complémentaires.

Il faut souligner que pour certains types d'observation, un taux d'échec de 5% dû au brouillage impose de graves limitations au radioastronome. Pour certaines observations (comète, occultation par la Lune ou explosion d'une supernova par exemple), une forte probabilité de réussite est souhaitable du fait de la difficulté ou de l'impossibilité de les répéter. D'autres types d'observation font intervenir des mesures simultanées à différentes longueurs d'onde depuis plusieurs sites, le succès d'ensemble étant conditionné par la réussite en chaque site. C'est par exemple le cas de l'étude coordonnée multifréquences d'une nova en explosion. Une telle expérience serait gravement compromise si le brouillage rendait inutilisables les observations réalisées dans l'un quelconque des observatoires. Quand un observatoire éprouve des difficultés de ce type, des dispositions doivent être prises à l'échelon national pour certaines fréquences et à certaines périodes.

Un autre effet de propagation à considérer est la réflexion du signal brouilleur. Les réflexions par les aéronefs sont probablement à l'origine de brouillage dans les bandes partagées même lorsque l'émetteur terrestre est éloigné. Le brouillage par réflexion sur un satellite en orbite basse est également possible. Un corps réfléchissant unique n'engendrera que des perturbations de courte durée, et le problème du brouillage dépendra de la densité de l'air ou du trafic spatial. Mais un problème est posé par le grand nombre d'objets métalliques satellisés du fait des activités spatiales. Pour certains types de mesures radioastronomiques dans les bandes partagées, même la réflexion des émissions terrestres par la Lune peut engendrer un brouillage important.

Les critères de protection considérés jusqu'ici – puissance seuil de brouillage, portion de ciel à protéger et fenêtre de temps d'observation à préserver – ont tous directement trait au partage géographique, c'est-à-dire à l'espacement géographique de deux services pour qu'ils puissent l'un et l'autre travailler au même moment sur la même fréquence. Dans le partage entre certains services, une protection supplémentaire peut être conférée par l'utilisation de polarisations orthogonales. Cette technique de protection n'est cependant pas applicable en radioastronomie, car de nombreuses observations s'attachent précisément aux deux polarisations et aussi parce que le signal brouilleur parvient généralement au système radioastronomique par les lobes latéraux éloignés de l'antenne à gain élevé, lobes latéraux dont les caractéristiques de polarisation diffèrent beaucoup de celles du lobe principal.

Il convient de noter que, sauf rares exceptions, le partage avec le SRA n'est possible que sous réserve d'une séparation géographique conséquente. Un partage dans le temps limité pour permettre de réaliser des observations particulières à partir d'un site de radioastronomie est sans doute possible et peut-être même indispensable dans certaines circonstances, comme on le verra au § 5.9. Un tel partage peut notamment être utile dans les bandes qui ne sont pas attribuées à la radioastronomie.

## 5.2 Distances de séparation nécessaires pour le partage avec un seul émetteur (voir la Recommandation UIT-R RA.1031)

Pour que le partage géographique soit efficace, il faut que l'émetteur brouilleur et le récepteur brouillé soient séparés par une distance suffisante pour que le brouillage ne soit plus préjudiciable. En appliquant les critères établis au Chapitre 4, l'affaiblissement sur cette distance doit être suffisant pour ramener le niveau du signal brouilleur en dessous du seuil correspondant indiqué dans la Recommandation UIT-R RA.769 pendant  $(100 - p)\%$  du temps. L'Appendice 7 du Règlement des radiocommunications définit l'affaiblissement de transmission,  $L_b(p)$ . La formule en question, à laquelle on a ajouté un terme d'affaiblissement atmosphérique,  $A$ , est donnée ci-dessous:

$$L_b(p) = P_t + G_t + G_r - P_r(p) - A \quad (5.1)$$

où:

- $L_b(p)$ : affaiblissement de transmission de référence minimal admissible (dB) pendant  $p\%$  du temps; l'affaiblissement de transmission effectif doit dépasser cette valeur pendant  $(100 - p)\%$  du temps
- $P_t$ : puissance d'émission (dBW) dans la largeur de bande de référence, mesurée à l'entrée de l'antenne
- $G_t$ : gain (dBi) de l'antenne d'émission en direction de l'antenne de radioastronomie
- $G_r$ : gain (dBi) de l'antenne de radioastronomie dans la direction de l'émetteur
- $P_r(p)$ : puissance de brouillage admissible maximale (dBW) dans la largeur de bande de référence, qui ne doit pas être dépassée plus de  $p\%$  du temps à l'entrée du récepteur

$A$ : facteur d'affaiblissement additionnel dû à l'absorption atmosphérique.

En utilisant le critère de protection du Chapitre 4,  $G_r = 0$  dBi et l'équation (5.1) prend la forme:

$$L_b(p) = P_t + G_t - P_r(p) - A \quad (5.2)$$

où  $P_r$  est repris de la colonne 7 du Tableau 4.1 ou du Tableau 4.2 du Chapitre 4.  $L_b(p)$  doit être calculé en utilisant un modèle approprié, par exemple celui de l'ensemble complet de procédures donné dans les Recommandations UIT-R P.452, UIT-R P.526 et UIT-R P.617.

L'affaiblissement atmosphérique augmente rapidement avec l'humidité et la fréquence d'observation. Au-dessous de 15 GHz, l'affaiblissement atmosphérique dans la direction du zénith est souvent faible ( $< 0,1$  dB), et peut être négligé dans l'équation (5.2). Entre 15 et 115 GHz, sur les sites secs élevés, l'opacité dans la direction du zénith est modeste ( $< 1$  dB) et n'assure qu'une faible protection contre les brouillages. Au-dessus de 115 GHz, l'opacité atmosphérique varie rapidement autour de la fréquence de résonance des molécules de l'atmosphère et offre une protection significative contre les brouillages (voir le § 5.7).

Dans le cas de la transmission en visibilité directe, l'affaiblissement de transmission en espace libre ne varie généralement pas et le critère de pourcentage de temps ne s'applique pas. Dans ce cas,  $L_b$  a une forme analytique simple et l'équation (5.2) peut s'écrire:

$$20 \log(4\pi d) - 20 \log(\lambda) = P_t + G_t - P_r - A \quad (5.3)$$

où  $d$  est la distance (m) entre l'émetteur et le récepteur et  $\lambda$  la longueur d'onde (m).

Dans l'analyse ci-dessus,  $P_t$  est la puissance émise dans la bande de largeur  $B_r$  du récepteur de radioastronomie. Si la puissance de l'émetteur  $P_T$  est répartie sur une bande de largeur  $B_i > B_r$ , on a:

$$P_t = P_T - 10 \log(B_i/B_r) + A \quad (5.4)$$

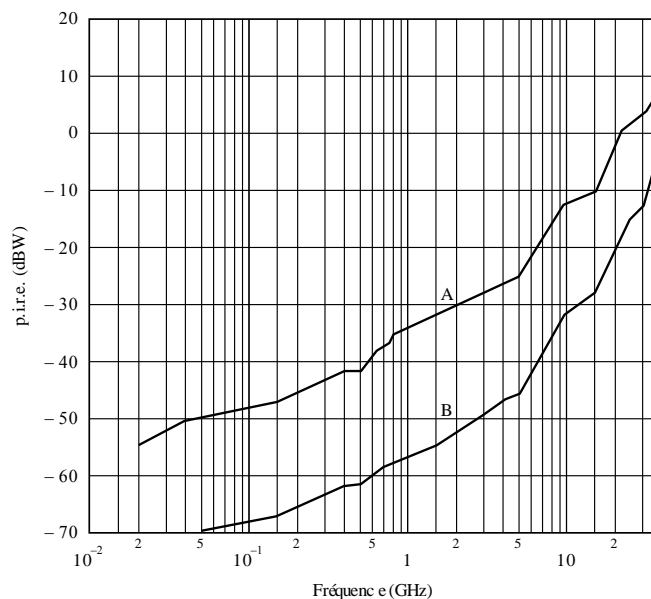
en supposant que la densité spectrale de puissance de l'émetteur est uniforme.

### 5.3 Partage dans le cas de la visibilité directe

Il est rarement possible que le SRA utilise en partage de façon satisfaisante, avec tout autre service dont les émetteurs sont en visibilité directe de l'observatoire, la partie du spectre qui lui a été attribuée. Cette constatation est illustrée par la Figure 5.1. A partir des équations (5.3) et (5.4), on a calculé, pour deux distances de séparation, la p.i.r.e. maximale qui ne causerait pas de brouillage préjudiciable au SRA. La distance de 600 km, qui correspond à un émetteur aéroporté situé sur l'horizon à une altitude de 20 km, est représentative d'un émetteur terrestre éloigné en visibilité directe. La seconde distance, qui est celle de l'orbite géostationnaire, est représentative de la distance maximale de la plupart des émetteurs spatioportés, à l'exception de ceux qui sont placés sur des engins en mission dans l'espace lointain. Les seuils de brouillage indiqués dans le Tableau 1 de la Recommandation UIT-R RA.769 sont utilisés dans le cas de l'émetteur terrestre. Comme cela a été indiqué au § 4.7.3, l'application d'une marge de protection supplémentaire de 12 à 15 dB est souhaitable dans le cas des émetteurs en orbite géostationnaire afin de pouvoir effectuer des observations jusqu'à une distance angulaire de 5° du satellite. Les courbes correspondent à un temps clair et sec. Aux fréquences supérieures à environ 50 GHz, l'absorption atmosphérique peut être de plusieurs dixièmes de décibel par kilomètre (suivant la concentration en vapeur d'eau) et le partage avec des émetteurs distants de faible puissance en visibilité directe peut être possible dans certaines circonstances.

FIGURE 5.1

**p.i.r.e. en fonction de la fréquence**



Note – On représente sur la Figure 5.1 la valeur de p.i.r.e. au-dessus de laquelle le partage entre le SRA et un service actif utilisant des émetteurs en visibilité directe de l'observatoire considéré n'est pas possible. On suppose que la bande passante du récepteur de radioastronomie est égale à celle de la bande de fréquences attribuée au SRA et que la p.i.r.e. correspond à la puissance isotrope équivalente rayonnée dans cette bande. La courbe A représente les résultats pour un émetteur en orbite géostationnaire. La courbe B correspond à un émetteur terrestre en visibilité directe situé à une distance de 600 km.

RadioAstrm 51

Il ressort clairement de la Figure 5.1 que le partage avec un émetteur terrestre en visibilité directe n'est probablement pas possible aux fréquences inférieures à 10 GHz par suite de la limitation sévère que le partage imposerait à la p.i.r.e. de l'émetteur. Même pour les fréquences allant jusqu'à 40 GHz, le partage ne sera possible que si la puissance de l'émetteur ne dépasse pas quelques milliwatts, ou si l'antenne de l'émetteur assure une discrimination élevée dans la direction de l'observatoire. Pour les émetteurs spatioportés qui ne sont pas dans l'espace lointain et dont la puissance type dépasse 1 W, le partage sera impossible même en dehors de la zone de couverture de l'antenne de bord de l'engin spatial, pour les fréquences allant jusqu'à 20 GHz environ. Entre 20 et 50 GHz, le partage ne sera vraisemblablement pas possible dans la zone de couverture de l'antenne spatioportée. Pour les émetteurs des engins spatiaux volant à moins de 6 400 km d'altitude, il faudrait que la p.i.r.e. reste comprise entre les courbes A et B pour que le partage soit possible.

Un cas particulier de partage avec les engins spatiaux en mission dans l'espace lointain est décrit au § 5.8.

#### 5.4 Partage avec les services utilisant des émetteurs de Terre

L'établissement de zones de coordination autour des sites de radioastronomie est une méthode pour éviter le brouillage nuisible des radiotélescopes par des émetteurs terrestres d'autres services partageant une bande attribuée à la radioastronomie. Au vu de l'analyse qui précède, il est clair que le partage ne sera possible qu'avec les services dont les émetteurs sont situés au-delà de l'horizon. Le critère de base utilisé pour définir une zone de coordination est que le brouillage total parvenant de tous les utilisateurs situés hors de la zone ne doit pas dépasser le seuil préjudiciable mesuré sur le site de radioastronomie. L'étendue de la zone de coordination dépend donc de plusieurs facteurs. Les types de mesures réalisées sur les sites de radioastronomie déterminent les seuils de brouillage correspondants donnés dans la Recommandation UIT-R RA.769. Le nombre et la répartition des utilisateurs situés hors de la zone, la p.i.r.e. des émissions des utilisateurs en direction du site de radioastronomie, la fraction de temps pendant laquelle ils émettent et les caractéristiques de propagation déterminent la puissance surfacique de brouillage au niveau du site. Les caractéristiques de propagation

dépendent de facteurs tels que le profil du terrain, la présence d'arbres et les conditions atmosphériques. Le paragraphe 5.2 présente des modèles de propagation appropriés.

En raison des nombreux facteurs qui interviennent, les zones de coordination doivent être délimitées individuellement pour chaque site de radioastronomie pour lequel une telle zone s'impose, toutes les caractéristiques particulières des mesures radioastronomiques et du service actif qui partage la bande étant dûment prises en compte. Il faut bien réaliser que l'étendue de la zone de coordination sera probablement d'au moins 100 km. Pour de nombreux petits pays, cette zone peut s'étendre au-delà des frontières nationales et couvrir des pays dans lesquels les attributions de fréquences sont différentes. On peut donc être amené à appliquer des conditions particulières lors de la définition d'une zone de coordination protégeant la radioastronomie dans un petit pays.

La zone de coordination définit une région autour de l'observatoire de radioastronomie en dehors de laquelle les utilisateurs des services actifs peuvent émettre librement sans causer de brouillage aux observations radioastronomiques. Pour les utilisateurs situés à l'intérieur de la zone de coordination, il faut trouver des moyens techniques pour éviter que le SRA ne soit perturbé par un brouillage nuisible. Cela pourrait par exemple se traduire par un choix méticuleux du site d'un émetteur fixe afin de profiter des effets d'écran naturels, ou par l'utilisation d'une antenne d'émission conçue de telle sorte que son gain soit nul en direction de l'observatoire. Dans d'autres situations, la seule solution technique serait d'éviter toute émission dans la bande radioastronomique à l'intérieur de la zone de coordination.

## **5.5 Partage avec les services mobiles**

Des zones de coordination peuvent en principe être également constituées pour protéger les sites de radioastronomie contre les émetteurs mobiles. Mais alors, l'utilisateur d'un émetteur mobile doit disposer d'un moyen lui permettant de déterminer le moment où il pénètre dans une zone de coordination, et d'un moyen lui permettant de réduire le brouillage reçu par l'observatoire de radioastronomie à un niveau inférieur au seuil de brouillage préjudiciable. La Recommandation UIT-R M.1316 définit les principes et une méthode de partage entre le SMS (Terre vers espace) et le SRA dans les bandes 1 610,6-1 613,8 MHz et 1 660-1 660,5 MHz, sur la base d'une méthode de simulation de Monte-Carlo. Celle-ci introduit, outre une zone de coordination, une zone d'exclusion interne dans laquelle aucun mobile ne peut transmettre, ainsi qu'une zone de restriction intermédiaire dans laquelle l'exploitation des systèmes mobiles peut faire l'objet de certaines restrictions. Toutefois, la validité de la méthode de Monte-Carlo en tant que moyen de protection efficace de la radioastronomie reste à démontrer dans la pratique.

Dans le cas d'émetteurs mobiles à bord d'aéronefs, il faudrait une zone de coordination bien plus grande que pour les émetteurs au sol. Comme on l'a vu au § 5.3, les aéronefs peuvent rester en visibilité directe d'un observatoire de radioastronomie à des distances considérables, et il y a toutes les chances pour que le partage soit très difficile. Des zones de coordination de plusieurs centaines de kilomètres seront généralement nécessaires, à moins que le site de radioastronomie ne soit exceptionnellement bien protégé par des reliefs élevés sur tout son horizon.

## **5.6 Partage dans les bandes attribuées à la radioastronomie au-dessous de 40 GHz**

On trouvera dans le Tableau 5.1 le résultat des calculs de partage qui ont été effectués dans les bandes utilisées en partage par le SRA et d'autres services au-dessous de 40 GHz (source: Rapport 696-2 de l'ex-CCIR). Ce tableau montre qu'il existe un large éventail de scénarios de partage applicables au SRA et que de grandes distances de séparation sont nécessaires. Pour la plupart des bandes, on a calculé une distance de séparation nécessaire au partage entre un émetteur fictif et un radiotélescope selon les méthodes exposées plus haut. La distance de séparation qui assure l'affaiblissement de transmission de base nécessaire dépend du mécanisme de propagation. Jusqu'à 38 MHz, les effets ionosphériques dominent. A des fréquences plus élevées, la diffusion troposphérique est la principale source du brouillage survenant pendant 10% du temps. Les distances de séparation pour les fréquences allant de 74 MHz à 408 MHz ont été calculées sans tirer parti des modèles les plus récents (Recommandations UIT-R P.452, UIT-R P.526 et UIT-R P.617). On estime que les affaiblissements de propagation peuvent comporter un biais de 10 dB environ, sur une valeur type d'affaiblissement de transmission de base total de 220 dB. Ce biais se traduit par une erreur type de 50 à 100 km sur les distances de séparation, par rapport aux résultats obtenus avec les derniers modèles de propagation. Les distances de séparation pour les fréquences au-dessus de 408 MHz ont été calculées sur la base de la



Recommandation UIT-R P.452-5. On a toujours supposé que la hauteur de l'antenne de radioastronomie était de 25 m. Les résultats ne dépendent pas fortement de cette dernière hypothèse. Ils sont donnés dans deux cas, le premier pour un site dont la ligne d'horizon a un angle d'élévation de  $1^\circ$ , et le deuxième pour un site bien protégé dont la ligne d'horizon correspond à un angle d'élévation de  $4^\circ$ . Certaines bandes de fréquences particulières sont analysées plus en détail ci-dessous.

TABLEAU 5.1

Paramètres de partage et distances de séparation (Rapport 696-2 de l'ex-CCIR (1990))

Fréquence (MHz)	Paramètres supposés de l'émetteur brouilleur						Paramètres supposés du radiotélescope			Affaiblissement de transmission nécessaire	Distance de séparation	
	Service	$P_t$ (dBW)	$G_t$ (dBi)	p.i.r.e. (dBW)	$B_t$ (MHz)	n°	Cont/Raie	$P_r$ (dBW)	$B_r$ (MHz)		L (dB)	$d(1^\circ)$ (km)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
13	F			10	0,01	1	Cont	-185	0,05	195	>4 000	>4 000
25	F			10	0,01	1	Cont	-188	0,12	198	>4 000	>4 000
38	F	13	3	16	0,02	5	Cont	-190	0,50	213	930	700
74	F	15	10	25	0,03	7	Cont	-195	1,6	228	990	780
150	M	14	0	14	0,03	10	Cont	-199	2,95	223	820	600
327	M	14	0	14	0,03	15	Cont	-201	6,60	227	730	550
408	M	14	4	18	0,025	12	Cont	-203	3,9	232	760	560
610	B			40	6,0	1	Cont	-202	6,0	242	685	345
1 365	R	27	0	27	0,50	1	Cont	-205	27,0	232	440	155
	R	27	0	27	0,50	1	Raie	-220	0,02	233	450	160
1 665	F	7	38	45	3,5	1	Raie	-220	0,02	243	525	220
	F	7	0	7	3,5	1	Raie	-220	0,02	205	155	<100
	SMTS(T-S)	-	-	0	0,004	1	Raie	-220	0,02	220	290	<100
	F	7	38	45	3,5	2	Cont	-207	10,0	252	630	305
	F	7	0	7	3,5	2	Cont	-207	10,0	214	230	<100
2 700	F	10	0	10	10	1	Cont	-207	10,0	217	215	<100
4 830	F	10	44	54	40	1	Cont	-218	0,05	243	410	135
	F	10	0	10	40	1	Cont	-218	0,05	199	<100	<100
5 000	F	10	44	54	40	1	Cont	-207	10,0	255	540	230
	F	10	0	10	40	1	Cont	-207	10,0	211	125	<100
10 600	F	7	44	51	100	1	Cont	-202	100	253	430	155
	F	7	0	7	100	1	Cont	-202	100	209	<100	<100
14 500	F	27	0	27	50	1	Raie	-214	0,15	216	<100	<100
22 200	SFS(T-S)	-7	45	38	50	1	Raie	-210	0,25	224	<100	<100
31 000	F	-10	45	35	100	2	Cont	-192	500	227	<100	<100
	F											

- (1) Fréquence de la bande attribuée à la radioastronomie.
- (2) Service auquel appartient l'émetteur (F: fixe, M: mobile, B: radiodiffusion, R: radiolocalisation, SFS(T-S): service fixe par satellite dans le sens Terre vers espace, SMTS(T-S): service mobile terrestre par satellite dans le sens Terre vers espace).
- (3) Puissance de l'émetteur (dB par rapport à 1 W).
- (4) Gain de l'émetteur dans la direction de l'observatoire de radioastronomie.
- (5) p.i.r.e. de l'émetteur dans la direction de l'observatoire de radioastronomie.
- (6) Largeur de bande des émissions d'un seul et même émetteur.
- (7) Nombre d'émetteurs supposés émettre simultanément dans la bande attribuée à la radioastronomie.
- (8) Type d'observation radioastronomique (Cont: observations du rayonnement à spectre continu et Raie: observations d'une raie spectrale).
- (9) Seuil de brouillage nuisible, repris de la colonne 7 des Tableaux 4.1 et 4.2 du Chapitre 4 respectivement pour l'observation du rayonnement à spectre continu et celle de raies spectrales.
- (10) Largeur de bande attribuée à la radioastronomie utilisée dans les calculs.
- (11) Affaiblissement de transmission nécessaire calculé à partir des équations (5.2) et (5.4).
- (12) Distance de séparation requise pour éviter un brouillage préjudiciable à des observations de radioastronomie dans le cas d'un observatoire dont la ligne d'horizon correspond à un angle d'élévation de 1°.
- (13) Distance de séparation requise pour éviter un brouillage préjudiciable à des observations de radioastronomie dans le cas d'un observatoire dont la ligne d'horizon correspond à un angle d'élévation de 4°.

### 5.6.1 Bande 1 330-1 427 MHz

La région du spectre fréquentiel au voisinage de la raie à 21 cm de l'hydrogène est d'une importance primordiale pour la radioastronomie. Cette importance a été reconnue par l'attribution à la radioastronomie, dans le monde

entier, de la bande 1 400-1 427 MHz exclusivement réservée à des services passifs en vue de l'observation des raies spectrales et du rayonnement à spectre continu. Au cours des années, l'observation de la raie spectrale de l'hydrogène, déplacée par effet Doppler vers des fréquences plus basses, a pris de l'importance. Ce déplacement vers les basses fréquences résulte des vitesses d'éloignement élevées des galaxies lointaines par rapport à notre Galaxie. L'importance de ces observations a été reconnue dans le numéro **5.149** du Règlement des radiocommunications, qui accorde une certaine protection à la radioastronomie dans une bande située au-dessous de 1 400 MHz. Dans cette bande, la radiolocalisation bénéficie d'une attribution à titre primaire dans les Régions 2 et 3, et elle partage ce même type d'attribution avec le service fixe et le service mobile dans la Région 1.

Un système type de radiolocalisation utilisé à des fins aéronautiques dans cette bande comportera un radar au sol de 500 kW de puissance de crête avec un gain d'antenne de 34 dBi. Si la plage dynamique du récepteur de radioastronomie suffit à couvrir les crêtes de puissance du radar, le paramètre important en matière de brouillage est la puissance moyenne parvenant au récepteur de radioastronomie au cours du temps d'intégration. Dans le cas d'un radar à 360° de balayage, la p.i.r.e. moyenne en direction de l'observatoire de radioastronomie est du même ordre que la puissance moyenne de l'émetteur. La puissance effective ainsi émise est fonction du diagramme de rayonnement de l'antenne radar et de la nature du balayage. En supposant que le rapport cyclique du radar vaut 0,001, la puissance moyenne est égale à 500 W. Pour l'observation d'une raie spectrale, et en se rapportant au Tableau 2 de la Recommandation UIT-R RA.769, le seuil de brouillage préjudiciable est de -220 dBW dans une bande de 20 kHz. La puissance de sortie du radar, égale à 500 W, est supposée être uniformément distribuée sur 0,5 MHz (impulsion de 2 µs). Cela ramène la puissance dans une seule voie du récepteur de radioastronomie à une valeur de  $10 \log(500/20) = 14$  dB. L'affaiblissement de la transmission de base requis est alors de 233 dB, ce qui impose des distances de séparation de 450 et 160 km pour des angles d'élévation de l'horizon valant respectivement 1° et 4° (voir le Tableau 5.1). Il faut noter que la puissance de crête à l'entrée du récepteur est de -142 dBW quand le brouillage moyen correspond exactement au seuil du brouillage nuisible. Ce niveau est supérieur d'environ 15 dB à la puissance du bruit du récepteur dans une bande de 0,5 MHz, et des effets de non-linéarité risquent de fausser l'analyse en termes de puissance moyenne, surtout si plusieurs signaux radar sont présents dans la bande passante à l'entrée du récepteur.

### **5.6.2 Bande 4 800-5 000 MHz**

La bande 4 800-4 990 MHz est attribuée à titre secondaire à la radioastronomie et à titre primaire au service fixe et au service mobile. Toutefois, le numéro **5.149** du Règlement des radiocommunications particularise le traitement des bandes 4 825-4 835 MHz et 4 950-4 990 MHz. La première de ces bandes sert à observer la raie spectrale du formaldéhyde.

La bande 4 990-5 000 MHz est attribuée en partage à titre primaire avec égalité des droits à la radioastronomie, au service fixe et au service mobile (sauf mobile aéronautique). Les applications du service fixe dans cette bande sont soit des systèmes à faisceaux hertziens de faible puissance, soit des systèmes transhorizon à diffusion troposphérique. En raison de la puissance moyenne très élevée de ce dernier type de systèmes, le partage avec la radioastronomie est très difficile. Le problème de partage est plus facile avec des faisceaux hertziens ayant, par exemple, une puissance d'émission de 10 W sur une largeur de bande RF de 40 MHz et un gain d'antenne de 44 dBi. Les résultats sont donnés dans le Tableau 5.1 pour deux configurations de faisceaux hertziens, une suivant laquelle une antenne est pointée directement vers l'observatoire de radioastronomie et l'autre suivant laquelle elle pointe dans une autre direction (gain de 0 dBi dans la direction de l'observatoire).

### **5.6.3 Bandes 22,01-22,21 GHz et 22,21-22,5 GHz**

Dans la première de ces deux bandes, la radioastronomie ne bénéficie d'aucune attribution, mais les administrations sont instamment invitées à protéger les observations radioastronomiques. Dans la seconde bande, la radioastronomie bénéficie d'une attribution à titre primaire. Les deux bandes sont partagées avec le service fixe et le service mobile (sauf mobile aéronautique). La bande contient une importante raie spectrale de vapeur d'eau à 22,235 GHz, et c'est du partage avec les observations de raies spectrales dont il est question ici. Cette raie spectrale de l'eau peut produire une puissante émission maser («mégamaser») provenant du voisinage d'un trou noir massif situé dans le centre d'une galaxie active, et peut être détectée à des fréquences très différentes de la fréquence intrinsèque en raison d'effets Doppler importants [Greenhill et autres, 2003].

Les résultats sont présentés dans le Tableau 5.1 pour le cas d'une antenne d'un service fixe pointée en direction de l'observatoire de radioastronomie.

## **5.7 Partage des bandes de la radioastronomie au-dessus de 40 GHz**

Le SRA bénéficie d'un certain nombre d'attributions au-delà de 40 GHz pour l'observation du rayonnement à spectre continu et des raies spectrales. Certaines de ces attributions sont partagées avec divers services actifs. Jusqu'à maintenant, les systèmes actifs fonctionnant au-dessus de 40 GHz étaient assez rares et la radioastronomie ne connaissait par conséquent que peu de problèmes de brouillage. Cette situation évolue à présent et des études de partage sont en cours concernant plusieurs bandes de fréquences, y compris la bande 42,5-43,5 GHz qui est utilisée en partage par le SRA, le service fixe, le SFS (Terre vers espace) et le service mobile (sauf aéronautique). Les applications du service fixe comprennent les applications à haute densité du service fixe (voir le numéro **5.547** du Règlement des radiocommunications). Par rapport aux fréquences plus basses, le partage avec les services actifs au-delà de 40 GHz sera facilité par divers facteurs. Premièrement, il est facile d'atteindre une directivité élevée en émission à ces fréquences avec des antennes de dimensions modestes; deuxièmement, l'affaiblissement atmosphérique est plus élevé à ces fréquences, et troisièmement, la diffusion des signaux par la troposphère diminue d'intensité à mesure que la fréquence augmente.

### **5.7.1 Partage entre 60 et 275 GHz**

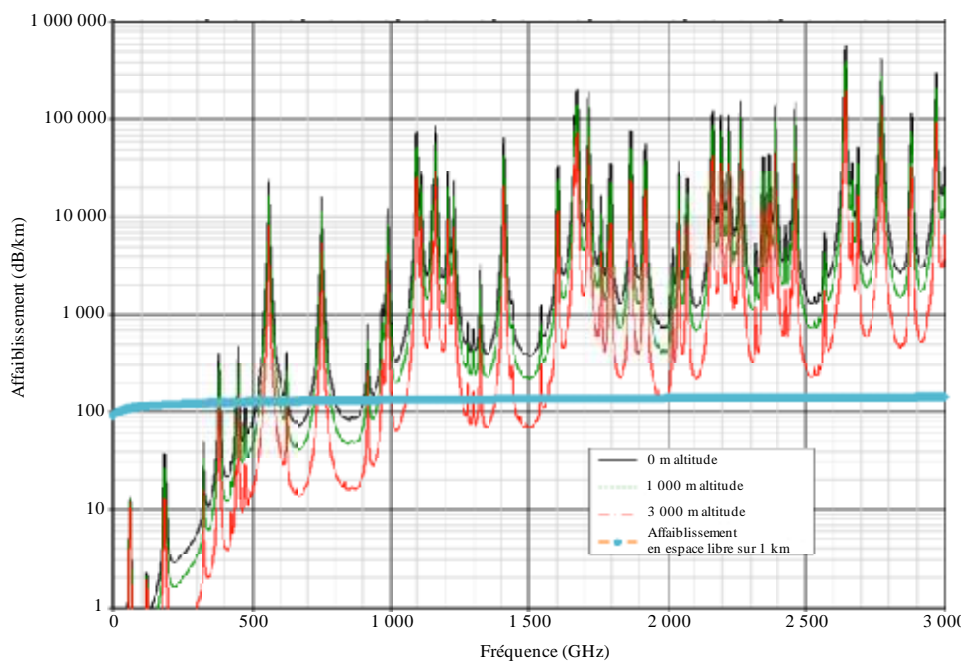
La Recommandation UIT-R RA.1272 traite de la protection des mesures de radioastronomie au-dessus de 60 GHz contre les brouillages d'origine terrestre. Certaines difficultés de partage spécifiques à ces fréquences élevées se posent. Les récepteurs de radioastronomie à ondes millimétriques sont en principe conçus pour couvrir l'intégralité des fenêtres atmosphériques (68-116 GHz, 130-170 GHz, 200-323 GHz, etc.), afin de tirer parti des informations contenues dans de nombreuses raies spectrales ou pour disposer d'une grande largeur de bande pour la mesure fine du rayonnement à spectre continu. En outre, les mélangeurs supraconducteur-isolant-supraconducteur utilisés comme premiers étages des récepteurs hétérodynes extrêmement sensibles peuvent facilement être saturés voire détruits par les brouillages de diverses origines causés dans leur bande de fonctionnement, alors qu'on ne dispose pas encore de techniques de filtrage à faibles pertes pour protéger ces mélangeurs. Par contre, les observatoires fonctionnant aux ondes millimétriques et devant bénéficier d'une protection ne sont que peu nombreux dans le monde et ils sont installés, chaque fois que cela est possible, en des endroits reculés, afin de bénéficier au maximum d'atmosphères ultrasèches et de faibles niveaux de brouillage d'origine terrestre. Les observatoires fonctionnant aux ondes millimétriques peuvent donc bénéficier d'une protection efficace contre les émissions d'origine terrestre pour *toutes* les fréquences supérieures à 60 GHz, au moyen de zones de coordination de tailles modestes avec une perturbation minimale pour les services de Terre. La Recommandation UIT-R RA.1272 préconise l'établissement de zones de coordination autour des observatoires fonctionnant aux ondes millimétriques, pour *toutes* les fréquences supérieures à 60 GHz, lorsque cela est possible. Les zones de coordination doivent être définies à l'aide des seuils de brouillage indiqués dans la Recommandation UIT-R RA.769 et de la procédure décrite dans la Recommandation UIT-R RA.1031.

### **5.7.2 Partage au-dessus de 275 GHz**

Certaines caractéristiques de la gamme de fréquences 275-3 000 GHz contribuent, en se combinant, à diminuer la probabilité de brouillage entre le service de radioastronomie et les services actifs fonctionnant dans cette bande. Dans la plage 275-3 000 GHz, la propagation à travers l'atmosphère terrestre est fortement influencée par l'absorption due à certaines molécules. Les types de molécules intervenant le plus dans ce phénomène d'absorption sont l'oxygène (O<sub>2</sub>) et la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O). L'absorption de type non résonnant crée un continuum général d'absorption qui augmente continûment avec la fréquence, tandis que des valeurs d'affaiblissement excessivement grandes sont observées à des fréquences bien particulières, qui correspondent aux fréquences de résonance naturelle de certaines molécules. Au niveau de la mer, le continuum général d'absorption est de 5 dB/km à 275 GHz, de 300 dB/km à 1 000 GHz et de 4 000 dB/km à 3 000 GHz (valeurs approchées). A certaines fréquences de résonance moléculaire dans cette gamme, l'affaiblissement peut atteindre 550 000 dB/km. Il décroît avec l'altitude en raison des plus faibles concentrations en oxygène et en vapeur d'eau. La Figure 5.2 montre l'affaiblissement, en dB/km, à différentes altitudes: niveau de la mer, 1 000 m et 3 000 m. Les paramètres utilisés dans le calcul de ces courbes figurent dans le Rapport UIT-R RA.2189.

FIGURE 5.2

**Affaiblissement atmosphérique calculé sur des trajets horizontaux de 1 km à différentes altitudes, dans l'hypothèse des propriétés atmosphériques figurant dans le Tableau 1. Pour comparaison: l'affaiblissement en espace libre sur 1 km est également représenté**



Radio-Astro 52

Le Rapport UIT-R RA.2189 indique des distances au-delà desquelles un signal émis à une fréquence comprise entre 275 et 1 000 GHz ne dépasserait pas les seuils de brouillage de la radioastronomie extrapolés à partir de la Recommandation UIT-R RA.769, sur la base d'hypothèses correspondant au cas qui est presque le plus défavorable.

Aux fréquences atteignant les térahertz, l'absorption atmosphérique a une forte influence sur les systèmes de Terre; il convient donc de prendre ce facteur en compte dans le calcul de l'affaiblissement le long du trajet entre un émetteur et un récepteur. Pour la même raison, les observatoires astronomiques qui effectuent des observations dans cette gamme de fréquences sont, pour la plupart, situés au sommet de montagnes élevées. A 275 GHz de fréquence et 3 000 m d'altitude, le taux d'absorption de référence est égal à 1 dB/km environ et l'affaiblissement atmosphérique dépasse l'affaiblissement en espace libre pour des distances supérieures à 186 km environ. A 1 000 GHz, le taux d'absorption est proche de 100 dB/km et l'affaiblissement atmosphérique dépasse l'affaiblissement en espace libre pour des distances supérieures à 1,6 km environ; les chiffres correspondants pour 3 000 GHz sont à peu près de 1 000 dB/km et de 250 m. En conclusion, dans le cas des fréquences supérieures à 1 000 GHz environ, l'absorption atmosphérique est généralement un facteur plus important que l'étalement géométrique (affaiblissement en espace libre).

Les faisceaux d'antenne de petites dimensions contribuent aussi à réduire les risques de brouillage accidentel. Aux fréquences supérieures à 275 GHz, les ouvertures angulaires des antennes sont très petites, même dans le cas de paraboles de petite dimension. A titre d'exemple, une parabole de 30 cm de diamètre (soit environ la taille d'une grande assiette) produit un faisceau de 0,28° seulement à 275 GHz, dans l'hypothèse où 75% du diamètre de la parabole est éclairé par l'alimentation. Etant donné que la largeur de faisceau diminue lorsque la fréquence augmente, les ouvertures angulaires aux fréquences supérieures à 275 GHz seraient encore plus faibles. Enfin, pour la plupart des systèmes utilisés dans la pratique, la puissance RF produite à ces fréquences est actuellement faible.

S'agissant des brouillages causés au service de radioastronomie par un système actif dans la gamme 275-3 000 GHz, un scénario de Terre correspondant au «cas proche du cas le plus défavorable» serait celui d'un émetteur alimentant avec la plus grande puissance RF disponible une antenne d'émission relativement grande pointée directement vers un radiotélescope, l'émetteur et le télescope étant réglés sur une élévation élevée. Pour simuler

ce scénario et déterminer la distance à laquelle la présence de l'émetteur pourrait poser problème au radiotélescope, nous posons plusieurs hypothèses: le radiotélescope et l'émetteur se trouvent tous deux à une altitude de 3 000 m; l'émetteur produit une puissance décroissante qui passe de 2,75 dBm à 275 GHz à -20 dBm à 3 000 GHz; l'antenne d'émission a un diamètre de 30 cm et est éclairée avec un taux d'efficacité de 75%. Dans ces hypothèses, on peut calculer la distance à laquelle un brouillage se produirait, la définition du brouillage étant celle figurant dans la Recommandation UIT-R RA.769 à laquelle on ajoute l'absorption atmosphérique (voir la Figure 5.2). Les données sont représentées à la Figure 5.3 dans le cas de la gamme 275-1 000 GHz, et à la Figure 5.4 pour la gamme 1 000-3 000 GHz.

FIGURE 5.3

**Distance au-delà de laquelle un signal émis à une fréquence comprise entre 275 et 1 000 GHz ne dépasserait pas les seuils de brouillage de la radioastronomie extrapolés à partir de la Recommandation UIT-R RA.769, sur la base d'hypothèses correspondant au cas qui est presque le plus défavorable**

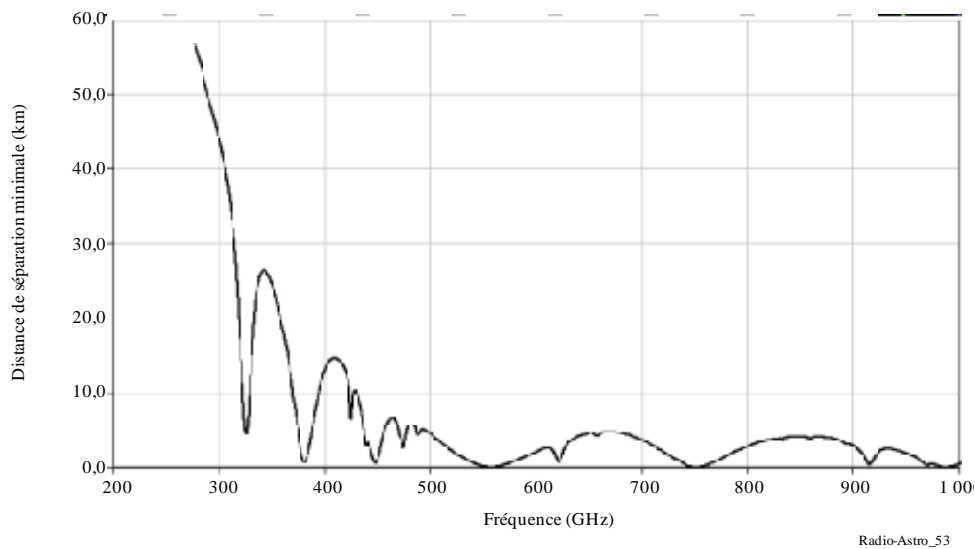
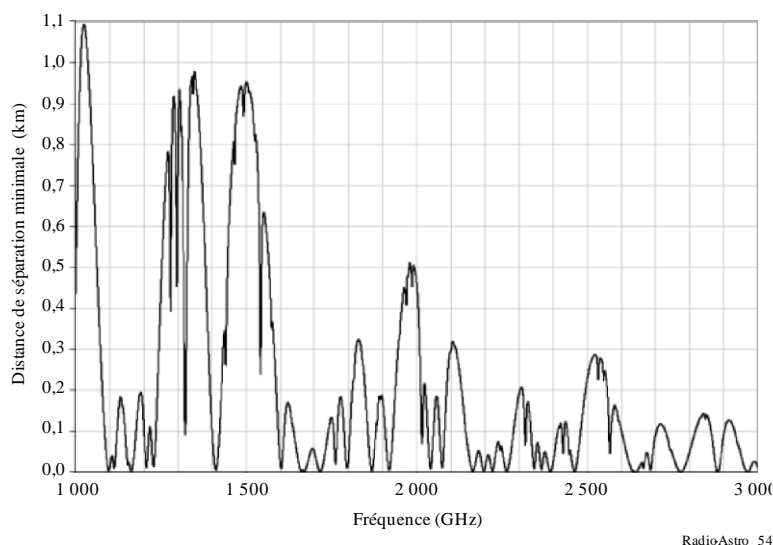


FIGURE 5.4

**Distance au-delà de laquelle un signal émis à une fréquence comprise entre 1 000 et 3 000 GHz ne dépasserait pas les seuils de brouillage de la radioastronomie extrapolés à partir de la Recommandation UIT-R RA.769, sur la base d'hypothèses correspondant au cas qui est presque le plus défavorable.**



On peut donc conclure que dans la plage 1 000-3 000 GHz, pour qu'un émetteur de Terre brouille un télescope, il faudrait qu'il se trouve à proximité immédiate de ce dernier, dans l'hypothèse du scénario le plus défavorable dans lequel l'émetteur et le télescope seraient tous deux installés au sommet d'une montagne élevée et en atmosphère sèche. Aux élévations basses, l'affaiblissement est beaucoup plus important et les distances de brouillage encore plus courtes. Cela étant, les radiotélescopes fonctionnant dans cette gamme de fréquences ne seraient pas installés sur des sites correspondant à ces conditions.

Les brouillages causés à des radiotélescopes par des sources aéroportées sont de nature transitoire, car les avions se déplacent par rapport aux radiotélescopes. Cela est d'autant plus vrai pour les fréquences comprises entre 1 000 et 3 000 GHz, car l'absorption atmosphérique qui se produit sur des trajets inclinés à très haute altitude limite les possibilités de brouillage au seul cas particulier où l'avion se trouve quasiment à la verticale du radiotélescope, l'une de ses antennes pointant directement vers le sol. Or l'avion se déplace très rapidement par rapport au sol et le faisceau dans la gamme des térahertz est très étroit. Le brouillage éventuel sera donc de très courte durée. On peut certes concevoir que des signaux brouilleurs provenant d'un émetteur THz embarqué à bord d'un hélicoptère à haute altitude survolant un radiotélescope à la verticale puissent dépasser le seuil de brouillage préjudiciable extrapolé à partir de la Recommandation UIT-R RA.769. Cela étant, la possibilité d'un tel scénario, du moins sans qu'il y ait eu coordination préalable, est, au mieux, minime. Il est donc peu probable que des émetteurs aéroportés brouillent des observatoires de radioastronomie. En raison de la combinaison des facteurs que sont la faible ouverture angulaire, le déplacement rapide et l'affaiblissement en espace libre, la possibilité que des satellites non géostationnaires causent des brouillages à un radiotélescope est extrêmement faible.

On peut donc conclure que sauf changement radical des limitations pratiques imposées à la production de puissance RF, le partage entre le service de radioastronomie et les services actifs dans la gamme de fréquences 275-3 000 GHz ne devrait pas poser de problème.

## 5.8 Partage avec la recherche en espace lointain

Les bandes attribuées aux communications de la recherche en espace lointain (espace vers Terre) à 2,3 et 8,4 GHz sont régulièrement utilisées en observation par les interféromètres à très grande ligne de base pour la radioastronomie et la géodésie (étude de la tectonique des plaques). Selon le Règlement des radiocommunications, l'espace lointain est la région de l'espace se trouvant au-delà de  $2 \times 10^6$  km de la Terre. Les missions dans l'espace lointain portent sur l'exploration des planètes, des comètes, des astéroïdes et sur l'étude du vent solaire. Les transmissions espace vers Terre depuis un engin en mission dans l'espace lointain

ont une puissance type de 20 W à l'émission pour une antenne de 4 m de diamètre, ce qui assure un gain de 36 dBi à 2,3 GHz ou de 47 dBi à 8,4 GHz. A une distance de  $2 \times 10^6$  km de la Terre, les puissances surfaciques correspondantes au niveau de la Terre sont de  $-148$  dB(W/m<sup>2</sup>) à 2,3 GHz et de  $-137$  dB(W/m<sup>2</sup>) à 8,4 GHz. Il est clair, si l'on se réfère au Chapitre 4, que ces niveaux dépassent les seuils de brouillage préjudiciable pour les mesures de puissance totale en radioastronomie. Toutefois les puissances surfaciques restent inférieures aux seuils de brouillage préjudiciable pour l'interférométrie à très grande ligne de base. Jusqu'ici, l'expérience confirme que, dans le cas particulier de l'interférométrie à très grande ligne de base, le partage est possible entre la radioastronomie et les communications en espace lointain.

A paramètres d'émission égaux, une distance de séparation de  $6 \times 10^7$  km serait nécessaire pour éviter à l'engin spatial de brouiller les mesures de puissance totale en radioastronomie. A titre de comparaison, la planète la plus proche, Vénus, est à  $4 \times 10^7$  km à sa conjonction inférieure. Sur la base des seuils donnés dans le Chapitre 4, les signaux provenant d'engins spatiaux se trouvant dans les régions les plus proches de l'espace lointain pourraient donc induire un brouillage nuisible aux radiotélescopes partageant la même bande, alors que les engins spatiaux en mission vers les planètes extérieures ne causeraient que très peu de brouillage (et les directions des engins spatiaux brouilleurs seraient de surcroît parfaitement connues). A noter que l'on suppose ici que les signaux provenant des engins spatiaux seraient reçus par les lobes latéraux du radiotélescope avec un gain ne dépassant pas 0 dBi.

## **5.9 Partage du temps**

Etant donné la nature des phénomènes observés en radioastronomie, c'est seulement dans des conditions particulières qu'il est possible d'envisager des programmes de partage de temps entre la radioastronomie et les services actifs fonctionnant dans la même bande de fréquences. De plus, les utilisateurs qui fournissent un service à des clients peuvent ne pas souhaiter adopter le partage de temps ou ne pas être en mesure de le faire. Le partage de temps est parfois possible en principe, mais en pratique les difficultés qu'il soulève sont liées à l'exploitation plutôt qu'à la technique.

Néanmoins, un partage limité du temps est parfois possible pour permettre d'effectuer des observations sur un site radioastronomique et peut même s'avérer nécessaire dans certaines circonstances. Le cas particulier de l'interruption du récepteur pour permettre de mener des observations en présence d'émetteurs radar a déjà été examiné dans le Chapitre précédent. Plus généralement, la science impose souvent aux radioastronomes d'effectuer des observations hors des bandes de fréquences attribuées à leur service, et dans ce cas, le partage de temps avec les services actifs peut être la seule solution. La Recommandation UIT-R RA.314 reconnaît ce cas et invite instamment à demander aux administrations d'apporter leur aide pour coordonner l'observation expérimentale des raies spectrales situées dans des bandes non attribuées à la radioastronomie.

### **5.9.1 Coordination du partage du temps et des fréquences**

Les radiotélescopes modernes sont capables d'effectuer des observations sur une gamme de fréquences extrêmement étendue. Les réservations de télescopes dépassent souvent les disponibilités, leur temps d'utilisation est coûteux et la concurrence entre les différents organismes souhaitant disposer d'un temps d'observation est rude. Par conséquent, les radioastronomes doivent exploiter leurs télescopes de la façon la plus efficace possible. Cela nécessite que, dans la mesure du possible, ils adaptent en permanence la fréquence d'observation aux meilleures conditions atmosphériques; certains observatoires de radioastronomie ont du reste adopté une planification dynamique. A titre d'exemple, le télescope de Green Bank (GBT), qui appartient à l'Observatoire national de radioastronomie des Etats-Unis d'Amérique, est capable d'effectuer des observations entre 1 et 100 GHz. Cependant, les observations aux fréquences maximales ne peuvent être réalisées qu'à certaines périodes pendant les mois d'hiver, lorsque l'atmosphère est extrêmement sèche, et il est donc souhaitable d'optimiser la façon dont ces périodes sont exploitées. De son côté, le radiotélescope de Bonn relevant de l'Institut Max Planck couvre une gamme de fréquences analogues.

Etant donné que certains services actifs utilisent de multiples canaux, la coordination dans le temps, même pour de courtes durées, est parfois possible. Ainsi, les observatoires peuvent communiquer leurs calendriers aux services actifs fonctionnant dans les bandes concernées, et ces derniers peuvent, dans certains cas, passer sur des canaux qui ne perturbent pas les observations de radioastronomie. Il est admis que ce type d'arrangement doit être équitable pour toutes les parties, notamment lorsque les radioastronomes souhaitent effectuer des observations en dehors des bandes qui leur sont attribuées, et être mis en oeuvre au cas par cas.



Il convient en outre de noter que les effets de la propagation dépendant fortement de la fréquence, l'occurrence de perte de données peut parfois être réduite grâce à une replanification «dynamique».

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CCIR [1990] Report 696-2 – Feasibility of Frequency Sharing between Radio Astronomy and other Services. Doc. of the XVIIth Plenary Assembly, Düsseldorf, 1990, Annex to Vol. II, p. 568-584.

GREENHILL, L. J., KNODRATKO, P. T., LOVELL, J. E. J., KUIPER, T. B. H., MORAN, J. M., JAUNCEY, D. L. and BAINES, G. P. [2003] *Astrophys. J. (Letters)*, Vol. 582, L11-L14.



## CHAPITRE 6

### Brouillage causé à la radioastronomie par des émetteurs fonctionnant dans d'autres bandes

#### 6.1 Introduction

Les émissions radioélectriques d'origine cosmique détectées et mesurées par les radiotélescopes ont une intensité beaucoup plus faible que celles des signaux utilisés par les services (émetteurs) actifs. Pour mesurer ces signaux de faible intensité, on utilise généralement pour les observations radioastronomiques les récepteurs les plus sensibles compte tenu des techniques radioélectriques disponibles et des largeurs de bande accessibles. Les observations de radioastronomie sont extrêmement sensibles aux brouillages du fait de la faiblesse des signaux d'origine cosmique et de la sensibilité des récepteurs. Les brouillages peuvent même être causés par des émetteurs qui ne partagent pas la même bande de fréquences. Ils sont dus aux effets en limite de bande, aux harmoniques des émetteurs, aux effets d'intermodulation, etc. L'examen des niveaux de seuil des brouillages causés aux observations radioastronomiques, des critères de protection de ces observations et des limites de faisabilité du partage avec d'autres services fait l'objet des Chapitres 4 et 5.

Le niveau des signaux dans les bandes adjacentes à celles utilisées par les services actifs varie beaucoup avec la nature du service. De plus, la désignation des services est très générale et peut donc recouvrir un grand nombre de types d'émetteurs différents. Les signaux de crête les plus intenses se retrouveront vraisemblablement dans les bandes attribuées à la radiolocalisation et à la radionavigation aéronautique, car ces services peuvent comprendre des radars très puissants installés à bord d'aéronefs. Les puissances surfaciques moyennes de tels signaux en des sites d'observation relativement isolés dépassent couramment – 100 dB(W/m<sup>2</sup>). A noter que la télédiffusion en ondes décimétriques produit également des signaux de très forte intensité.

#### 6.1.1 Définitions tirées du Règlement des radiocommunications (RR)

Les définitions suivantes reprises du RR (Section VI de l'Article 1) sont utiles pour l'analyse du brouillage causé par des émetteurs fonctionnant dans d'autres bandes que celles attribuées au SRA.

*Largeur de bande nécessaire* (numéro 1.152 du RR): Pour une *classe d'émission* donnée, largeur de la bande de fréquences juste suffisante pour assurer la transmission de l'information à la vitesse et avec la qualité requises dans des conditions données.

*Emission hors bande* (numéro 1.144 du RR): *Emission* sur une ou des fréquences situées en dehors de la *largeur de bande nécessaire* mais en son voisinage immédiat, due au processus de la modulation, à l'exclusion des *rayonnements non essentiels*.

*Rayonnement non essentiel* (numéro 1.145 du RR): *Rayonnement* sur une ou des fréquences situées en dehors de la *largeur de bande nécessaire* et dont le niveau peut être réduit sans affecter la transmission de l'information correspondante. Ces rayonnements comprennent les *rayonnements* harmoniques, les *rayonnements* parasites, les produits d'intermodulation et de conversion de fréquence, à l'exclusion des *émissions hors bande*.

*Rayonnements non désirés* (numéro 1.146 du RR): Ensemble des *rayonnements non essentiels* et des *rayonnements* provenant des *émissions hors bande*.

#### 6.1.2 Définitions complémentaires

Les définitions du § 6.1.1 font parfois l'objet d'exceptions ou de modifications. La Recommandation UIT-R SM.1541 contient par exemple les définitions suivantes:

*Domaine non essentiel*<sup>11</sup> (d'une émission): Domaine de fréquence hors du domaine hors bande à l'intérieur duquel le rayonnement non essentiel est généralement prédominant.

*Domaine des émissions hors bande* (d'une émission): gamme de fréquences, immédiatement en dehors de la largeur de bande nécessaire mais excluant le domaine des rayonnements non essentiels, dans laquelle les émissions hors bande en général prédominent.

*Emissions dans le domaine des émissions hors bande*: Toute émission située en dehors de la largeur de bande nécessaire mais à l'intérieur de la plage des fréquences espacées par rapport à la fréquence assignée de l'émission de moins de 250% de la largeur de bande nécessaire de l'émission sera généralement considérée comme une émission dans le domaine des émissions hors bande. Toutefois, cet espacement peut dépendre du type de modulation, de la rapidité de modulation maximale dans le cas de la modulation numérique, du type d'émetteur et de facteurs liés à la coordination des fréquences. Par exemple, pour certains systèmes numériques, à large bande ou à modulation par impulsions, il sera peut-être nécessaire d'utiliser une valeur différente de 250%.

*Emissions dans le domaine des rayonnements non essentiels*: Dans le cadre de la présente Recommandation, toutes les émissions – y compris les produits d'intermodulation, les produits de conversion et les rayonnements parasites – situées à des fréquences espacées par rapport à la fréquence centrale de l'émission d'au moins 250% de la largeur de bande nécessaire de l'émission seront généralement considérées comme des émissions dans le domaine des rayonnements non essentiels. Toutefois, cet espacement peut dépendre du type de modulation, de la rapidité de modulation maximale dans le cas de la modulation numérique, du type d'émetteur et de facteurs liés à la coordination des fréquences. Par exemple, pour certains systèmes numériques, à large bande ou à modulation par impulsions, il sera peut-être nécessaire d'utiliser une valeur différente de 250%.

En ce qui concerne les émetteurs/répéteurs multicanal ou multiporteuse, pour lesquels plusieurs porteuses peuvent être transmises simultanément à partir d'un amplificateur de sortie final ou d'une antenne active, on considère que la fréquence centrale de l'émission correspond au centre de la largeur de bande assignée à la station considérée ou de la largeur de bande à  $-3$  dB de l'émetteur/récepteur, si celle-ci est plus petite.

*Emissions hors bande/rayonnements non essentiels*: La distinction entre émissions hors bande et rayonnements non essentiels se fait généralement en termes de fréquences, comme on l'indique ci-après (voir la Recommandation UIT-R SM.329-9). Conformément aux principes indiqués dans l'Appendice 3 du RR, le domaine des rayonnements non essentiels comprend généralement les fréquences espacées par rapport à la fréquence centrale de l'émission d'au moins 250% de la largeur de bande nécessaire de l'émission. Toutefois, cet espacement peut dépendre du type de modulation utilisé, du débit binaire maximal dans le cas de la modulation numérique, du type d'émetteur et de facteurs liés à la coordination des fréquences. Par exemple, pour certains systèmes numériques à large bande ou à modulation d'impulsions, l'espacement entre les fréquences peut ne pas respecter les  $\pm 250\%$ . Étant donné que le RR interdit à tout service radioélectrique de causer des brouillages préjudiciables hors de la bande qui lui a été attribuée, les fréquences d'émission devraient être déterminées de telle sorte que les émissions hors bande ne causent pas de brouillages préjudiciables en dehors des bandes attribuées, conformément au numéro 4.5 du RR.

Les  $\pm 250\%$  peuvent aussi s'appliquer à l'espacement entre canaux et non à la largeur de bande nécessaire. Par exemple, dans le cas de la coordination des fréquences pour le service fixe numérique, on préconise dans la Recommandation UIT-R F.1191 d'utiliser  $\pm 250\%$  de l'espacement entre canaux de la disposition des canaux radioélectriques appropriée comme limites de fréquence entre le domaine des émissions hors bande et le domaine des rayonnements non essentiels.

Dans le cas d'une largeur de bande très étroite ou très large, cette méthode de détermination du domaine des rayonnements non essentiels peut ne pas convenir; la Recommandation UIT-R SM.1539 donne des précisions supplémentaires.

---

<sup>11</sup> Les expressions "domaine des émissions hors bande" et "domaine des rayonnements non essentiels" ont été introduites pour supprimer une certaine incohérence qui existe actuellement entre d'une part les définitions des termes "émission hors bande" et "rayonnements non essentiels" dans l'Article 1 du RR, et, d'autre part, l'utilisation effective de ces expressions dans l'Appendice 3 du RR (Rév.CMR-12). Les limites des émissions hors bande et des rayonnements non essentiels s'appliquent respectivement à toutes les émissions non désirées dans le domaine des émissions hors bande et dans le domaine des rayonnements non essentiels.

### 6.1.3 Mécanismes de brouillage par des émetteurs fonctionnant dans d'autres bandes

Le brouillage en limite de bande, c'est-à-dire dû à un émetteur fonctionnant dans une bande adjacente, peut être engendré par trois mécanismes différents:

- Lorsque la coupure de la bande passante du spectre transmis par un émetteur dans une bande adjacente n'est pas suffisamment nette, des bandes latérales de modulation peuvent se retrouver à l'intérieur d'une bande attribuée à la radioastronomie.
- Deux signaux intenses, ou plus, agissant sur un élément non linéaire peuvent engendrer des fréquences de battement de la forme  $(mf_1 \pm nf_2)$ , où  $f_1$  et  $f_2$  sont les fréquences émises, et  $m$  et  $n$  des entiers. L'entier  $(m + n)$  est appelé «ordre d'intermodulation». L'élément non linéaire peut se situer à la sortie d'un émetteur, dans les étages d'entrée du récepteur radioastronomique, ou être un objet quelconque, un raccord rouillé dans un pylône ou une clôture par exemple, situé à proximité du récepteur dans une zone où les champs électriques sont intenses.
- Le récepteur radioastronomique peut réagir aux signaux situés dans une bande adjacente si sa sensibilité aux fréquences situées hors de la bande attribuée à la radioastronomie est trop élevée.

Le brouillage provenant d'émetteurs fonctionnant à des fréquences plus éloignées d'une bande attribuée à la radioastronomie peut résulter des mécanismes suivants:

- L'émetteur a toutes les chances de générer des harmoniques de la fréquence qui lui a été attribuée et de les émettre à un niveau provoquant le brouillage des observations radioastronomiques.
- L'intermodulation de deux signaux de fréquences assez éloignées peut engendrer un signal à une troisième fréquence qui se situe assez loin de l'une ou l'autre des deux fréquences en question.
- L'utilisation des techniques de modulation à bande large et d'étalement du spectre peut se traduire par des bandes spectrales latérales très larges, qui peuvent provoquer un brouillage grave si elles ne sont pas filtrées à la sortie de l'émetteur.

L'intermodulation dans les étages d'entrée du récepteur et le filtrage insuffisant des signaux hors de la bande attribuée à la radioastronomie résultent d'une mauvaise conception du récepteur. Le filtrage dans les étages d'entrée des récepteurs radioastronomiques doit être suffisant pour éliminer les signaux susceptibles de causer une intermodulation. Ces récepteurs doivent également être équipés de filtres de fréquence intermédiaire capables d'assurer l'élimination requise des fréquences situées aux limites de la bande attribuée à la radioastronomie, ce qui peut aller jusqu'à  $-100$  dB par rapport au centre de la bande.

D'une manière générale, l'attribution de bandes adjacentes à une bande attribuée à la radioastronomie à des services utilisant des émetteurs très puissants peut être à l'origine de problèmes techniques difficiles et coûteux. Certains mécanismes d'interaction (ceux qui mettent en jeu les harmoniques ou les bandes latérales de modulation, par exemple) dépendent fortement des caractéristiques de l'émetteur et doivent être examinés individuellement pour chacun des services. Les émissions des satellites et des aéronefs posent un problème particulier pour la radioastronomie, car les conditions de propagation en visibilité directe se présentent fréquemment. Le service de radiorepérage par satellite et les services de communications numériques, qui utilisent les techniques de modulation à large bande et d'étalement du spectre, sont des exemples de services qui se sont avérés particulièrement gênants pour la radioastronomie.

## 6.2 Limites applicables aux rayonnements non désirés produits par des services actifs

### 6.2.1 Limites dans le domaine des rayonnements non essentiels

Les limites applicables aux rayonnements non essentiels sont données dans l'Appendice 3 du RR ainsi que dans la Recommandation UIT-R SM.329 (appartenant à la série sur la gestion du spectre), dans laquelle sont spécifiées les catégories suivantes:

- Les limites de la catégorie A sont les valeurs de l'affaiblissement utilisées pour calculer les niveaux de puissance maximums tolérés des émissions produites dans le domaine des rayonnements non essentiels. L'Appendice 3 du RR reprend les limites de la catégorie A;

- Les limites de la catégorie B sont un exemple de limites applicables aux rayonnements non essentiels plus contraignantes que celles de la catégorie A. Elles sont basées sur des limites définies et adoptées en Europe et utilisées par certains autres pays;
- Les limites de la catégorie C sont un exemple de limites applicables aux rayonnements non essentiels plus contraignantes que celles de la catégorie A. Elles sont basées sur des limites définies et adoptées aux Etats-Unis d'Amérique et au Canada et utilisées par certains autres pays.
- Les limites de la catégorie D sont un exemple de limites applicables aux rayonnements non essentiels plus contraignantes que celles de la catégorie A. Elles sont basées sur des limites définies et adoptées au Japon et utilisées par certains autres pays.
- Catégorie Z: Limites de rayonnement applicables aux ITE définies par le Comité international spécial des perturbations radioélectriques (CISPR).

Les limites sont données en termes de niveau de puissance maximal des rayonnements non essentiels exprimé en dB au-dessous de la puissance fournie à la ligne de transmission de l'antenne.

Pour les services de Terre, les limites de la catégorie A, auxquelles les radioastronomes sont le plus sensibles, spécifient une valeur minimale de l'affaiblissement égale à  $43 + 10 \log P$  dBc ou 70 dBc, la valeur la moins contraignante étant appliquée ( $P$  est la puissance moyenne fournie à la ligne de transmission). Les rayonnements non essentiels sont mesurés dans ce cas dans une largeur de bande de référence de 100 kHz pour les fréquences comprises entre 30 MHz et 1 GHz et dans une largeur de bande de 1 MHz pour les fréquences au-dessus de 1 GHz.

Pour les services spatiaux, les limites de la catégorie A spécifient une valeur minimale de l'affaiblissement égale à  $43 + 10 \log P$  dBc ou 60 dBc, la valeur la moins contraignante étant appliquée. Toutefois, la largeur de bande de référence spécifiée pour la mesure des rayonnements non essentiels est de 4 kHz pour les services spatiaux; la limite de densité spectrale de puissance est donc moins contraignante pour les services spatiaux que pour les services de Terre de 14 dB ( $10 \log(4/100)$  dB) pour les fréquences comprises entre 30 MHz et 1 GHz et de 24 dB ( $10 \log(4/1\ 000)$  dB) pour les fréquences supérieures à 1 GHz.

Considérons, à titre d'exemple de l'effet des rayonnements non essentiels produits par les services spatiaux, un satellite situé à une distance de  $h$  m au-dessus d'une station de radioastronomie et susceptible de produire une densité spectrale de puissance surfacique de rayonnements non essentiels égale à  $-79 - 10 \log(4\pi h^2) + G_{SAT}$  dB(W(m<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup>)), où  $G_{SAT}$  est le gain de l'antenne du satellite en direction de l'observatoire de radioastronomie à la fréquence des rayonnements non essentiels. Pour évaluer cette densité spectrale de puissance surfacique à des fréquences appartenant aux bandes de la radioastronomie dans le cas d'un satellite en orbite géostationnaire, on pose  $h = 6,39 \times 10^6$  m et on choisit arbitrairement une valeur de  $G_{SAT}$  correspondant à une ouverture de 1 m<sup>2</sup> de l'antenne du satellite. On autorise un gain maximal de 40 dB pour lequel le diamètre de l'empreinte au sol est de 1 400 km. Les valeurs résultantes de la densité spectrale de puissance surfacique sont indiquées sur la courbe en pointillés de la Figure 6.1. Ensuite, pour traiter le cas d'un satellite en orbite terrestre basse (LEO), on pose  $h = 800$  km, et  $G_{SAT}$  correspondant à nouveau à une ouverture d'antenne de 1 m<sup>2</sup>, avec une valeur maximale de 20 dB, le diamètre d'empreinte au sol étant d'environ 300 km, c'est-à-dire la plus petite empreinte au sol généralement utilisée. Les valeurs de densité spectrale de puissance surfacique correspondantes forment la courbe continue de la Figure 6.1, sur laquelle les valeurs seuils de brouillage applicables aux observations de radioastronomie à spectre continu (données dans la Recommandation UIT-R RA.769) sont indiquées par des croix. Les courbes de densité spectrale de puissance surfacique pour les rayonnements non essentiels de la Figure 6.2 correspondent au cas le plus défavorable puisqu'on a supposé que l'axe de gain maximal de l'antenne du satellite pointe en direction de la station de radioastronomie. De plus, on a considéré pour plus de simplicité que les distances utilisées sont celles d'un satellite au zénith et on a négligé l'affaiblissement atmosphérique ainsi que d'autres petits effets similaires. Toutefois, les niveaux autorisés de densité spectrale de puissance surfacique sont supérieurs aux seuils de brouillage nuisible dans une proportion telle (20 à 50 dB) qu'il est clair qu'en règle générale, les limites de rayonnements non essentiels n'assurent pas, tant s'en faut, la protection du SRA. Dans le cas des services de Terre, les limites de la densité spectrale de puissance surfacique produite par les rayonnements non essentiels au-dessus de 1 GHz sont plus contraignantes de 24 dB que celles applicables aux services spatiaux, en raison de la différence entre les largeurs de bande de référence. Les distances à considérer dans les cas d'émetteurs de Terre sont généralement moins grandes que dans le cas d'émetteurs de services spatiaux, mais l'effet d'écran dû au relief peut assurer aux observations radioastronomiques une

protection importante. Lorsqu'il s'agit d'émissions en visibilité directe, les limites applicables aux rayonnements non essentiels se révèlent une fois encore dans l'incapacité d'assurer la protection du SRA dans la plupart des cas. La Recommandation UIT-R SM.329, dans laquelle sont spécifiées les limites des rayonnements non essentiels, dresse (dans son Annexe 3) la liste des seuils de brouillage des observations de radioastronomie. Le niveau de protection assuré par ces limites n'est cependant pas obligatoire et doit être évalué au cas par cas à mesure qu'apparaissent de nouveaux systèmes.

### 6.2.2 Limites dans le domaine des émissions hors bande

Les limites applicables aux émissions hors bande sont données dans la Recommandation UIT-R SM.1541. Cette Recommandation contient essentiellement, pour de nombreux services, les gabarits d'émission indiquant les limites à respecter dans la zone comprise entre les bords de la largeur de bande nécessaire et les bords intérieurs de la région des rayonnements non essentiels. Ces limites sont moins contraignantes que celles applicables aux rayonnements non essentiels, mais elles tendent vers ces dernières au niveau de la frontière entre le domaine des émissions hors bande et celui des rayonnements non essentiels. Une fois de plus, ces limites ne visent pas à assurer la protection du SRA, la coordination devant être considérée au cas par cas.

### 6.2.3 Limites applicables aux rayonnements non désirés des services actifs en vue de protéger les bandes de la radioastronomie

Un certain nombre de numéros du Règlement des radiocommunications visent à assurer la protection du SRA contre les rayonnements non désirés des services actifs (voir par exemple le numéro **5.208A**). A de nombreuses CMR, des numéros complémentaires ont été élaborés en vue d'assurer une protection supplémentaire au SRA vis-à-vis des services actifs nouveaux ou existants.

Le numéro **5.443B** porte sur la protection contre les rayonnements non désirés du service de radionavigation par satellite (espace vers Terre) fonctionnant dans la bande 5 010-5 030 MHz:

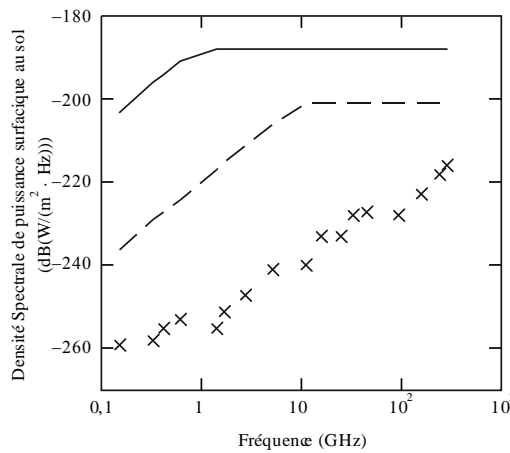
«**5.443B** ... Pour qu'aucun brouillage préjudiciable ne soit causé au système d'atterrissage aux hyperfréquences fonctionnant au-dessus de 5 030 MHz, la puissance surfacique cumulative rayonnée à la surface de la Terre dans la bande 5 030-5 150 MHz par toutes les stations spatiales d'un système du service de radionavigation par satellite (espace vers Terre) fonctionnant dans la bande 5 010-5 030 MHz ne doit pas dépasser  $-124,5$  dB(W/m<sup>2</sup>) dans une bande de 150 kHz. Pour qu'aucun brouillage préjudiciable ne soit causé au service de radioastronomie dans la bande 4 990-5 000 MHz, les systèmes du service de radionavigation par satellite fonctionnant dans la bande 5 010-5 030 MHz doivent respecter les limites applicables à la bande 4 990-5 000 MHz et définies dans la Résolution **741 (Rév.CMR-12)**. (CMR-12)»

Les numéros **5.511A** et **5.511F** du RR portent sur la protection contre les rayonnements non désirés du SMS (espace vers Terre) fonctionnant dans la bande 15,43-15,63 GHz:

«**5.511A** ... Afin de protéger le service de radioastronomie dans la bande 15,35-15,4 GHz, la puissance surfacique cumulative rayonnée dans la bande 15,35-15,4 GHz par toutes les stations spatiales de n'importe quel système à satellites non géostationnaires de liaisons de connexion (espace vers Terre) du service mobile par satellite fonctionnant dans la bande 15,43-15,63 GHz ne doit pas dépasser  $-156$  dB(W/m<sup>2</sup>) dans une largeur de bande de 50 MHz vers n'importe quel site d'observation de radioastronomie pendant plus de 2% du temps. (CMR-2000)»

FIGURE 6.1

**Densité spectrale de puissance surfacique au sol correspondant aux limites des rayonnements non essentiels produits par des satellites**



La courbe continue et la courbe en pointillés indiquent les valeurs possibles de la densité spectrale de puissance surfacique au niveau du sol correspondant aux limites des rayonnements non essentiels produits respectivement par un satellite LEO et par un satellite en orbite géostationnaire (voir le paragraphe précédent pour plus de détails). Les croix correspondent aux valeurs de seuil du brouillage nuisible causé aux observations radioastronomiques (voir le Tableau 4.1).

Radio-Astro 61

### 6.3 Qualité de fonctionnement des récepteurs radioastronomiques

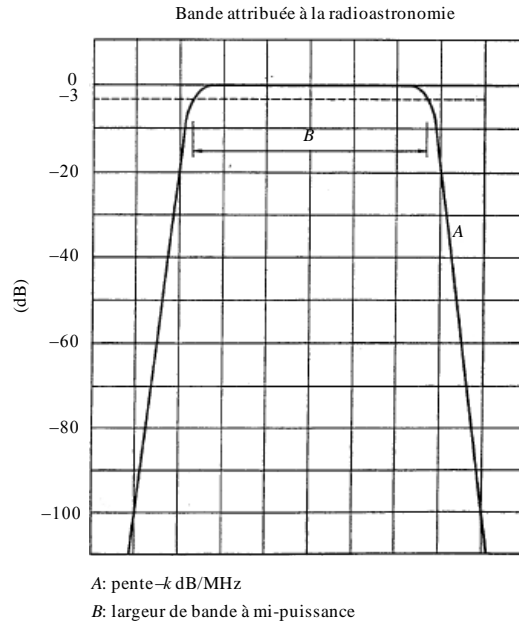
#### 6.3.1 Filtrage du brouillage en limite de bande

Pour calculer la puissance effective  $P$  à l'entrée d'un récepteur radioastronomique de signaux provenant d'une bande adjacente, la réponse du récepteur en limite de bande doit être connue avec une certaine précision. Considérons par exemple le bord droit (fréquences supérieures) de la bande de la Figure 6.2, où  $-a_0$  dB est la valeur dont le gain relatif du radiomètre a été réduite au niveau du bord de la bande, et  $-k$  dB/MHz la pente de la courbe de réponse du récepteur en ce point.



FIGURE 6.2

**Caractéristiques du filtre passe bande d'un récepteur conçu pour correspondre à une bande attribuée à la radioastronomie**



Supposons que dans la bande attribuée à la radioastronomie, tous les signaux brouilleurs soient égaux au seuil de brouillage nuisible donné dans le Tableau 4.1, et qu'en dehors de cette bande, le brouillage ait une densité spectrale de puissance surfacique uniforme  $S$  W/(m<sup>2</sup> · Hz). Si  $A$  est l'aire collectrice de l'antenne radioastronomique dans la direction du signal brouilleur et  $f_0$  la fréquence en limite de bande, la puissance de brouillage reçue s'exprime comme suit:

$$P = AS \int_{f_0}^{\infty} 10^{-[a_0 + 10^{-6} k(f - f_0)/10]} df = 4,34 \times 10^{-a_0/10} AS/k \quad (6.1)$$

La limite infinie de l'intégrale se justifie en pratique tant que le brouillage s'étend suffisamment loin au-delà de la limite de la bande.

Les puissances de brouillage maximales tolérables indiquées dans le Tableau 4.1 sont comprises entre 10<sup>-17</sup> et 10<sup>-21</sup> W pour des largeurs de bande types à des fréquences supérieures à 1 GHz. Dans le cas d'un signal continu tel que  $S = 2 \times 10^{-13}$  W/(m<sup>2</sup> · Hz) (valeur type d'un signal de faisceau hertzien) et  $A = 10^{-3}$  m<sup>2</sup> (gain isotrope à 3 GHz environ), la puissance de 10<sup>-21</sup> W ne sera pas dépassée si, par exemple, la réponse en limite de bande,  $a_0$ , est de 102 dB et que la pente,  $k$ , est de -50 dB/MHz. La valeur de  $k$  est beaucoup moins déterminante que celle de  $a_0$  et, pour  $k = 10$  dB/MHz, la même puissance est reçue avec  $a_0 = 109$  dB. Aussi l'affaiblissement d'un récepteur radioastronomique à des fréquences de l'ordre du gigahertz doit-il être compris entre -100 et -110 dB en limite de bande par rapport au centre de la bande, et plus élevé encore si la source d'émission hors bande est située dans une direction pour laquelle la réponse du télescope est supérieure à 0 dBi. Il est à noter qu'en pratique, le spectre d'émission du service de la bande adjacente ne peut pas présenter une coupure brutale en limite de bande, mais doit s'affaiblir en direction de cette limite afin de ne pas dépasser le seuil préjudiciable à l'intérieur de la bande attribuée à la radioastronomie. Même si le cas considéré correspond à une simplification, il donne une indication utile sur la réponse requise en limite de bande. D'autres exemples sont donnés dans le Tableau 6.1, dans lequel on suppose que le diagramme de l'antenne de radioastronomie est isotrope.

TABLEAU 6.1

Exemples de réponses en limite de bande requises pour la radioastronomie

Service	Distance supposée de l'émetteur (km)	Niveaux moyens types du signal au niveau de l'observatoire	Réponse requise du récepteur en limite de bande (dB)
Satellite de radiodiffusion (flux maximal admissible)	36 000	$5 \times 10^{-18} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$	de -56 à -63
Emetteur type de faisceau hertzien	60	$2 \times 10^{-13} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$	de -102 à -109
Radar aéroporté (puissance moyenne de 10 W)	10	$10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2$	-100
	300	$10^{-11} \text{ W}/\text{m}^2$	-70

Dans le cas des radars impulsionnels, les répercussions d'un brouillage induit par des impulsions à faible rapport cyclique dans un récepteur radioastronomique dépendent du type d'observation réalisée, et peuvent parfois ne pas être supérieures au brouillage causé par un signal continu de même puissance moyenne. Pour une réponse du récepteur radioastronomique égale à -100 dB en limite de bande et une aire collectrice,  $A$ , de  $10^{-3} \text{ m}^2$ , la puissance moyenne reçue ne dépassera pas  $10^{-21} \text{ W}$  pour une puissance surfacique moyenne inférieure à  $10^{-13} \text{ W}/\text{m}^2$ . Cela correspond à des puissances surfaciques de crête d'environ  $10^{-9}$  à  $10^{-10} \text{ W}/\text{m}^2$ . Un gain en limite de bande de -100 dB peut donc permettre de travailler en présence de signaux radar intenses dans la bande adjacente. Par contre, les effets de surcharge pendant les impulsions peuvent être importants et induire des intermodulations dans les étages d'entrée du récepteur, comme cela est expliqué ci-dessous.

Afin d'obtenir une atténuation de la réponse en limite de bande de 100 dB par rapport au centre de la bande, la largeur du filtre à -3 dB doit être inférieure à la largeur de la bande attribuée à la radioastronomie. Comme les fréquences intermédiaires sont relativement basses (généralement entre 100 MHz et 1 GHz), il est possible d'assurer une sélectivité à flanc assez raide en limite de bande. La pente du filtre au niveau des fréquences de coupure dépend du nombre d'éléments du filtre et de la réponse voulue. Par exemple, un filtre ayant une largeur de bande à -3 dB égale à 75% de la largeur de bande à -100 dB est considéré comme un filtre à bords abrupts. Augmenter la pente de la courbe de réponse aux limites de la bande passante nécessite d'augmenter le nombre d'éléments du filtre, ce qui rend le filtre plus difficile à ajuster et accroît la variation de phase avec la température. Le filtrage ne fournit donc pas toujours une solution simple au problème de brouillage en limite de bande. Le fait de réduire la largeur de bande utilisable d'une bande de radioastronomie pose un problème crucial lorsqu'il s'agit d'observer des raies spectrales, puisque la totalité de la largeur de bande est généralement requise pour observer les déplacements des fréquences de raies et l'élargissement de la largeur de raie, qui résultent de l'effet Doppler et d'autres mécanismes. A noter que les bancs de filtres polyphases numériques peuvent apporter la stabilité et la raideur de pente requises et qu'ils sont insensibles aux variations de température. Ces systèmes sont de plus en plus courants dans les spectromètres modernes.

### 6.3.2 Effets de non-linéarité et intermodulation

Lorsque deux signaux (ou plus) sont présents simultanément à l'entrée du récepteur, tous deux étant situés hors de sa bande passante, ils peuvent quand même induire un signal dans la bande passante du récepteur du fait des non-linéarités dans les premiers étages. L'effet le plus important sera vraisemblablement celui de l'intermodulation du troisième ordre, dans laquelle les signaux de fréquences  $f_1$  et  $f_2$  voisines des limites de la bande passante génèrent une composante de fréquences  $(2f_1 - f_2)$  ou  $(2f_2 - f_1)$  à l'intérieur de cette bande.

Les caractéristiques d'intermodulation d'un amplificateur donné sont décrites de façon satisfaisante en termes d'interception d'intermodulation du troisième ordre à deux tonalités. Cette interception correspond au point d'intersection, sur une représentation logarithmique (sur les deux axes) de la puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée, de la droite représentant la réponse souhaitée de l'amplificateur et de celle représentant la réponse d'intermodulation. La puissance d'entrée en ce point est notée  $I_{IM}$ , et on adoptera ici une valeur de -40 dBW comme représentative d'un amplificateur à transistor de faible bruit dont le gain est d'environ 30 dB. Un signal brouilleur effectif de puissance  $\Delta P_H$  pourrait être dû à une intermodulation de signaux hors bande de puissance  $P_{IM}$  donnée par:

$$P_{IM} = (2I_{IM} + \Delta P_H)/3 \quad \text{dBW} \quad (6.2)$$

En reprenant les valeurs de  $\Delta P_H$  du Tableau 4.1 du Chapitre 4 et dans l'hypothèse où le gain de l'antenne de réception est de 0 dBi, on peut calculer les puissances surfaciques,  $S_{IM}$ , correspondantes. Le Tableau 6.2 donne les niveaux de puissance correspondant à certaines bandes attribuées à la radioastronomie à titre primaire, calculés à partir de la valeur de  $I_{IM}$  indiquée ci-dessus. Si la puissance surfacique à des fréquences voisines des bandes attribuées à la radioastronomie dépasse ces niveaux, les produits d'intermodulation résultants dépasseront les seuils de brouillage préjudiciable donnés dans le Tableau 4.1 du Chapitre 4. Il sera alors nécessaire de placer un filtre à l'entrée du récepteur. Un tel filtrage peut se traduire par une diminution de la sensibilité en raison de l'affaiblissement d'insertion supplémentaire qui, à l'entrée du récepteur, s'ajoute à la température de bruit du système. Mais de récentes améliorations des filtres mettant en oeuvre des matériaux supraconducteurs rendent le filtrage en entrée plus facile à réaliser dans les récepteurs de radioastronomie. Par ailleurs, la possibilité de répartir le gain et le filtrage de l'amplificateur d'entrée est actuellement à l'étude.

TABLEAU 6.2

Valeurs types de puissance et de puissance surfacique reçues pour deux signaux d'égale intensité susceptibles de causer des brouillages à un niveau préjudiciable par intermodulation

Fréquence centrale de la bande attribuée à la radioastronomie (MHz)	$P_{IM}$ (dBW)	$S_{IM}$ (dB(W/m <sup>2</sup> ))
325,3	-94	-82
1 413,5	-95	-71
4 995	-96	-60
10 650	-94	-52
15 375	-94	-49
23 800	-92	-43
43 000	-90	-36

### 6.3.3 Linéarité

Pour éviter les problèmes examinés au § 6.3.2, les récepteurs des radiotélescopes sont généralement conçus de telle sorte que la puissance totale dans la bande passante soit maintenue à une valeur inférieure au niveau de compression à 1% en tout point de la chaîne des étages d'amplification, des filtres, etc., entre l'antenne et la sortie du récepteur. En présence de signaux de forte intensité dont la fréquence est située en dehors de la bande attribuée à la radioastronomie, mais en son voisinage immédiat, un récepteur fonctionnant au point de compression à 1% est susceptible de générer des produits d'intermodulation de faible niveau dans cette bande. On préfère en outre utiliser un récepteur à caractéristiques quasi linéaires, car cela simplifie l'étalonnage du signal de sortie en fonction du niveau du signal d'entrée. Il est souhaitable de prévoir une «marge de sécurité» importante entre le niveau de la puissance d'exploitation et le niveau de puissance correspondant au point de compression à 1%, en particulier en présence d'un brouillage variable dans le temps. Le niveau de puissance en un point quelconque du récepteur varie en fonction du pointage de l'antenne et du niveau de brouillage, l'annulation à 0 dB de la «marge de sécurité» étant en principe impossible de par la conception du système. Si un terme quadratique est prédominant dans la caractéristique de réponse, le point de compression à 1% est généralement inférieur de 16 dB au point de compression à 1 dB, et inférieur de 26 dB au niveau d'interception du troisième ordre.

### 6.3.4 Filtrage et numérisation

L'effet de non-linéarité croissante que l'on observe dans les systèmes à gain élevé peut en partie être maîtrisé grâce à l'utilisation de filtres de plus en plus étroits sur le trajet du signal. Le filtrage peut se faire dans plusieurs étages du récepteur de radioastronomie et faire appel à des filtres analogiques et à des filtres numériques. La maîtrise de la linéarité par suppression offerte par un étage analogique donné doit simplement être suffisante

pour protéger la linéarité des étages d'amplification suivants dans la chaîne. Nous pouvons définir, pour l'étage  $i$  de la chaîne de traitement du signal, les paramètres suivants:

- $G_i(f)$ : rapport de puissances (gain)  $P_{out}(f)/P_{in}(f)$  au niveau de l'étage  $i$ , en fonction de la fréquence  $f$
- $N_i$ : facteur de bruit
- $P_{Nli}$ : puissance totale intégrée sur la fréquence à l'entrée de l'étage  $i$ , pour laquelle une non-linéarité dans cet étage entraînerait une compression de gain de 1%.

La condition permettant d'éviter la non-linéarité, par exemple au cinquième étage, est:

$$\int P_{in}(f) G_1(f) G_2(f) G_3(f) G_4(f) df + k T \int \{ [N_1(f) - 1] G_1(f) G_2(f) G_3(f) G_4(f) + [N_2(f) - 1] G_2(f) G_3(f) G_4(f) \} df < P_5 \quad (6.3)$$

où  $P_{in}(f)$  est la puissance d'entrée de l'antenne,  $k$  est la constante de Boltzmann,  $T = 290$  K, en supposant que le gain au niveau des deux premiers étages est suffisamment grand pour que la contribution de bruit des étages suivants puisse être négligée.

Dans la plupart des récepteurs de radioastronomie utilisés avec une antenne unique, les signaux sont traités dans un autocorrélateur en vue d'obtenir le spectre de la puissance totale. Dans le cas d'un réseau d'antennes, le traitement des signaux se fait dans un système de corrélation croisée. Dans ces deux cas, le signal FI est numérisé et le traitement ultérieur est de type numérique. Un filtre analogique antirepliement est requis en entrée du convertisseur analogique/numérique (A/N); il définit les fréquences de coupure du spectre FI et permet ainsi l'échantillonnage à une fréquence égale à deux fois la largeur de bande du signal, conformément au critère de Nyquist. Si l'on parvient à éviter la non-linéarité dans le système analogique ainsi que le repliement au niveau de la conversion A/N, un nouveau filtrage, de type numérique, peut être inséré avant l'étage d'autocorrélation ou de corrélation croisée. Les signaux brouilleurs atteignant les seuils de brouillage nuisible donnés dans la Recommandation UIT-R RA.769 (et dans les Tableaux 4.1 et 4.2) produisent dans le système FI des niveaux de signal inférieurs d'environ 40 à 80 dB à ceux présentant un danger de non-linéarité. Les signaux qui dépassent ces niveaux de quelques dizaines de décibels peuvent donc être convenablement rejetés par les filtres numériques si leur fréquence n'est pas située dans la bande attribuée à la radioastronomie. Les filtres numériques de type à réponse impulsionnelle finie peuvent présenter des pentes de coupure très raides en limite de bande et leur utilisation, combinée à celle de filtres analogiques dans les étages antérieurs, peut conduire à des niveaux de rejet supérieurs à 100 dB. Les filtres polyphases, qui effectuent la convolution entre le signal FI et une approximation numérique d'une fonction en sinus cardinal, sont particulièrement efficaces et se généralisent. Il est donc habituellement possible de concevoir des récepteurs de radioastronomie permettant de rejeter les brouillages dont les fréquences sont situées hors de la bande attribuée à la radioastronomie.

## 6.4 Brouillage par les émetteurs des services fonctionnant dans d'autres bandes

Les Recommandations UIT-R RA.517 «Protection du service de radioastronomie contre les émetteurs fonctionnant dans les bandes adjacentes» et UIT-R RA.611 «Protection du service de radioastronomie contre les rayonnements non essentiels» recensent certains des cas présentant un risque de brouillage du service de radioastronomie par des émetteurs fonctionnant dans des bandes adjacentes ou non adjacentes.

### 6.4.1 Services susceptibles de brouiller la radioastronomie par des effets de bandes adjacentes ou d'émissions d'harmoniques

La plupart des services actifs fonctionnant dans des bandes adjacentes aux bandes attribuées à la radioastronomie ou à des fréquences qui sont des sous-harmoniques de fréquences attribuées à la radioastronomie sont des sources potentielles de brouillage pour la radioastronomie. Mais la probabilité pour qu'un service induise un tel brouillage dépend fortement de la nature des émissions. Par exemple, les émissions des services fixe et mobile (sauf mobile aéronautique) posent rarement problème. Les services les plus susceptibles d'induire un brouillage par des effets d'intermodulation ou d'émission d'harmoniques comprennent

ceux dont la puissance de sortie est élevée comme la télédiffusion en ondes décimétriques. Les services émettant depuis des satellites peuvent également être à l'origine de graves problèmes par suite de la propagation en visibilité directe, et de la nécessité de réduire au minimum le poids embarqué, ce qui peut rendre la multiplication des filtres difficile et coûteuse. Les techniques qui provoquent l'apparition d'un large spectre de bandes latérales, comme celle de l'étalement du spectre à séquence directe, risquent en l'absence d'un filtrage convenable des bandes latérales non utilisées de dégrader très fortement les observations radioastronomiques.

#### **6.4.2 Le passage à la télévision numérique et son incidence sur l'utilisation non protégée des bandes de la radiodiffusion télévisuelle de Terre par le service de radioastronomie**

La télévision est aujourd'hui une forme de communication essentielle dans toutes les régions du monde. Depuis ses débuts, il y a plus de 60 ans, elle a montré son utilité en tant que source d'actualités, de divertissement et d'informations en situation d'urgence. La radiodiffusion télévisuelle de Terre dessert actuellement un public mondial qui se chiffre en milliards. A ce titre, ce service compte parmi les utilisateurs les plus ubiquitaires du spectre radioélectrique.

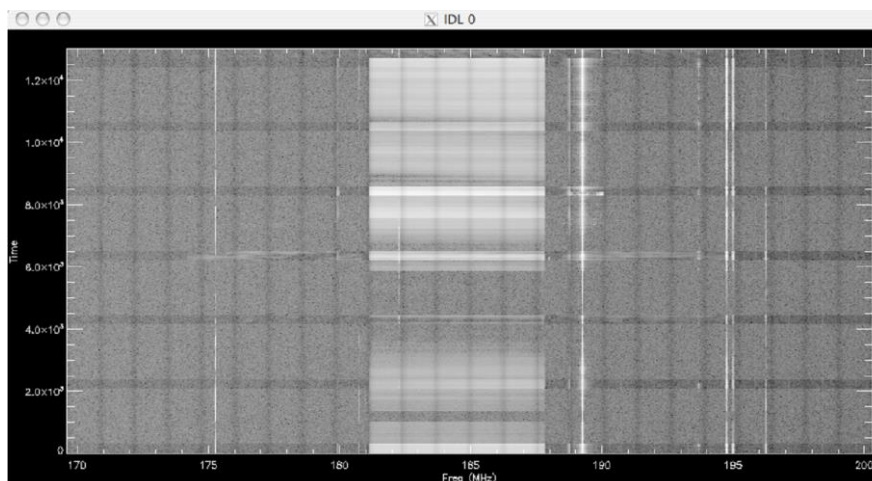
Le service de radioastronomie n'utilise en partage aucune attribution avec la radiodiffusion télévisuelle de Terre; cela étant, les signaux de radiodiffusion sont généralement émis à des fréquences qui sont d'une importance primordiale pour l'astrophysique à basses fréquences et pour l'observation de l'hydrogène neutre (HI) décalé vers le rouge, dont le rayonnement provient des tout premiers instants de la formation de l'Univers. Les radioastronomes effectuent aujourd'hui des observations dans les bandes réservées à la télévision, conformément au numéro 4.4 du Règlement des radiocommunications (RR).

A l'heure actuelle, de nombreux pays sont en train de passer des normes de la télévision analogique aux normes de la télévision numérique, et certains en profitent pour remanier leurs attributions au service de radiodiffusion en récupérant les fréquences ainsi libérées, qui constituent ce que l'on appelle le «dividende numérique». Il est prévisible que le passage au numérique viendra, par certains aspects, limiter les observations des radioastronomes actuellement effectuées sans protection contre les brouillages, dans les bandes de fréquences attribuées à la radiodiffusion télévisuelle de Terre (voir la Figure 6.3). Inversement, le passage au numérique pourrait aussi, par certains côtés, faciliter les observations passives dans les bandes utilisées par la télévision.

Les paragraphes qui suivent présentent en résumé les plans du passage à la télévision numérique dans plusieurs pays à travers le monde: d'un côté, ceux qui disposent déjà de programmes de radioastronomie fonctionnant à l'intérieur des bandes utilisées pour la radiodiffusion télévisuelle de Terre, de l'autre, les pays qui sont d'une importance stratégique pour de futures stations de radioastronomie en cours de conception ou de développement et pour lesquelles il est envisagé d'utiliser ces bandes de fréquences. On trouvera aussi une étude sur l'incidence des règles de service de la télévision numérique sur l'utilisation des bandes de la radiodiffusion télévisuelle par les radioastronomes.

FIGURE 6.3

**Exemple des effets des signaux de télévision numérique, par comparaison avec ceux des signaux de télévision analogique. Les spectres ont été obtenus sur un site de radioastronomie au cours d'une brève période de propagation très nettement renforcée. Les signaux de télévision provenaient d'un émetteur situé à 290 km environ**



Radio-Astro 63

Le signal numérique émis entre 181 et 188 MHz «remplit» beaucoup plus le spectre que ne le font les signaux de télévision analogique, qui occupent les plages de fréquences 174-181, 188-195 et 195-202 MHz et dont les spectres sont concentrés dans des porteuses discrètes acheminant la vidéo, la chrominance et l'audio.

#### 6.4.2.1 Australie

Le gouvernement australien a annoncé un programme de passage des émissions analogiques aux émissions numériques. Il est prévu que la télévision numérique occupe des fréquences existantes, déjà attribuées aux services de radiodiffusion, à l'intérieur des bandes III (174-230 MHz), IV (526-582 MHz) et V (582-820 MHz). Les services de radiodiffusion de la télévision de Terre australienne utiliseront, selon les plans, une grille de canaux de 7 MHz dans les bandes des ondes métriques et décimétriques. Les services numériques australiens émettront normalement avec une puissance apparente rayonnée (p.a.r.) maximale de 6 dB inférieure à celle des services de télévision analogique dans la même bande.

L'Australie ne bénéficiant pas d'attributions au service de radioastronomie dans ces bandes, les radiotélescopes sont situés dans des zones peu peuplées afin de réduire au minimum le risque de brouillage par les divers systèmes de radiocommunication, y compris la radiodiffusion. Le radiotélescope de Parkes effectue actuellement des observations dans la bande 700-764 MHz sans protection contre les brouillages. L'Australian Square Kilometre Array (SKA) Pathfinder (ASKAP) ou «télescope explorateur australien du réseau SKA d'un kilomètre carré» doit entrer en service en 2013; il exploitera la gamme de fréquences 700-1 800 MHz. Par ailleurs, l'Australie pourrait être choisie comme site pour le SKA.

#### 6.4.2.2 Brésil

Au Brésil, le passage de l'ensemble des systèmes d'émission de la télévision par radiodiffusion de Terre au format numérique est prévu pour le 29 juin 2016. Après cette date, toutes les émissions s'effectueront dans le créneau des ondes décimétriques 470-806 MHz.

#### 6.4.2.3 Japon

Au Japon, toutes les émissions de télévision par radiodiffusion de Terre sont passées au format numérique. Chaque canal de télévision occupe une largeur de bande de 6 MHz, tous les canaux étant désormais regroupés dans la bande 470-710 MHz (ondes décimétriques). Le pays dispose d'une seule station de radioastronomie (Hiraiso), dont le récepteur couvre la plage 500-2 500 MHz. Le Japon ne dispose pas de bande attribuée au

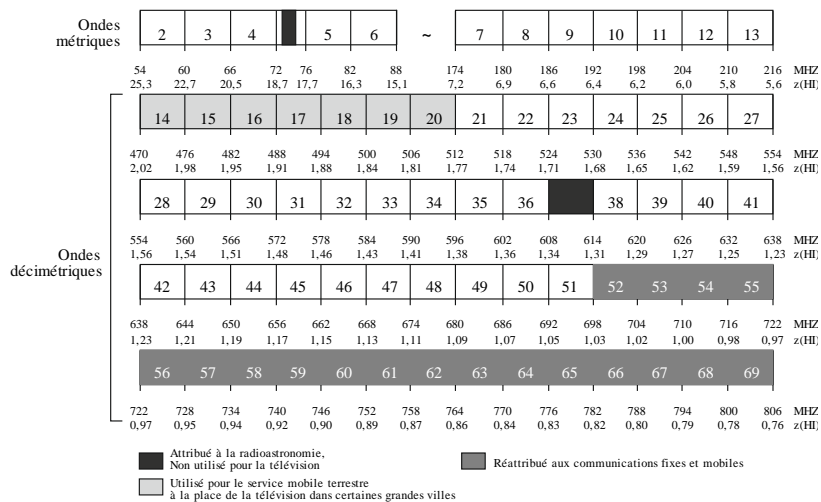
service de radioastronomie entre 470 et 710 MHz. La station de Hiraiso pourrait donc effectuer des observations entre ces deux fréquences à condition que les dispositions prévues au numéro 4.4 du RR soient respectées.

#### 6.4.2.4 Etats-Unis d'Amérique

Aux Etats-Unis d'Amérique, toutes les émissions de télédiffusion assurant un service complet (dit «full-service») ont été converties à la norme numérique ATSC (*Advanced Television Systems Committee/Comité de systèmes de télévision évolués des Etats-Unis*) le 12 juin 2009 ou avant à cette date. La Figure 6.4 illustre le spectre de la télédiffusion après le passage au numérique. On y trouve l'étendue en fréquences ainsi que le décalage vers le rouge correspondant à la raie spectrale de l'hydrogène à 1 420 MHz, z(HI), pour chaque canal.

FIGURE 6.4

#### Canaux de télévision utilisés aux Etats-Unis d'Amérique après le passage à la télévision numérique



RadioAstro\_64

Dans le cadre du passage au numérique, 18 canaux de télévision (52-69) représentant au total 108 MHz de spectre (698-806 MHz) ne seront plus utilisés pour la télédiffusion classique. Cet intervalle de fréquences, réattribué à titre primaire au service fixe et au service mobile, sera utilisé pour les systèmes hertziens de nouvelle génération, pour la transmission vidéo en mode FLO (*forward link only*/liaison aller seulement) directement vers les terminaux sans fil, et pour les systèmes de communication liés à la sûreté publique. Le canal de télévision 37 (608-614 MHz) est toujours attribué au service de radioastronomie à titre primaire et n'est plus attribué à la radiodiffusion; il est utilisé en partage avec les dispositifs de télémétrie médicale et de télécommande médicale à faible puissance fonctionnant dans la même bande.

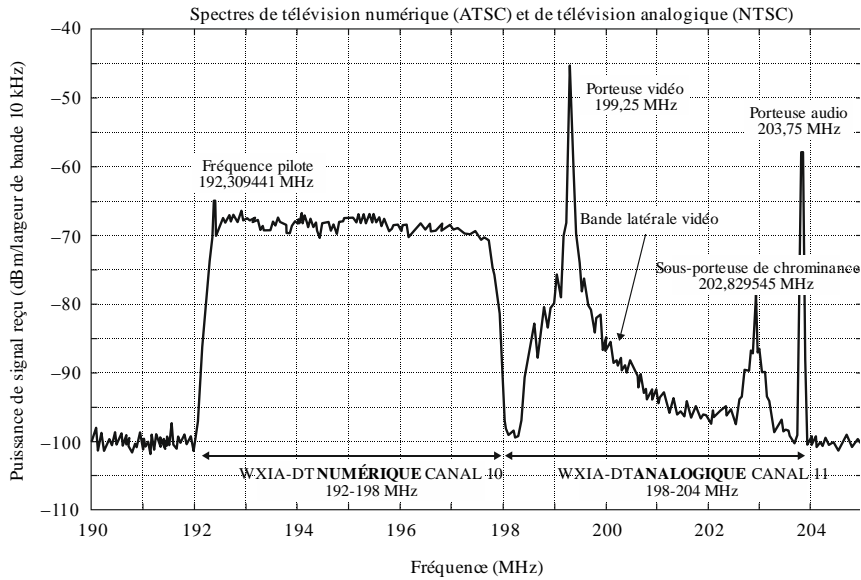
En examinant le tableau des allotissements de fréquences pour la télévision analogique, on constate que beaucoup moins de stations de télévision numérique occuperont la partie inférieure des ondes métriques, comparativement à la période précédant le passage au numérique. De façon générale, il est donc plus facile d'effectuer des observations de radioastronomie non protégées dans les gammes 54-72 MHz et 76-88 MHz, sachant toutefois que cela dépend de la présence de stations émettant sur les canaux 2-6 à proximité de la station de radioastronomie concernée.

La puissance d'émission totale nécessaire aux systèmes de télévision numérique est un peu inférieure à celle qui permettait d'assurer la couverture de l'ancien système analogique; elle est inférieure d'un facteur deux en ondes métriques et trois en ondes décimétriques environ. De plus, les limites applicables aux rayonnements non désirés émanant des stations de télévision numérique sont désormais mieux définies. Au-delà de 6 MHz par rapport à la limite de bande, l'affaiblissement doit être d'au moins 110 dB.

La Figure 6.5 compare directement le signal NTSC analogique et le signal ATSC numérique correspondant émis, au moyen de canaux de télévision adjacents, par une même station située sur la même tour.

FIGURE 6.5

**Comparaison directe du spectre ATSC numérique (à gauche) et du spectre NTSC analogique (à droite) transmis par la même station, à partir de la même tour et au même instant**



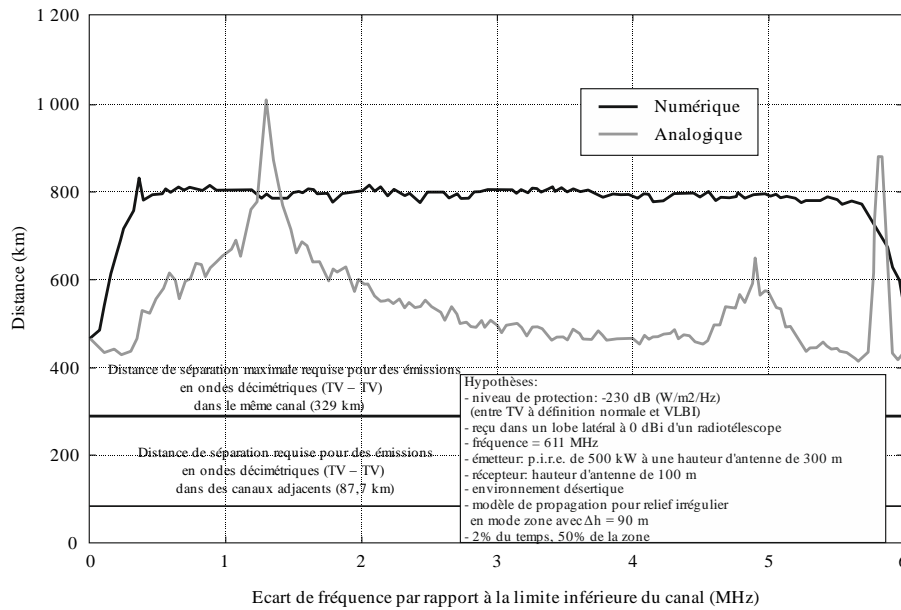
Radio-Astro\_65

Si la puissance du signal numérique est quelque peu inférieure à celle du signal analogique correspondant, ce dernier est néanmoins fortement concentré dans les porteuses des trois composantes. Sur plus de 94% du spectre, la densité spectrale de puissance du signal numérique dépasse celle du signal analogique, et ce d'un facteur allant jusqu'à 1 100 ( $> 30$  dB). Pour cette raison, on s'attend à ce qu'une fois le passage à la télévision numérique achevé, le signal numérique produit par une station de télévision donnée gêne davantage les observations opportunistes de radioastronomie dans la bande comparativement à l'ancien signal de type analogique. A titre d'illustration, la Figure 6.6 présente une comparaison de la distance de séparation théorique requise par rapport aux signaux de télévision analogique et aux signaux de télévision numérique pour que les niveaux de brouillage préjudiciable tirés de la Recommandation UIT-R RA.769 soient respectés.



FIGURE 6.6

**Distance de séparation minimale par rapport aux stations de télévision numérique et aux stations de télévision analogique permettant de respecter les limites de brouillage de la radioastronomie dans les hypothèses retenues**



Radio-Astro 6t

Les éléments relatifs à la télévision numérique sont tirés du Rapport UIT-R RA.2195, dans lequel on trouvera de plus amples informations.

### 6.4.3 Brouillages causés par des émissions de satellites

Les émissions de satellites sont susceptibles de perturber fortement le service de radioastronomie. En règle générale, les sources de brouillage terrestres se trouvent dans la partie du diagramme d'antenne du radiotélescope correspondant aux lobes latéraux éloignés; elles sont aussi susceptibles d'être atténuées par la topographie au voisinage de l'observatoire. En revanche, les signaux brouilleurs émis par les satellites risquent d'être reçus par les lobes latéraux les plus proches du faisceau central, qui présentent des valeurs de gain beaucoup plus élevées. La nature du brouillage dépend du type d'émetteur utilisé et du service fourni par le système à satellites concerné (satellites en orbite géostationnaire ou non géostationnaire) ainsi que du nombre de satellites de ce système qui se trouvent au-dessus de l'horizon vu depuis l'observatoire de radioastronomie. A noter que les problèmes de brouillage associés aux émissions de satellites se présentent aussi, dans une large mesure, dans le cas des aéronefs.

#### 6.4.3.1 Satellites géostationnaires

La quasi-totalité des radiotélescopes actuellement en service «voient» de multiples satellites géostationnaires, lesquels occupent la ceinture des satellites OSG de la voûte céleste. Le rayon de l'orbite des satellites géosynchrones est égal à environ 6,6 fois le rayon de la Terre. A cette distance, un seul et même satellite peut éclairer en visibilité directe un tiers de la surface de la Terre et donc de nombreux radiotélescopes. La Figure 4.3 du Chapitre 4 montre la position de la ceinture des satellites géosynchrones en coordonnées célestes, telle qu'on la voit depuis les latitudes de quelques grands observatoires de radioastronomie. Les plans de développement de certains services actifs prévoient l'utilisation d'un grand nombre de satellites géostationnaires. Les sources potentielles de brouillage susceptibles d'être captées par les lobes latéraux du radiotélescope situés à proximité du faisceau principal pourraient poser aux radioastronomes un problème inédit.

Les seuils de brouillages préjudiciables à la radioastronomie figurent à l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R RA.769. On y trouve, pour chaque bande de radioastronomie, la puissance reçue minimale susceptible

de causer un brouillage préjudiciable au récepteur. Cette Recommandation indique également les puissances surfaciques ( $\text{dB(W/m}^2\text{)}$ ) qui provoquent un brouillage nuisible, dans l'hypothèse où le gain du radiotélescope est égal à 0 dBi suivant la direction de la source brouilleuse. Cette valeur de gain ne convient que dans le cas des sources brouilleuses de Terre voisines de l'horizon. Dans le cas de sources géostationnaires, la situation est différente.

En supposant que l'antenne de radioastronomie présente des lobes latéraux de caractéristiques identiques à celles prises comme hypothèse dans la Recommandation UIT-R SA.509, le gain tombe à 0 dBi dans les lobes latéraux situés à  $19^\circ$  de l'axe du faisceau principal. Pour une antenne de ce type, le niveau de brouillage nuisible est dépassé si le faisceau principal est pointé à moins de  $19^\circ$  d'un satellite produisant, dans la largeur de bande attribuée à la radioastronomie, une puissance surfacique au niveau de l'observatoire égale au seuil de brouillage nuisible indiqué dans la Recommandation UIT-R RA.769. Un ensemble de satellites qui seraient espacés de  $30^\circ$  environ sur l'orbite des satellites géostationnaires et émettraient des brouillages de ce niveau empêcherait d'effectuer des observations de radioastronomie exemptes de brouillages nuisibles dans une zone centrée sur l'orbite OSG de largeur égale à  $38^\circ$  environ. La largeur de cette zone augmenterait avec le nombre de satellites brouilleurs gravitant en orbite et pourrait en principe s'étendre à la totalité du ciel. Pour connaître le nombre réel de satellites brouilleurs, il faut en fait déterminer si les signaux brouilleurs sont émis par les antennes des satellites ou s'ils sont rayonnés de manière plus large. Ainsi, une émission hors bande dont la fréquence n'est pas très éloignée de la fréquence d'émission d'un satellite sera probablement émise par son antenne de la même façon que les signaux utiles. Les rayonnements non désirés qui sont plus nettement espacés en fréquence (cas des harmoniques par exemple) risquent d'être émis sur une plus grande largeur, mais devraient être plus facilement supprimés par filtrage au niveau de l'émetteur.

Une solution au problème du brouillage par les satellites géostationnaires implique nécessairement un compromis entre l'interdiction d'une partie du ciel aux observations radioastronomiques et la difficile suppression des rayonnements non désirés émis par les satellites. L'examen de la Figure 4.3 du Chapitre 4 montre que la position de l'orbite géostationnaire dans le ciel vue depuis la Terre varie d'environ  $10^\circ$  lorsque l'on passe des observatoires d'un hémisphère à ceux de l'autre hémisphère. S'il est possible d'effectuer des observations jusqu'à  $5^\circ$  de l'orbite géostationnaire, chaque position du ciel est alors observable à partir d'au moins un observatoire existant, sous réserve qu'il soit convenablement équipé pour l'observation souhaitée. La question de l'opportunité de la réduction des rayonnements non essentiels en vue de permettre des observations radioastronomiques à moins de  $5^\circ$  de l'orbite des satellites géostationnaires est examinée au Chapitre 4.

La présente analyse des rayonnements émis par les satellites géostationnaires repose sur l'hypothèse selon laquelle les orbites appartiennent au plan équatorial terrestre. Cependant, à des fins de coordination des fréquences, une définition des satellites géostationnaires inscrit à leur nombre tous les satellites géosynchrones présentant un angle d'inclinaison inférieur à  $15^\circ$ . L'incidence de l'inclinaison orbitale sur les considérations de coordination des fréquences pour les observations radioastronomiques dépendra de la distribution des angles d'inclinaison des satellites potentiellement brouilleurs.

#### **6.4.3.2 Satellites non géostationnaires**

Le risque de brouillage nuisible causé par des satellites en orbite terrestre basse (OTB) non géostationnaires est fortement augmenté par le fait que ces satellites sont exploités en grand nombre et que plusieurs d'entre eux peuvent donc se trouver simultanément au-dessus de l'horizon d'un observatoire de radioastronomie, en visibilité directe de l'antenne du radiotélescope. Ainsi, les nombreux lobes latéraux proches ou éloignés ainsi que le lobe principal de l'antenne du radiotélescope risquent de capter des rayonnements non désirés provenant de satellites OTB non géostationnaires visibles. Le continu changement de direction des signaux brouilleurs incidents et la nécessité, pour l'antenne du radiotélescope, de suivre la source céleste observée compliquent le problème posé par le brouillage. La réception de nombreux signaux intenses peut déplacer le point de fonctionnement du récepteur dans une région non linéaire, générant ainsi des produits d'intermodulation.

L'incidence des rayonnements non désirés produits au niveau des sites de radioastronomie par une constellation de satellites en orbite non géostationnaire (basse) peut être déterminée à l'aide de la méthode fondée sur le concept de puissance surfacique équivalente (epfd) décrite la Recommandation UIT-R S.1586 «Calcul des niveaux de rayonnements non désirés produits par un système à satellites non géostationnaires du service fixe par satellite au niveau des sites de radioastronomie» ou dans la Recommandation UIT-R M.1583 «Calcul des brouillages produits par un système à satellites non géostationnaires du service mobile par satellite ou du

service de radionavigation par satellite au niveau des sites de radioastronomie», et en utilisant les gains d'antenne indiqués dans l'Annexe 1 du Chapitre 4.

Ces Recommandations peuvent être utilisées pour déterminer le pourcentage de perte de données enregistré au cours des observations effectuées sur un site de radioastronomie particulier en raison de brouillages causés par un système à satellites donné. Le pourcentage de perte de données maximal admissible est défini dans la Recommandation UIT-R RA.1513.

#### 6.4.3.2.1 Exemple de rayonnements non désirés produits par le service fixe par satellite

La bande 10,6-10,7 GHz est attribuée au SRA à titre primaire; la sous-bande 10,68-10,7 GHz est attribuée en exclusivité aux services passifs (le numéro **5.340** du RR, qui énumère un certain nombre de bandes dans lesquelles toutes les émissions sont interdites, s'applique).

Cette bande a été utilisée avec succès pour l'observation du spectre radioélectrique continu des émissions galactiques et extragalactiques (y compris du point de vue des propriétés de polarisation) et pour la recherche de pulsars.

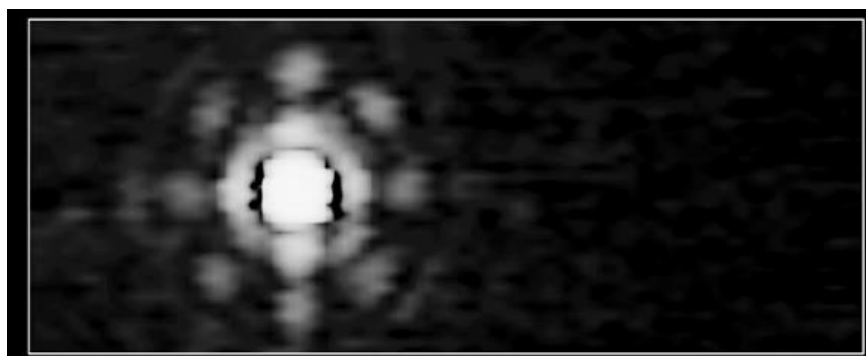
La bande 10,7-11,7 GHz est attribuée au SFS à titre primaire. L'utilisation des bandes 10,7-10,95 GHz (espace vers Terre) et 11,2-11,45 GHz (espace vers Terre) par les systèmes du SFS géostationnaires est conforme aux dispositions de l'Article **10** de l'Appendice **30B** du RR.

Un cas de brouillage causé aux opérations du SRA mettant en oeuvre un système à satellites géostationnaires du SFS est décrit ci-dessous.

On trouvera sur la Figure 6.7 les résultats d'une mesure de radioastronomie effectuée à 10,6 GHz par le radiotélescope d'Effelsberg (100 m de diamètre) observant la source 3C84, l'une des plus intenses radiosources ponctuelles d'origine cosmique. Cette mesure a été faite avant 1995. La dimension du champ était de  $30 \times 12$  min d'arc et la densité de flux de  $20,5 \text{ Jy}$  ( $\sim -247 \text{ dB(W(m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}))$ ). La structure visualisée correspond au faisceau principal du radiotélescope et aux lobes latéraux proches.

FIGURE 6.7

**Cartographie de la source extragalactique 3C84 observée dans la bande 10,6-10,7 GHz par le radiotélescope d'Effelsberg de 100 m de diamètre**



Radio-Astro\_67

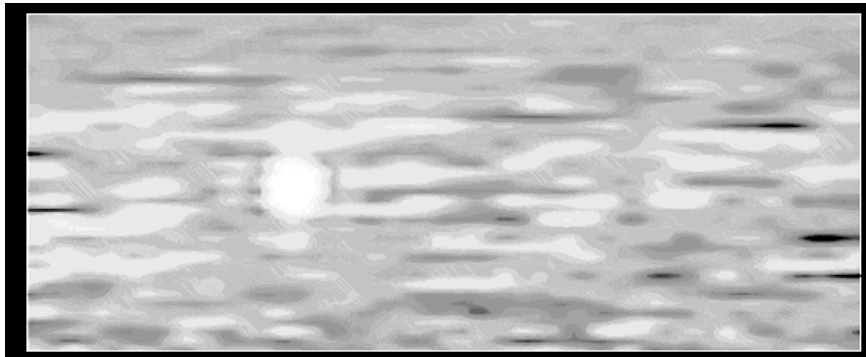
Par la suite, en 1995, un satellite géostationnaire du SFS a été mis en service à une certaine position orbitale qu'avaient déjà occupée d'autres satellites pendant une certaine période. Sa fréquence centrale d'émission inférieure et la largeur de bande du répéteur étaient respectivement égales à 10,714 GHz et 26 MHz. La fluctuation de bruit résultante due aux rayonnements non désirés produits par ce satellite du SFS dans la bande adjacente 10,6-10,7 GHz attribuée au SRA était si importante qu'elle masquait complètement tout signal de radioastronomie.

La Figure 6.8 illustre l'observation du ciel obtenue pour un champ de  $30 \times 12$  min d'arc identique à celui de la Figure 6.7, mais après la mise en service du satellite en 1995 sur une position orbitale espacée de  $10^\circ$  par

rapport au champ céleste cartographié. La source ponctuelle 3C84 très intense, noyée par les brouillages, n'est plus une source cosmique clairement discernable.

FIGURE 6.8

**Cartographie de la même portion de champ céleste que sur la Figure 6.3, mais en présence de signaux brouilleurs reçus par le radiotélescope d'Effelsberg**



Radio-Astro\_68

Pour étudier cette situation de brouillage, la station de contrôle de satellites de Leeheim, qui appartient à l'autorité de régulation allemande, a mesuré le spectre des émissions produites par le satellite du SFS placé sur la position orbitale considérée afin de déterminer le niveau des rayonnements non désirés parvenant dans la bande de radioastronomie (voir la Figure 6.8). Il convient de noter cependant que la sensibilité et la dynamique de la station de contrôle n'étaient, à l'époque, pas suffisantes pour vérifier la conformité des niveaux de brouillage aux critères de protection du SRA indiquée dans la Recommandation UIT-R RA.769.

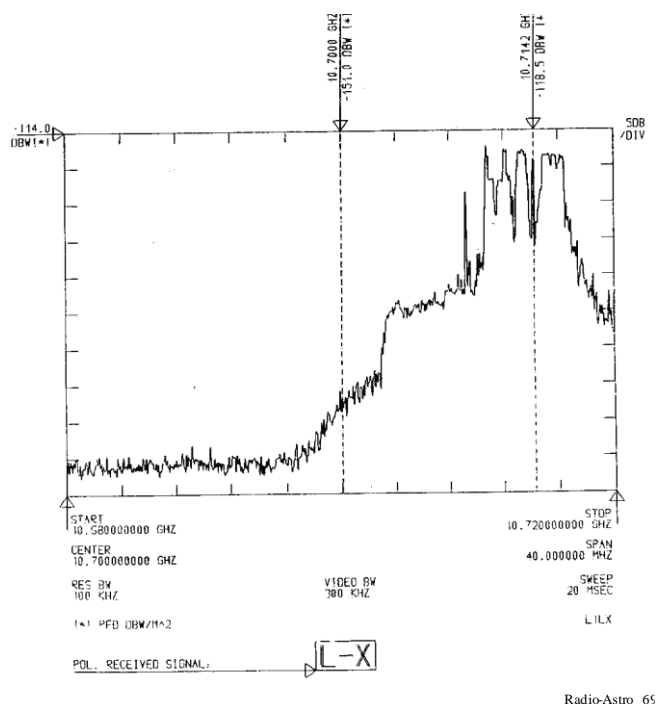
Il ressort de la Figure 6.9 qu'à la limite 10,7 GHz de l'attribution faite au SRA, dans la bande attribuée en exclusivité aux services passifs, le niveau mesuré des rayonnements non désirés est de  $-151 \text{ dB(W/m}^2)$  dans une largeur de bande de référence de 100 kHz. Ce chiffre correspond à la valeur  $-201 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz))}$ , alors que la Recommandation UIT-R RA.769 donne une valeur inférieure de 39 dB,  $-240 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz))}$ , comme seuil de brouillage. Il est en outre souhaitable d'appliquer des limites plus contraignantes inférieures de 12-15 dB dans le cas de satellites géostationnaires, comme on l'a indiqué au § 4.7.3. Ce dépassement important des limites de brouillage se produit en limite supérieure de la bande 10,6-10,7 GHz et s'atténue dans le reste de la bande.

Entre la limite de bande à 10,7 GHz et environ 10,69 GHz, fréquence à laquelle la puissance du signal brouilleur devient égale au bruit de fond de la station de contrôle de Leeheim (puissance surfacique (pfd)  $\sim -160 \text{ dB(W/m}^2)$ ), la décroissance du signal est d'environ 10 dB par 4 MHz. En supposant que ce taux de décroissance soit applicable jusqu'à 10,6 GHz, on peut estimer que la puissance totale émise depuis la position orbitale du satellite dans la bande 10,6-10,7 GHz est égale à  $-145,6 \text{ dB(W/m}^2)$ , valeur supérieure de 14,4 dB au seuil de  $-160 \text{ dB(W/m}^2)$  donné dans la Recommandation UIT-R RA.769 pour cette bande. L'intégralité de la bande 10,6-10,7 GHz est donc devenue totalement impropre aux observations de radioastronomie, comme le confirme l'examen de la Figure 6.8.

A noter que ce satellite du SFS a été déplacé vers une position de stationnement différente et qu'il ne perturbe plus les observations du télescope d'Effelsberg.

FIGURE 6.9

Mesure au niveau de la station de contrôle de Leeheim des brouillages causés par un satellite géostationnaire du SFS (1995)



6.4.3.3 Cas potentiels de brouillage par les harmoniques des émissions des satellites

6.4.3.3.1 Rayonnement sur la deuxième harmonique par les satellites de radiodiffusion dans la bande 23,6-24,0 GHz

Un des modes possibles de brouillage de la radioastronomie est le rayonnement sur la deuxième harmonique par les satellites de radiodiffusion émettant dans la bande 11,7-12,5 GHz. L'intervalle harmonique 23,4-25,0 GHz englobe la bande 23,6-24,0 GHz attribuée en exclusivité aux services passifs. Pour les Régions 1 et 3, l'Annexe 3 de l'Appendice 30 du RR spécifie, pour la réception individuelle dans la bande 11,7-12,5 GHz, une puissance surfacique maximale de  $-103 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$  en limite de la zone de couverture, ce qui correspond normalement à une puissance surfacique de  $-100 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$  au centre de cette zone. Ces valeurs limites sont applicables à chaque canal du SRS. La puissance surfacique totale dans la bande 11,8-12,0 GHz peut s'élever à  $-91 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ .

D'après le Tableau 4.1, les observations de radioastronomie subirait un brouillage nuisible si la puissance surfacique des signaux était supérieure à  $-147 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$  dans une largeur de bande de 400 MHz, à une fréquence de 24 GHz. Pour un gain de lobe latéral d'antenne radioastronomique de 0 dBi, la suppression requise de la deuxième harmonique est alors de 56 dB, ce qui peut être obtenu par des techniques de conception éprouvées.

#### **6.4.3.3.2 Rayonnement sur la deuxième harmonique par le SFS au voisinage de 22,2 GHz**

Une situation semblable à celle qui a été décrite au § 6.4.3.2.1 se présente dans la bande d'observation radioastronomique de la vapeur d'eau à 22,2 GHz, mais les puissances surfaciques admissibles à la surface de la Terre sont plus faibles pour les émetteurs du SFS que pour le SRS, et les problèmes de brouillage sont donc moins importants. Cela s'applique également aux bandes passives 15,35-15,4 GHz et 164-168 GHz qui contiennent aussi les deuxièmes harmoniques de fréquences attribuées aux transmissions espace vers Terre.

#### **6.4.3.3.3 Rayonnement sur la deuxième harmonique par le service de radiorepérage par satellite et par le SMS dans la bande 4 990-5 000 MHz**

La bande 2 483,5-2 500 MHz a été attribuée au service de radiorepérage par satellite et au SMS (service mobile par satellite) pour les liaisons descendantes des satellites vers les stations des utilisateurs. Les deuxièmes harmoniques de ces émissions recouvrent la bande 4 990-5 000 MHz (4 950-5 000 MHz, en Argentine, en Australie et au Canada) attribuée à titre primaire dans le monde entier à la radioastronomie. Le seuil de brouillage nuisible applicable à la radioastronomie dans la bande 4 990-5 000 MHz est de  $-171$  dB(W/m<sup>2</sup>) d'après le Tableau 4.1.

#### **6.4.3.3.4 Rayonnement sur la troisième harmonique par le service de météorologie par satellite dans la bande 1 400-1 427 MHz**

Certains satellites de météorologie utilisent la bande 460-470 MHz pour interroger les plates-formes sur Terre et retransmettre les données ainsi obtenues vers des centres de collecte de données. La troisième harmonique de ces émissions au-dessus de 466 MHz se retrouve dans la bande 1 400-1 427 MHz attribuée à la radioastronomie. La puissance de ces émissions peut aller jusqu'à 40 W. Dans l'hypothèse d'un satellite géostationnaire avec un gain d'antenne émettrice de 0 dBi pour la troisième harmonique, la puissance surfacique sur Terre à la verticale du satellite est de  $-146$  dB(W/m<sup>2</sup>). En supposant que la réception s'effectue sur les lobes latéraux à 0 dBi d'une antenne radioastronomique, l'atténuation de l'harmonique doit être d'au minimum  $-34$  dB par rapport à l'intensité d'émission fondamentale.

### **6.5 Emissions non désirées causées par la modulation à large bande**

Voir la Recommandation UIT-R RA.1237 «Protection du service de radioastronomie contre les rayonnements non désirés produits par des systèmes».

#### **6.5.1 Utilisation de la modulation à large bande**

Dans certains types de transmissions, souvent associées aux données numériques, les bandes latérales de spectre engendrées couvrent un intervalle fréquentiel beaucoup plus large que celui qui est utilisé pour la réception des signaux. En particulier, la modulation par déplacement de phase (MDP) numérique produit un spectre de puissance de la forme  $[\sin(\pi x)/\pi x]^2$ , avec des maxima secondaires récurrents à l'extérieur de la bande utile, qui ne diminuent que lentement avec la fréquence. Si, en général, seul le maximum central du spectre est utilisé en réception par le service concerné, les bandes latérales sont parfois rayonnées sans filtrage effectif. L'enveloppe des bandes latérales non filtrées, située par exemple à une distance égale à dix fois la largeur de bande à  $-3$  dB par rapport à la fréquence centrale, affiche une puissance qui n'est que de 29 dB inférieure à la puissance du maximum central. Si, de plus, la fréquence de modulation d'une émission en MDP-2 est comprise entre 10 et 20 MHz, les dix largeurs de bande en question couvrent alors plusieurs centaines de MHz autour de la fréquence assignée. Considérons par exemple un émetteur MDP-2 simple sans filtrage fonctionnant avec une fréquence de modulation de 10 MHz centrée sur 1 615 MHz, avec une puissance de sortie de 40 W rayonnant à travers une antenne isotrope montée sur un aéronef. A une distance de 400 km en visibilité directe d'un observatoire, les bandes latérales non désirées engendreraient aux maxima spectraux de la bande 1 400-1 427 MHz attribuée à la radioastronomie une puissance surfacique supérieure de 48 dB au seuil de brouillage nuisible correspondant indiqué dans le Tableau 4.1. L'émission dans les bandes 1 610,6-1 613,8 et 1 660-1 670 MHz, également attribuées à la radioastronomie, se situerait à un niveau nettement supérieur.

La technique MDP est également utilisée en modulation par étalement du spectre à séquence directe. La plupart des techniques d'étalement de spectre sont caractérisées par un signal à bande large et à faible densité spectrale de puissance. Cette caractéristique réduit la probabilité que des émissions de ce type viennent brouiller des systèmes de communication conventionnels à bande étroite, qui ne présentent d'autre intérêt que celui de

l'extraction d'une modulation à partir d'un signal. Mais en radioastronomie, le but est de mesurer avec précision la puissance provenant des radiosources naturelles. Or les ondes radioélectriques d'origine cosmique ont généralement les caractéristiques d'un bruit aléatoire, et, de plus, on doit souvent utiliser des récepteurs à bande large pour atteindre la sensibilité requise. Il est par conséquent souvent impossible de distinguer les signaux à spectre étalé des signaux d'origine cosmique. Les seuils de puissance surfacique nuisible applicables à la radioastronomie indiqués au Chapitre 4 s'appliquent aussi bien à des rayonnements non désirés qu'à des émissions intentionnelles et à tous les types de modulation, y compris celui dont il a été question ci-dessus.

### 6.5.2 Mise en forme des impulsions en vue de réduire les rayonnements non désirés

La mise en forme des impulsions, c'est-à-dire l'utilisation de formes d'impulsions évitant les transitions d'amplitude ou de phase brutales et quasi rectangulaires, permet de réduire considérablement les niveaux de rayonnements non désirés dus à la modulation numérique. Un théorème sur les transformées de Fourier énonce que si la forme d'onde des impulsions dans le domaine temporel devient de type impulsif à la dérivée  $n^{\text{ième}}$ , alors le niveau des lobes latéraux diminue dans le domaine de la densité spectrale de puissance comme l'inverse de la fréquence à la puissance  $2n$ . Dans le cas d'impulsions rectangulaires dans le domaine temporel, la forme d'ondes des impulsions devient de type impulsif pour sa dérivée première ( $n = 1$ ), les lobes latéraux diminuant alors en  $f^{-2}$ , comme dans le cas de la fonction sinus cardinal au carré susmentionnée. Considérons à titre d'exemple de la mise en forme des impulsions le cas d'impulsions dont on remplace les transitions rectangulaires d'amplitude unité par la fonction  $[1 + \sin(x)]/2$  ( $x$  variant linéairement de  $-\pi/2$  à  $\pi/2$  pour les transitions positives et de  $\pi/2$  à  $-\pi/2$  pour les transitions négatives). La forme d'onde résultante devient de type impulsif à sa dérivée troisième et la densité spectrale de puissance décroît donc en  $f^{-6}$ . Ce résultat a été démontré par Ponsoy [1994]. Par exemple, si pour des impulsions rectangulaires, la diminution de l'enveloppe de la densité spectrale de puissance par rapport à sa valeur maximale est de  $-20$  dB pour une certaine fréquence, elle sera de  $-60$  dB pour cette même fréquence dans le cas de la forme d'onde sinusoïdale précédemment décrite. Un tel résultat est très intéressant, puisque l'intervalle de fréquence dans lequel les rayonnements non désirés induits par le processus de modulation risquent de causer des brouillages nuisibles aux observations de radioastronomie se trouve fortement réduit. De nombreuses autres fonctions utiles pour la mise en forme des impulsions aux fins de diminution des niveaux de rayonnements non essentiels ont été décrites; on citera ainsi la modulation par déphasage minimal à filtre gaussien (MDMG) [Murota et Hirade, 1981; Otter, 1994].

L'utilisation des techniques de modulation destinées à réduire au minimum les rayonnements non désirés ne peut être efficace que si les caractéristiques des étages d'amplification de puissance qui suivent l'étage de modulation sont suffisamment linéaires pour éviter que ces rayonnements ne soient générés sous la forme de produits d'intermodulation. Cette problématique se pose en particulier pour les émissions par satellite, la limitation de la puissance électrique risquant en effet de conduire à la maximisation de l'efficacité de l'émetteur aux dépens de la linéarité. Certains satellites de communication émettent sur les liaisons descendantes via plusieurs faisceaux aux fins de la réutilisation des fréquences. Ces faisceaux sont formés grâce aux déphasages appropriés d'un grand nombre d'éléments rayonnants, alimentés chacun par un amplificateur de puissance distinct. Il apparaît que dans ce cas, le filtrage des signaux amplifiés pour supprimer les rayonnements non désirés n'est pas toujours aisé.

### 6.5.3 Exemple de brouillage par une modulation à large bande

La série des satellites de radiopérage GLONASS [Daly 1988; Ponsoy, 1991] constitue une source de brouillage des observations de radioastronomie dans les bandes 1 610,6-1 613,8 MHz et 1 660-1 670 MHz depuis le milieu des années 1980 [Galt, 1990]. Le système intégralement déployé comprend 24 satellites évoluant sur trois plans orbitaux. On prévoyait initialement l'utilisation de 24 canaux de transmission caractérisés par des fréquences centrales s'étageant de 1 602,5625 MHz à 1 615,5 MHz à un pas de 0,5625 MHz. Le brouillage est causé par les canaux des satellites situés bien en dehors des bandes attribuées à la radioastronomie, en raison des bandes latérales engendrées par la modulation par étalement du spectre. La structure de la densité spectrale des bandes latérales se répète à intervalles de 0,511 et 5,11 MHz résultant respectivement des fréquences de modulation des codes à basse et haute précision. La structure principale des bandes latérales présente une série de maxima espacés de 5,11 MHz, avec des pointes étroites qui se produisent entre certains maxima. Certaines de ces «pointes» apparaissent à des fréquences très éloignées du canal de transmission et se retrouvent même dans la bande 1 660-1 670 MHz attribuée à la radioastronomie.

Une suite d'essais a été effectuée par l'administration du système GLONASS en collaboration avec l'IUCAF en novembre 1992. Les satellites utilisant des canaux de transmission proches de la bande 1 610,6-1 613,8 MHz ont été décalés en fréquence ou désactivés par étapes. Quinze observatoires répartis à travers le monde ont participé à l'évaluation des effets de ces modifications du système GLONASS sur la qualité des données astronomiques. L'évaluation des résultats a constitué la base d'accords formels entre l'administration du système GLONASS, l'IUCAF et plusieurs gouvernements nationaux. Ces accords décrivent une solution exhaustive au problème des brouillages générés par GLONASS dans les bandes de la radioastronomie. Cette solution consiste:

- à réduire le nombre de canaux de fréquences nécessaires en utilisant le même canal pour les satellites antipodaux;
- à décaler vers le bas les fréquences assignées des canaux en les éloignant de la bande de la radioastronomie; et
- à appliquer un filtrage au-delà du premier zéro du spectre étalé du canal à fréquence la plus élevée.

Depuis la conclusion de l'accord GLONASS-IUCAF, aucun engin spatial ayant une capacité de fréquence supérieure à 1 610 MHz n'a été lancé, et tous possèdent des filtres hors bande. Après 1999, les principales émissions brouilleuses se produisant dans la bande des 1 612 MHz attribuée à la radioastronomie ont été éliminées. L'accord GLONASS-IUCAF a été expressément reconnu dans le Règlement des radiocommunications; ainsi, le Tableau 1-2 de l'Annexe 1 à la Résolution 739 (Rév.CMR-07) précise: «La présente Résolution ne s'applique pas aux assignations actuelles ou futures du système GLONASS/GLONASS-M du service de radionavigation par satellite dans la bande 1 559-1 610 MHz, quelle que soit la date de réception des renseignements de coordination ou de notification correspondants, selon le cas. La protection du service de radioastronomie dans la bande 1 610,6-1 613,8 MHz est assurée et continuera d'être conforme à l'accord bilatéral conclu entre la Fédération de Russie, l'Administration qui a notifié le système GLONASS/GLONASS-M et l'IUCAF ainsi qu'aux accords bilatéraux ultérieurs conclus avec d'autres administrations.»

#### **6.5.4 Exemple: Brouillages radioélectriques causés par le système SMS IRIDIUM (HIBLEO-2)**

Le présent paragraphe est tiré du Rapport 171 du CCE, qui fournit des informations très détaillées sur la méthodologie et les mesures.

##### **6.5.4.1 Exploitation du SRA dans la bande 1610,6-1613,8 MHz**

La bande 1 610,6-1 613,8 MHz est attribuée au service de radioastronomie à titre primaire. Elle est utilisée pour les observations des raies spectrales du radical oxyhydrile (OH, *hydroxyl radical*). La raie OH, qui a une fréquence de repos de 1 612 MHz, est une des plus importantes raies spectrales pour la radioastronomie, et figure comme telle dans la Recommandation UIT-R RA.314. Premier radical cosmique à être détecté à des fréquences radioélectriques (1963), la molécule OH continue d'être un puissant outil de recherche. A son état fondamental, elle produit quatre raies spectrales aux fréquences 1 612, 1 665, 1 667 et 1 720 MHz (valeurs approchées), qui ont toutes été observées, en émission et en absorption, tant dans notre Galaxie que dans d'autres galaxies externes. L'étude des raies OH fournit des informations sur une large gamme de phénomènes astronomiques, par exemple, sur la formation de protoétoiles et sur l'évolution des étoiles. Pour interpréter la plupart des observations faites sur la molécule OH, il est nécessaire de mesurer la puissance relative de plusieurs de ces raies. La perte de capacité d'observation de l'une quelconque de ces raies empêchera l'étude de ces classes de phénomènes physiques.

##### **6.5.4.2 Description de la constellation du système IRIDIUM**

Le service mobile par satellite (Terre vers espace) est attribué dans la bande **1 610,0-1 626,5 MHz** et le service mobile par satellite (espace vers Terre) dispose d'une attribution à titre **secondaire** dans la bande **1 613,8-1 626,5 MHz**. Le numéro **5.208B** dispose que la Résolution **739** (CMR-07) s'applique aux futurs systèmes en projet, pour cette bande.

Le système IRIDIUM repose sur 66 satellites OTB (orbite terrestre basse), qui assurent des communications de type utilisateur vers utilisateur, utilisateur vers passerelle et passerelle vers passerelle. Les 66 satellites sont uniformément répartis sur six plans orbitaux avec une inclinaison de 86,4°, chaque plan comprenant en outre



un satellite de rechange en orbite. A l'exception des plans 1 et 6, les plans orbitaux sont espacés de  $31,6^\circ$  et leurs satellites gravitent dans le même sens. Quant aux premier et dernier plans, ils sont espacés de  $22^\circ$  et forment une couture (*seam*) sur les bords de laquelle les satellites tournent en sens opposé. Les satellites évoluent en orbite à une altitude de 780 km et présentent une période orbitale de 100 min 28 s environ.

Les satellites communiquent dans la bande 1 618,25-1 626,5 MHz avec des équipements mobiles spéciaux situés au sol et en altitude, et offrent un service de communications mondial qui couvre la totalité du globe.

#### 6.5.4.3 Nature et caractéristiques des brouillages causés par le système IRIDIUM

Les calculs théoriques effectués en 1998 sur la constellation IRIDIUM (HIBLEO-2) dans des conditions fictives de pleine charge sont récapitulés dans la Recommandation UIT-R SM.1633, à l'Annexe 6:

##### «4.2 Calcul du niveau de brouillage

*Les rayonnements non désirés en terme de la densité spectrale de puissance surfacique cumulative des émissions du satellite HIBLEO-2 dans la bande 1 610,6-1 613,8 MHz ont été estimés théoriquement à une gamme comprise entre -214 dB(W/(m<sup>2</sup>/Hz)) et -223 dB(W/(m<sup>2</sup>/Hz)) sur certains sites de radioastronomie, dans des conditions de pleine charge.»*

Les brouillages causés par les satellites IRIDIUM dans la bande 1 610,6-1 613,8 MHz ne sont pas dus à une surcharge des récepteurs de radioastronomie, mais à des produits d'intermodulation d'ordre 7 générés à bord des satellites. L'analyse des spectres de brouillage captés par le télescope Effelsberg (rapport du 1/3/2006) montre que les deux porteuses fondamentales du système IRIDIUM,  $f_1 = 1\ 618,25$  MHz et  $f_2 = 1\ 620,25$  MHz, produisent le brouillage observé à la fréquence 1 612,25 MHz, ce qui correspond à la relation intermodale  $f_1 - 3df = 4f_1 - 3f_2$  et semble donc indiquer un produit d'intermodulation d'ordre  $4 + 3 = 7$ . Aucun élément qui attesterait de produits d'ordre inférieur à 1,61425 et 1,61625 GHz n'a été trouvé. Les amplificateurs et les mélangeurs classiques produisent en règle générale un schéma de brouillage dans lequel la puissance des produits d'intermodulation décroît à mesure que l'ordre augmente. Les ordres d'intermodulation inférieurs (de 3 à 5) sont manifestement éliminés par traitement du signal à bord des satellites, tandis que les produits d'ordre supérieur sont toujours observables.

Les amplificateurs hyperfréquences et les récepteurs de radioastronomie les plus récents possèdent des points d'interception du troisième ordre (IIP<sub>3</sub>) compris entre -30 et -25 dBm. La porteuse principale, à -178 dBm, d'un satellite IRIDIUM (telle qu'elle est observée) ne peut pas créer d'autobrouillage détectable dans l'étage d'entrée d'un récepteur de radioastronomie. L'intensité du brouillage permet de calculer une valeur approchée du point d'interception du septième ordre pour l'émetteur du satellite: on obtient une valeur de +19 dBW environ, ce qui est proche de la p.i.r.e. du satellite (+11 dBW). Ce résultat conduit à penser que l'émetteur du satellite a été amené à effectuer une compression et qu'il produira d'intenses émissions hors bande de part et d'autre de la bande IRIDIUM. Dans le cas de certaines attributions de canaux de transmission, les produits d'intermodulation du septième ordre se trouveront dans la bande attribuée au SRA.

#### 6.5.4.4 Mesures et contrôle

En 1998, lors d'un programme d'essais collaboratif dirigé par HIBLEO-2 (IRIDIUM) et l'Observatoire national de radioastronomie des Etats-Unis d'Amérique (NRAO, United States National Radio Astronomy observatory), on a mesuré des valeurs de densité spectrale de puissance surfacique allant de -220 à -240 dB(W/(m<sup>2</sup>/Hz)) sur ces sites. Ces valeurs se rapportent à ce qu'on appelle des canaux vocaux qui sont activés lorsque survient une communication. De plus, les chercheurs ont constaté que le système HIBLEO-2 rayonne à tout moment des signaux de radiodiffusion. Le spectre des canaux de radiodiffusion affichait de 9 à 10 pics étroits (de moins de 40 kHz de large) dans la bande attribuée à la radioastronomie. Les valeurs de crête de la densité spectrale de puissance surfacique apparaissaient en moyenne à -227 dB (W/(m<sup>2</sup>/Hz)) sur 90 ms. (Source: Recommandation UIT-R SM.1633 (2003) telle que reproduite dans le Rapport 171 du CCE.)

#### 6.5.4.5 Mesures effectuées à la station de contrôle de Leeheim les 8 et 9 juin 2010

La station de contrôle des émissions radioélectriques spatiales de Leeheim se situe à environ 35 km au sud-ouest de Francfort. Elle comprend plusieurs antennes à satellites, notamment l'Antenne 1, réflecteur parabolique de 12 m conçu pour couvrir la plage de fréquences 1-13 GHz. C'est avec cette antenne que le

contrôle a été effectué. Le pointage angulaire très fin de cette antenne a permis de suivre avec précision les satellites dans leur course.

La principale campagne de mesures a été menée conjointement par MPIfR, ASTRON et BNetzA sur des satellites de la constellation IRIDIUM les 8 et 9 juin 2010. Les mesures ont été effectuées une fois par seconde dans des canaux de 6,1 kHz, dans la plage 1 610,6-1 613,8 MHz. Vingt-huit passages de satellites de la constellation IRIDIUM ont été observés entre 8 h 30 et 17 h 30 (heure locale) pendant deux jours.

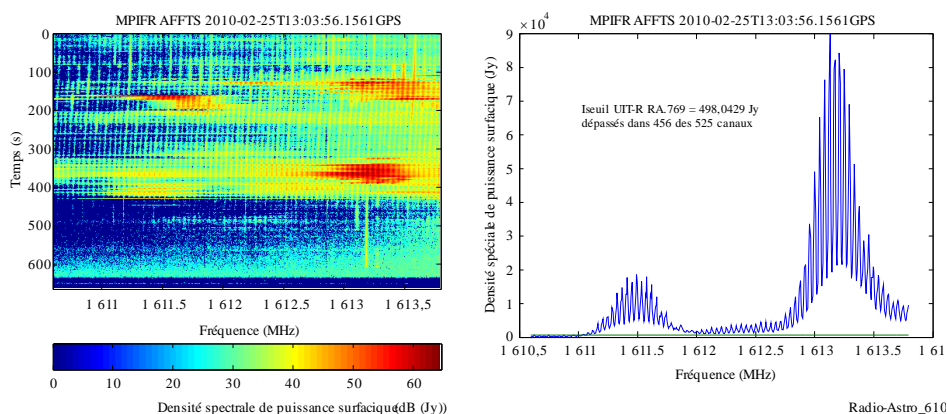
Un filtre éliminateur de bande de 70 dB a été placé à l'avant du récepteur pour supprimer les fortes émissions de satellite dans la bande 1 613,8-1 625,5 MHz et ainsi éviter les effets de non-linéarité dans le système de réception lorsque l'antenne suivait un satellite actif.

Les étalonnages ont été réalisés directement sur les radiosources Cas-A et Cyg-A le même jour, dans la même configuration que celle utilisée pour les mesures; tous les canaux du spectromètre ont ainsi bénéficié d'un étalonnage absolu de la puissance surfacique.

La Figure 6.10 est un exemple représentatif des spectres obtenus. Les brouillages observés dans la bande du SRA ont les mêmes caractéristiques de crête que ceux figurant dans la Recommandation UIT-R SM.1633 de 1998. Les valeurs de crête obtenues dans les mesures de la station de contrôle de Leeheim sont comparables aux valeurs théoriques calculées pour des conditions de pleine charge, lorsque  $-214 \text{ dB(W/m}^2\text{Hz)}$  se traduit en 40 kJy.

FIGURE 6.10

**Spectrogramme étalonné (à gauche) et spectre moyen (à droite) des rayonnements non désirés émis par IRIDIUM 97 dans la bande 1 610,6-1 613,8 MHz**



Il ressort de l'analyse des mesures effectuées à l'observatoire de Leeheim que tout passage de l'un quelconque des satellites IRIDIUM produit au niveau du sol des brouillages qui dépassent de plus de 20 dB les seuils UIT-R RA.769 ajustés en temps et en largeur de bande entre les fréquences 1 610,6 et 1 613,8 MHz, et ce quel que soit l'échelle de temps considérée entre 1 s et 800 s. La perte de largeur de bande dépassait 30% dans tous les spectres moyennés sur le passage du satellite (valeur médiane = 76%) et au moins 11% des spectres de 1 s (avec une valeur médiane de 47%) ont dû être écartés en raison de la contamination spectrale par des émissions hors bande du système IRIDIUM. Les mesures effectuées à Leeheim viennent en outre confirmer les conclusions du rapport précité du 1er mars 2006 sur l'étude des brouillages à l'observatoire d'Effelsberg.

Il convient de noter que les mesures menées en 1998 par l'observatoire NRAO sur des passages de satellites pris isolément, dans des conditions fictives de pleine charge, ont donné des résultats analogues à ceux de la présente analyse statique. Après les essais du NRAO (vers 2003), des modifications ont été apportées à certains paramètres opérationnels du système IRIDIUM en vue d'améliorer sa compatibilité avec le service de radioastronomie.

Une analyse ultérieure de type **EPFD**, conforme aux prescriptions de la Recommandation UIT-R RA.1513, a montré que la perte de données varie considérablement selon la fréquence. Les résultats font état d'une perte

de 93,2% pour un temps d'intégration de 2 000 s. Pour satisfaire au critère de 2%, le niveau de puissance des brouillages devrait être réduit de 13 dB. La perte de données sur l'ensemble de la voûte céleste à la fréquence 1 613,7878 MHz (limite supérieure de la bande attribuée au SRA) atteint 100% pour un temps d'intégration de 2 000 s. Pour satisfaire au critère de 2%, le niveau de puissance des brouillages devrait être réduit de 20 dB. Pour des temps d'intégration plus courts (30 s), la perte s'échelonne entre 4,7% à la limite inférieure de la bande du SRA et 43,5% au voisinage de la limite supérieure. Pour satisfaire au critère de 2%, le niveau de puissance des brouillages devrait être réduit de 11 dB.

Des représentants d'IRIDIUM ont participé à toutes les étapes des mesures ainsi qu'à la rédaction du rapport de la CCE qui a servi de base au présent paragraphe.

## **6.6 Conclusions**

L'examen des différents problèmes de brouillage causé à la radioastronomie par des émetteurs permet de formuler un certain nombre de conclusions, parmi lesquelles les points suivants revêtent une importance particulière:

- On doit accorder une attention toute particulière au filtrage dans les étages RF et FI des récepteurs radioastronomiques afin de réduire au minimum les problèmes de brouillage par les bandes adjacentes (ce point n'est toutefois généralement pas difficile à satisfaire);
- Les émetteurs fonctionnant dans des bandes non adjacentes aux bandes attribuées à la radioastronomie peuvent être à l'origine d'un brouillage par les rayonnements harmoniques, les effets d'intermodulation et la modulation à large bande non filtrée;
- Les émetteurs placés à bord des satellites ou des aéronefs peuvent poser des difficultés particulières en raison de la propagation qui se fait généralement en visibilité directe, et parce que la probabilité de réception par les lobes latéraux proches du faisceau principal (au lieu des lobes éloignés) est plus grande que pour les émissions de Terre;
- En général, l'attribution de bandes adjacentes aux bandes attribuées à la radioastronomie à des services mettant en oeuvre des émetteurs de Terre puissants ou des émetteurs à bord de satellites peut poser des problèmes techniques difficiles et coûteux à résoudre;
- Les émissions à large bande des satellites, comme les signaux à modulation par étalement du spectre à séquence directe, peuvent se traduire par des problèmes particulièrement graves pour la radioastronomie, à moins que ces émissions ne soient convenablement filtrées. Les techniques de modulation avec mise en forme des impulsions permettent de réduire considérablement ces rayonnements non désirés.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DALY, P. [1988] Aspects of the Soviet Union's Glonass satellite navigation system. J. of Navigation, Vol. 41, p. 186-198.

GALT, J. [1990] Contamination from satellites. Nature, Vol. 345, p. 483.

MUROTA, K and HIRADE, K. [1981] GMSK modulation for digital mobile radio telephony. IEEE Trans. Commun., Vol. COM-29, p. 1044-1050.

OTTER, M. A. [June 1994] A comparison of QPSK, OQPSK, BPSK and GMSK modulation schemes. Report of the European Space Agency, European Space Operations Center, Darmstadt, Germany.

PONSONBY, J. E. B. [July 1991] Spectrum management and the impact of the GLONASS and GPS satellite systems on Radioastronomy. J. of Navigation, Vol. 44, p. 392-398.

PONSONBY, J. E. B. [July 1994] Impact of the direct sequence spread spectrum signals from the Global Satellite Navigation System GLONASS on radio astronomy: problem and proposed solution. Proc. of the IEEE Spread Spectrum Symposium, Oulu, Finland.

## CHAPITRE 7

### Techniques spéciales, applications et sites d'observation

#### 7.1 Introduction

On analyse dans le présent chapitre des techniques et des sites d'observation dont l'étude n'est pas entièrement couverte par les considérations générales développées dans les chapitres précédents. En particulier, certaines applications de radioastronomie supposent que les observations soient effectuées à l'aide d'une ou plusieurs antennes positionnées dans l'espace (on parle alors parfois de radioastronomie spatiale). On peut avoir besoin d'utiliser une antenne dans l'espace pour les raisons suivantes, entre autres:

- En interférométrie à très grande ligne de base (VLBI), on peut obtenir des lignes de base plus grandes, et donc améliorer la résolution angulaire, en corrélant des signaux d'antennes terrestres et des signaux d'une antenne spatiale plutôt qu'en corrélant des signaux provenant uniquement d'antennes terrestres. Le mouvement de l'antenne spatiale en orbite autour de la Terre permet de faire varier la direction des lignes de base formées avec les différentes antennes terrestres, ce qui est important en imagerie bidimensionnelle.
- Pour l'observation et la mesure de la structure des rayonnements du fond diffus cosmologique micro-onde (CMB, *cosmic microwave background*), il faut disposer d'une sensibilité très élevée à partir d'environ 30 GHz. Il est très important d'éviter l'absorption atmosphérique, et notamment les variations de l'intensité du signal résultant des irrégularités de l'atmosphère, en particulier pour les mesures (de la puissance totale) ne faisant intervenir qu'une seule antenne.
- Aux fréquences proches des raies d'absorption intense des molécules H<sub>2</sub>O et O<sub>2</sub> dans l'atmosphère terrestre (voir la Figure 3.1), les observations à partir de l'espace sont nécessaires.
- Aux basses fréquences, c'est-à-dire lorsque les ondes radioélectriques ne peuvent pas pénétrer dans l'ionosphère ou sont fortement affaiblies, les observations à partir de l'espace sont également nécessaires.

Les sites d'observations de radioastronomie les plus importants pour les antennes spatiales sont les suivants:

- l'orbite terrestre, particulièrement utile pour l'interférométrie VLBI (voir le § 7.2);
- le point de Lagrange L<sub>2</sub> du système Soleil-Terre (voir le § 7.3), situé à environ  $1,5 \times 10^6$  km de la Terre, ce qui assure aux antennes spatiales une certaine protection contre les brouillages terrestres;
- les orbites héliocentriques avec retard par rapport à la Terre, sur lesquelles le satellite se trouve à une distance de la Terre généralement égale à  $10^6$ - $10^7$  km, ce qui assure à nouveau aux antennes spatiales une certaine protection contre les brouillages terrestres;
- la zone tranquille de la Lune (voir le § 7.4), qui assure aux antennes spatiales la protection la plus efficace contre les brouillages terrestres, mais qui n'a pas encore été utilisée à cette fin.

Le point L<sub>2</sub>, la zone tranquille de la Lune et la plupart des orbites terrestres planifiées se trouvent tous à moins de  $2 \times 10^6$  km, distance qui définit la limite entre l'espace au voisinage de la Terre et l'espace lointain. Les orbites terrestres et le point L<sub>2</sub> ont été utilisés pour observer la structure des rayonnements CMB. Les sites terrestres choisis pour leur taux minimal de vapeur d'eau atmosphérique, le pôle Sud et le désert Atacama ont également été utilisés pour ce type d'observation (voir le § 7.5).

D'autres techniques et applications spéciales sont également analysées dans le présent chapitre, en particulier les mesures de géodésie fondées sur l'interférométrie VLBI (voir le § 7.2.2), l'observation des pulsars, qui a des applications possibles pour la fourniture de signaux horaires (voir le § 7.6) ainsi que l'observation du Soleil et les effets de cet astre sur la météorologie spatiale (voir le § 7.7).

## 7.2 Interférométrie VLBI y compris l'interférométrie VLBI spatiale

La technique VLBI consiste à observer une radiosource en utilisant simultanément des antennes séparées par de longues distances, souvent placées dans des pays différents ou en orbite autour de la Terre. La résolution angulaire des observations VLBI n'est surpassée par aucune autre technique astronomique au sol. Les réseaux interférométriques VLBI, dont les lignes de base maximales s'approchent du diamètre de la Terre, peuvent atteindre une résolution angulaire inférieure à la milliseconde d'arc. On peut obtenir une concordance précise des fréquences d'observation au niveau des différentes antennes du réseau VLBI en recourant à des horloges atomiques à haute stabilité, qui permettent de maintenir la cohérence de phase sans liaison de référence en temps réel. Lorsque des masers à hydrogène sont utilisés comme horloges, le temps d'intégration cohérent n'est généralement limité que par des différences de variation de la longueur du trajet à travers l'atmosphère et l'ionosphère. Néanmoins, aux fréquences élevées, la stabilité des masers ( $10^{-14}$ ) peut devenir le facteur limitant; par exemple, à 100 GHz, elle limiterait le temps d'intégration cohérent à 1 000 s. Les données obtenues sur chacun des sites des antennes sont enregistrées (actuellement sur disques magnétiques) ou transmises via des réseaux étendus à haut débit. Les débits d'enregistrement ou de transmission des données dépendent des objectifs scientifiques et des procédures d'observation ainsi que des moyens techniques disponibles. Les débits maximums utilisés actuellement sont proches de 2 Gb/s, nouvelle référence adoptée pour le réseau à très grande ligne de base VLBA (*Very Large Baseline Array*), qui est un interféromètre VLBI spécialisé comportant dix stations d'observation réparties sur toute l'étendue du territoire des Etats-Unis d'Amérique. Un centre de traitement effectue l'alignement temporel des signaux reproduits, avec un retard de trajet de la lumière substantiel pouvant atteindre 20 ms, et combine toutes les paires de signaux pour former les produits de corrélation.

La résolution de la technique VLBI permet aux radioastronomes d'observer les déplacements relatifs de condensations de plasmas à haute énergie projetés à des vitesses relativistes par des noyaux actifs de galaxie. Dans la Voie lactée, la technique VLBI permet de mesurer des distances par la méthode de la parallaxe sur l'ensemble du disque galactique; un programme d'observation intensive scrute actuellement la structure en spirale de la Galaxie avec une précision encore jamais atteinte. La technique VLBI est en outre un élément essentiel de la définition des référentiels terrestres et célestes et des étalons horaires; elle a aussi des applications importantes dans d'autres domaines, qui vont du mouvement des plaques de la croûte terrestre à la mesure précise de la position angulaire des engins spatiaux distants.

La sensibilité des réseaux VLBI au brouillage par les services actifs est exposée au § 4.4 et l'utilisation de certaines bandes de fréquences est analysée au § 5.8.

### 7.2.1 VLBI spatiale

La technique VLBI spatiale permet d'étendre la résolution de la technique VLBI au-delà des limites imposées par la dimension de la Terre en intégrant dans le réseau d'observation une antenne placée en orbite circumterrestre élevée. Les paragraphes suivants passent en revue les missions passées, actuelles et en projet (§ 7.2.1.1), les caractéristiques instrumentales spécifiques à l'interférométrie VLBI spatiale (§ 7.2.1.2) et les spécifications techniques relatives aux fréquences de communication (§ 7.2.1.3).

#### 7.2.1.1 Projets d'interférométrie VLBI

Le Tableau 7.1 récapitule les paramètres fondamentaux des projets d'interférométrie VLBI spatiale décrits dans le présent paragraphe. Les fréquences figurant dans ce Tableau et dans les analyses qui suivent se rapportent aux émissions radioélectriques provenant de radiosources naturelles d'origine cosmique.

TABLEAU 7.1

Missions d'interférométrie VLBI spatiale

Mission/ expérience	Dates	Paramètres orbitaux	Diamètre d'antenne	Bande d'observation [GHz]
Expérience VLBI TDRSS	1986 - 1988	Géosynchrone 38 000 km	4,9 m	2,271-2,285 15,35-15,43
VSOP/HALCA	1997 - 2003	Apogée : 21 400 km Périgée : 560 km Inclinaison : 31°	8 m	1,60 - 1,73 4,7 - 5,0 22,0 - 22,3
Radioastron	2011 --	Apogée : 280 000 – 353 000 km Périgée : 7 100 – 81 500 km Inclinaison : 5° – 85°	10 m	0,316 - 0,332 1,652 - 1,684 4,812 - 4,852 22,212 - 22,252
Millimetron	2019	Point L <sub>2</sub> du système Soleil-Terre, distance à la Terre égale à 1,5 × 10 <sup>6</sup> km	10 m	18-26, 31-45, 84- 116, 211-275, 602- 720, 787-950
<i>Long-mm-Wavelength Space VLBI Array</i> (réseau d'interférométrie VLBI spatiale à longueurs d'onde millimétriques)	2020	Apogée : 60 000 km Périgée : 1 200 km Inclinaison : 28,5°	Antenne double de 10 m de diamètre	6 – 9 20 – 24 40 - 46

La faisabilité de l'interférométrie VLBI spatiale a été démontrée pour la première fois en 1986 au moyen d'une antenne de 4,9 m de diamètre placée sur un satellite du système TDRSS (*tracking and data-relay*/repérage et retransmission des données) de la NASA [Levy et autres, 1989]. La première expérience a été réalisée à 2,3 GHz. En 1988, d'autres expériences ont été réalisées à 15 GHz, à partir du même système à satellites.

La mission japonaise VSOP (VLBI Space Observatory Programme/programme d'observation de l'espace par interférométrie VLBI) a été la première à réaliser des observations scientifiques faisant intervenir une antenne en orbite spécialement destinée aux observations VLBI, de 1997 à 2003 [Hirabayashi et autres, 1998]. Le satellite HALCA utilisé pour cette mission a été lancé en 1996 par l'Institut de l'espace et de la science astronautique (ISAS/Institute of Space and Astronautical Science, qui fait maintenant partie de JAXA). Le satellite HALCA embarquait une antenne de 8 m évoluant sur une orbite excentrée caractérisée par un apogée de 21 400 km et une période orbitale de 6,3 h. Les bandes de fréquences d'exploitation étaient centrées à 1,6, 5 et 22 GHz. La bande des 22 GHz n'a pas été utilisée pour les observations courantes en raison d'une dégradation de la qualité de fonctionnement. Les ouvertures angulaires synthétiques minimales étaient de 1,8 et 0,6 ms d'arc à 1,6 et 5 GHz respectivement. La largeur de bande totale du signal était de 32 MHz; le signal était numérisé et transmis vers le sol via une liaison de 128 Mb/s à 14,2 GHz. L'ISAS, la NASA et le NRAO ont fourni un réseau spécialisé de stations de télémétrie au sol. Un réseau très étendu de radiotélescopes terrestres, coordonné par un consortium international à l'échelle de la planète, a participé aux observations VSOP. L'URSI a constitué un groupe de travail sur l'interférométrie à base mondiale pour traiter de la coordination des réseaux terrestres et des questions de compatibilité pour l'acquisition et le transfert des données. Les principaux objectifs scientifiques du projet VSOP concernaient les noyaux actifs de galaxie, les régions maser à OH, les pulsars et les étoiles à sursauts.

La mission russe Radioastron mène actuellement une mission d'interférométrie VLBI spatiale. L'engin spatial Radioastron, qui est équipé d'une antenne de 10 m, a été développé par le Centre spatial Astro rattaché à l'Institut de physique Lebedev de l'Académie des sciences de Russie et par l'Association de production

scientifique Lavochnik. Lancé en 2011, il évolue sur une orbite très excentrique, dont l'apogée est situé à 353 000 km, soit quasiment la distance de la Terre à la Lune. Les perturbations orbitales dues à la Lune sont sciemment exploitées pour modifier rapidement les paramètres orbitaux et offrir une large gamme d'ouvertures dans différentes directions du ciel à un rythme rapide. Radioastron est la première mission d'interférométrie VLBI spatiale à embarquer un étalon de fréquences à maser à hydrogène. Elle fonctionne dans des bandes de fréquences centrées sur 0,32, 1,66, 4,8 et 22 GHz. La largeur de bande totale du signal est de 32 MHz; le signal est numérisé et transmis vers le sol via une liaison de 128 Mb/s à 15 GHz. Plusieurs des plus grands radiotélescopes au monde forment un réseau au sol d'interférométrie VLBI, qui est associé à Radioastron. Les responsables de la mission ont récemment lancé un appel d'offres dans différents domaines scientifiques majeurs concernant notamment les noyaux actifs de galaxie, les trous noirs supermassifs, les flux relativistes, les masers galactiques et extragalactiques et les pulsars.

Le Centre spatial Astro rattaché à l'Institut de physique Lebedev de l'Académie des sciences de Russie a récemment proposé de mettre sur pied une mission appelée Millimetron, avec une date de lancement prévisionnelle fixée à 2019. Equipé d'une antenne de 10 m, le radiotélescope Millimetron serait situé au point de Lagrange L<sub>2</sub> du système Soleil-Terre et ses bandes d'observation seraient comprises entre 18 et 950 GHz. Il présenterait des caractéristiques inédites, qui n'ont encore jamais été intégrées dans des missions d'interférométrie VLBI spatiale, notamment une surface d'antenne à refroidissement cryogénique et une mémoire embarquée pour l'enregistrement des données observées. Cette mission aurait notamment pour objectifs scientifiques d'observer la formation des étoiles et des systèmes planétaires, les étapes relativistes de l'évolution des étoiles, les trous noirs supermassifs et l'évolution galactique et cosmologique. Signalons en outre un aspect essentiel du projet, qui n'est pas étudié ici: l'utilisation d'une parabole unique.

Le Long-mm-Wavelength Space VLBI Array (réseau d'interférométrie VLBI spatiale à longueurs d'onde millimétriques) constitue la première étape d'un réseau d'interférométrie VLBI spatiale millimétrique, pour lequel une étude de conception a été approuvée. Cette étude sera menée par le Comité des projets de science spatiale de l'Académie chinoise des sciences, avec une date de lancement prévisionnelle d'ici à 2020. L'ensemble serait composé de deux engins spatiaux embarquant chacun une antenne de 10 m. Les engins évolueraient sur des orbites de 60 000 km d'apogée situées dans des plans séparés de 120° et effectueraient des observations dans des bandes centrées sur 8, 22 et 43 GHz. Les engins spatiaux embarqueraient des étalons de fréquence à maser à hydrogène ainsi qu'un système d'enregistrement des données. Une liaison de données au sol assurerait une transmission de données pouvant atteindre 2 Gb/s. Cette mission aurait notamment pour objectifs scientifiques d'observer des trous noirs supermassifs, des mégamasers dans des disques d'accrétion extragalactiques, des jets de matière dans des noyaux actifs de galaxie et l'évolution d'étoiles massives.

### **7.2.1.2 Caractéristiques distinctives de l'interférométrie VLBI spatiale et leur évolution récente**

Certaines particularités de l'interférométrie VLBI spatiale limitaient la capacité des premières missions. De nouvelles techniques, plus évoluées, viennent aujourd'hui pallier ce problème. Citons notamment la mise en oeuvre réussie d'un maser à hydrogène embarqué dans la mission Radioastron, qu'il est également prévu d'utiliser dans de prochains projets russes et chinois. A noter toutefois que le système de transfert de phase par aller-retour utilisé pour la mission VSOP reste une solution efficace et qu'il pourrait bien être utilisé comme système de secours dans le futur.

Les contraintes imposées au calcul des orbites lors des premières missions peuvent également être sensiblement assouplies, car les corrélateurs logiciels modernes prennent en charge de plus grands intervalles de retards d'interféromètre et de fréquences des franges d'interférence.

La possibilité d'enregistrer, à bord, les données observées, en vue de leur émission vers la Terre dans un second temps peut considérablement simplifier les fonctions d'appui de la mission au sol. Dans ce mode de fonctionnement, le nombre de stations télémétriques requises au sol peut se réduire à une, à condition toutefois de prévoir une largeur de bande d'émission plus grande, inversement proportionnelle au coefficient d'utilisation de la liaison descendante. Parallèlement, la sensibilité est un paramètre absolument crucial pour de nombreux objectifs scientifiques des missions d'interférométrie VLBI spatiale, ce qui impose des contraintes de plus en plus fortes sur la largeur de bande des liaisons descendantes de données.

L'imagerie par interférométrie VLBI spatiale se heurte à un problème qui n'a toujours pas été résolu: la technique d'auto-étalonnage normale utilisée pour l'analyse des données VLBI ne donne pas de bons résultats



dans le cas d'un réseau où l'une des stations (ici, l'antenne spatiale) est géométriquement isolée par rapport à toutes les autres. Le réseau Long-mm-Wavelength Space VLBI Array, qui prévoit l'utilisation de plusieurs antennes spatiales, sera peut-être une première étape vers la résolution de ce problème.

### **7.2.1.3 Spécifications de fréquence pour l'exploitation des systèmes interférométriques VLBI spatiaux**

L'interférométrie VLBI spatiale pose des problèmes de partage des fréquences plus complexes que l'interférométrie VLBI de Terre. Trois raisons à cela: 1) la nécessité de disposer de liaisons de commande, 2) le besoin de signaux de transfert de phase bidirectionnels, 3) l'émission de données à large bande dans le sens espace vers Terre. Tous ces signaux doivent être protégés contre les brouillages préjudiciables lorsqu'ils sont émis dans les bandes de fréquences utilisées par d'autres systèmes de recherche spatiale.

Les bandes de fréquences utilisées par les missions d'interférométrie VLBI spatiale actuelles sont comprises dans les bandes attribuées à la recherche spatiale: 7,190-7,235 GHz (Terre vers espace), 8,025-8,500 GHz (espace vers Terre), 14-15,35 GHz (espace vers Terre) et 14,5-15,35 GHz (Terre vers espace). Les exigences de ces missions en termes de largeur de bande peuvent être satisfaites dans le cadre de ces attributions. Cela étant, les missions futures nécessiteront probablement des bandes larges de plusieurs GHz pour les liaisons descendantes de données, avec des attributions de fréquences au-delà de 20 GHz. S'agissant des deux prochaines missions d'interférométrie VLBI spatiale décrites à la fin du § 7.2.1.1, les fréquences des liaisons descendantes de données à large bande n'ont pas encore été choisies. D'autres attributions sont disponibles dans les bandes attribuées 37-38 GHz (espace vers Terre), 40-40,5 GHz (Terre vers espace) et 74-84 GHz (espace vers Terre).

Il sera nécessaire de définir à l'avance les liaisons nécessaires au processus de secours par transfert de phase, bien que ce dernier ne soit plus une composante essentielle du système. Les effets de propagation troposphérique et ionosphérique imposent l'utilisation de fréquences comprises entre 7 GHz et 20 GHz. Les fréquences des liaisons montante et descendante devraient certes être aussi proches que possible, mais comme elles ne sont généralement pas identiques, il est nécessaire de modéliser l'atmosphère afin de compenser la différence des longueurs de trajet.

Les critères de protection des liaisons de télécommunication applicables aux satellites de recherche, habités ou non, évoluant au voisinage de la Terre sont énumérés dans la Recommandation UIT-R SA.609. Ils sont également valables pour les liaisons de télémétrie et de transmission des signaux horaires des systèmes interférométriques VLBI spatiaux planifiés. Les seuils de brouillage préjudiciable recommandés, qui ne doivent pas être dépassés pendant plus de 0,1% du temps, sont de  $-216$  dB(W/Hz) au niveau du récepteur de la station terrienne et de  $-177$  dB(W/Hz) au niveau du récepteur du satellite. Les bandes de fréquences à utiliser pour les liaisons de communication des interféromètres VLBI spatiaux en projet sont attribuées à de nombreux services de radiocommunication. Mais l'examen des niveaux de brouillage potentiels en fonction de la position orbitale des satellites indique que, dans la pratique, un partage est possible. Dans certains cas, une coordination précise peut s'avérer nécessaire.

### **7.2.2 Applications géodésiques utilisant l'interférométrie VLBI**

L'interférométrie VLBI est un outil essentiel de mesure et de surveillance de la Terre. Avec un réseau d'antennes réparties sur différents sites autour du monde et un système de radiosources dont les positions sont connues avec précision, on peut déterminer l'écartement de chaque couple d'antennes à quelques millimètres près. L'interférométrie VLBI est la seule technique de géodésie capable de fournir un ensemble complet des paramètres d'orientation de la Terre (EOP/*Earth Orientation Parameters*: durée du jour et orientation du pôle) qui positionnent la Terre par rapport au Système de référence céleste (CRF) inertiel, lequel est décrit par un catalogue de quasars. Grâce à la mesure des paramètres EOP, l'interférométrie VLBI fournit une orientation et une échelle absolues pour le Système de référence terrestre (TRF). Ces paramètres, indispensables à la navigation des engins spatiaux, évoluent sur de courtes durées et ne sont pas prévisibles; il est donc nécessaire de les mesurer régulièrement. Par exemple, l'étalonnage des données des satellites GPS serait impossible sans l'interférométrie VLBI. L'IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry/service international de VLBI pour la géodésie et l'astrométrie) [Schuh et Behrend, 2012] est chargé de tenir à jour le CRF et de fournir des mesures périodiques des paramètres EOP.

Ces dernières années, un plan de modernisation du réseau des télescopes qui contribuent à la mission de l'IVS a été élaboré en vue d'atteindre des objectifs particulièrement ambitieux, parmi lesquels le calcul de la position avec une précision de 1 mm et de la vitesse avec une précision de 0,1 mm/an [Petrachenko et autres, 2013]. Ce projet, appelé VGOS (VLBI2010 Global Observing System/système d'observation mondiale VLBI2010), nécessite de nouveaux télescopes de petite dimension et à déplacement rapide ainsi que des systèmes de réception à large bande. De nouveaux télescopes ont déjà été construits (par exemple, le réseau VLBI AuScope [Lovell et autres, 2013]), tandis que d'autres sont en cours de construction ou en projet. Il est nécessaire de recourir à des systèmes de réception à large bande pour assurer la couverture en fréquence et la sensibilité requises par les objectifs du projet VGOS. Les observatoires enregistreront quatre bandes à double polarisation larges de 1 GHz, réparties entre 2 et 14 GHz.

### 7.3 Radioastronomie depuis le point de Lagrange $L_2$ du système Soleil-Terre

Il existe cinq points de libration (de Lagrange) particuliers dans le champ gravitationnel du système Soleil-Terre autour desquels des engins spatiaux pourraient décrire des orbites stables (en halo). Ces positions sont utiles pour l'établissement de laboratoires permanents dans l'espace. Les points  $L_1$  et  $L_2$  sont situés le long de l'axe Soleil-Terre à des distances d'environ  $1,5 \times 10^6$  km de part et d'autre de la Terre (voir la Figure 7.1). Le point  $L_2$  est le plus éloigné du Soleil et, à cet endroit, le Soleil, la Terre et la Lune sont à des distances angulaires les uns des autres de quelques degrés. Le diamètre de l'orbite géostationnaire autour de la Terre sous-tend un angle d'environ  $3,1^\circ$  vu depuis le point  $L_2$ , de telle sorte qu'une antenne ayant des lobes latéraux de faibles niveaux et pointant suivant une direction éloignée de la Terre pourrait être bien protégée vis-à-vis de la plupart des émetteurs au voisinage de la Terre. Ces considérations, associées à d'autres avantages tels que des conditions spatiales favorables au maintien de faibles températures physiques de l'antenne et des équipements de réception, ont conduit à proposer la localisation d'un certain nombre de missions d'astronomie en orbite autour du point  $L_2$ . Les données préliminaires pour plusieurs de ces missions sont énumérées dans le Tableau 7.2. La protection de l'environnement radioélectrique au voisinage du point  $L_2$  fait l'objet de la Recommandation UIT-R RA.1417, qui préconise qu'un volume spatial de 250 000 km de rayon ayant pour centre  $L_2$  soit protégé en tant que zone de coordination de faibles rayonnements électromagnétiques.

FIGURE 7.1

Géométrie type d'une orbite  $L_2$

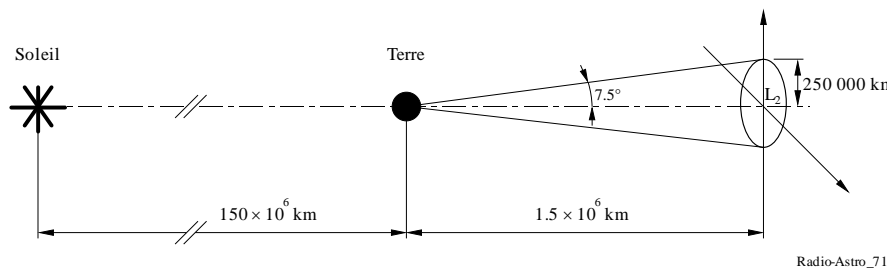


TABLEAU 7.2

Missions de radioastronomie spatiale en service ou en projet près du point de Lagrange L<sub>2</sub> du système Soleil-Terre

Mission/opérateur ouverture	Type de mission Mode d'observation	Dates d'exploitation	Bandes de fréquences d'observation (GHz)
MAP/NASA 1,4m × 1,6 m	Imagerie monoparabole du continuum du fond diffus cosmologique micro-onde Continuum	2001-2009	18-96
PLANCK/ESA 1,5 m × 1,9 m	Imagerie monoparabole du continuum du fond diffus cosmologique micro-onde  Continuum	2009-2012	30 ± 3 44 ± 4,4 70 ± 7 100 ± 10 150 ± 28 217 ± 40 353 ± 65,5 545 ± 101 857 ± 158,5
Herschel/ESA 3,5 m	Radioastronomie monoparabole Raies spectrales et continuum	2009 -2013	490-642 640-802 800-962 960-1 122 1 120-1 250 1 600-1 800 2 400-2 600
Millimetron/ ROSKOSMOS 12 m	Radioastronomie monoparabole et interférométrie spatiale à très grande ligne de base (sVLBI) Raies spectrales et continuum	2015-2030	18-4 800
SPICA/JAXA 3,5 m	Radioastronomie monoparabole Raies spectrales et continuum	2018	1 500-10 000

#### 7.4 Radioastronomie depuis la zone tranquille de la Lune

Le spectre électromagnétique est maintenant tellement exploité sur Terre que son intérêt pour la recherche radioastronomique en est sérieusement entamé. Cela ne s'explique pas seulement par une croissance générale des radiocommunications (en particulier celles qui concernent les satellites en orbite autour de la Terre), mais aussi par le fait que certaines observations de radioastronomie doivent se faire à des fréquences de raies spectrales qui ne bénéficient d'aucune protection dans le RR, et ont peu d'espoir d'en obtenir une dans le futur.

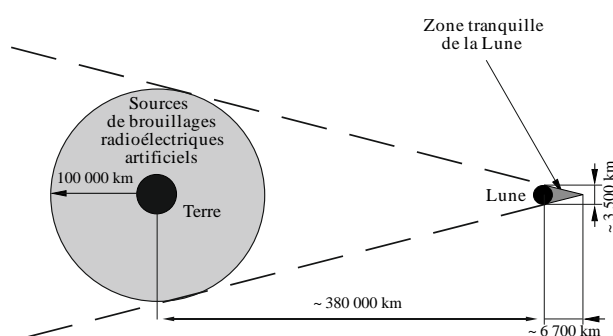
La face cachée de la Lune est peut-être le dernier lieu accessible où l'observation radioastronomique serait possible sans brouillage sur la totalité du spectre radioélectrique. Mais les sondes de l'espace lointain, les satellites lunaires, les instruments scientifiques et les stations de recherche installées à la surface de la Lune continueraient néanmoins à être des sources de brouillage potentielles des observations; les fréquences doivent donc leur être attribuées avec prudence afin d'éviter de brouiller les observations de radioastronomie effectuées depuis la zone tranquille de la Lune.

### 7.4.1 La zone tranquille de la Lune

La période de rotation de la Lune autour de son axe étant égale à sa période de révolution autour de la Terre, elle présente toujours la même face à la Terre. Comme son orbite autour de la Terre est légèrement elliptique et inclinée, un peu plus de la moitié de sa surface est visible depuis la Terre. La partie cachée de la surface lunaire est toujours protégée des signaux brouilleurs émis depuis la Terre ou dans son voisinage (voir la Figure 7.2). La zone tranquille de la surface lunaire est celle qui se situe à plus de  $23,2^\circ$  au-delà du limbe principal de la Lune tel qu'on le verrait depuis le centre de la Terre. Le numéro **22.22.1** du RR définit la zone tranquille de la Lune comme la partie de la surface de la Lune et le volume d'espace adjacent qui sont protégés des émissions provenant de tout point situé à moins de 100 000 km du centre de la Terre.

FIGURE 7.2

Schéma simplifié de la zone tranquille de la Lune



Radio-Astro\_72

### 7.4.2 Domaines spectraux convenant le mieux aux observations depuis la Lune

L'observation radioastronomique aux basses fréquences est à même de fournir d'importantes données sur l'activité solaire, les rayons cosmiques et les champs magnétiques de notre Galaxie, et sur les spectres basse fréquence des radiosources isolées galactiques et extragalactiques. Mais ces observations sont très difficiles à réaliser sur Terre en dessous de 30 MHz environ en raison de l'opacité de l'ionosphère et de son inhomogénéité. Les observations en dessous de 20 MHz ne sont possibles que dans des circonstances exceptionnelles, en des lieux particuliers et pour des périodes de temps limitées (voir le Chapitre 3). Le brouillage radioélectrique terrestre naturel aussi bien qu'artificiel nuit également aux observations radioastronomiques à ces fréquences. En dessous de 500 kHz environ, le rayonnement auroral constitue la principale source de bruit. Entre 1 et 30 MHz, les radiocommunications à longue distance dominent. De fait, jusqu'à 300 MHz, le spectre est intensément exploité par les services actifs. Au vu de ces restrictions, il est important que la zone tranquille de la Lune, qui n'est troublée ni par les effets ionosphériques ni par les émissions artificielles, soit réservée à l'observation radioastronomique aux basses fréquences.

Aux fréquences plus élevées jusqu'à environ 20 GHz, les émissions artificielles imposent de nombreuses restrictions à la radioastronomie sur Terre. Si le RR accorde une certaine protection à de nombreuses raies spectrales de transition importantes pour l'astrophysique (voir le Chapitre 3), il en accorde généralement beaucoup moins aux raies déplacées vers le rouge par effet Doppler qui sont associées aux galaxies lointaines. De plus, de nouvelles transitions importantes sont régulièrement découvertes et leurs fréquences ne sont pas protégées; il s'agit par exemple des raies du méthanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) à 6,7 GHz et 12,2 GHz et du cyclopropénylidène ( $\text{C}_3\text{H}_2$ ) à 18,3 GHz. La raie à 1 420 MHz de l'hydrogène atomique neutre a été détectée à des fréquences déplacées par effet Doppler aussi basses que 323 MHz [Uson et autres, 1991], et la protection de l'intégralité du spectre au-dessous de 1 420 MHz doit être recherchée.

Aux fréquences supérieures à 20 GHz, l'observation radioastronomique menée depuis la surface de la Terre est gênée par l'opacité atmosphérique due aux transitions intenses de la vapeur d'eau  $\text{H}_2\text{O}$  et de l'oxygène  $\text{O}_2$  (voir le Chapitre 3). Bien que certaines observations soient menées avec succès dans les fenêtres

atmosphériques entre ces transitions, elles deviennent de plus en plus difficiles lorsque la fréquence augmente. La plupart des raies moléculaires sont situées aux hautes fréquences et certaines ne peuvent pas être observées depuis la Terre. En radioastronomie, l'absence de brouillage dans les bandes de fréquences obscurcies par l'atmosphère terrestre serait importante pour des observatoires placés dans la zone tranquille de la Lune, bien que des observations à ces fréquences puissent également être réalisées avec succès à partir d'autres points de l'espace.

### 7.4.3 Réglementation de l'utilisation de la zone tranquille de la Lune

La totalité du spectre fréquentiel y étant exempt de rayonnements provenant de la proximité de la Terre, la zone tranquille de la Lune est un site unique d'observation scientifique. Des expériences radioastronomiques et d'autres expériences scientifiques pourront être menées depuis cette zone dans un futur proche et il est essentiel de réglementer les activités des services de radiocommunication dont les équipements peuvent émettre dans cette zone. Il faut tenir compte des besoins des satellites en orbite autour de la Terre, des sondes de l'espace lointain et des émetteurs qui desserviront la zone tranquille, étant entendu que la zone doit rester autant que possible à l'abri de tout brouillage radioélectrique afin de garder son exceptionnelle valeur pour l'observation passive.

Les numéros **22.22** à **22.25** du RR reconnaissent la nécessité de préserver le grand potentiel de la zone tranquille pour les observations du service de radioastronomie et des autres services passifs de recherche spatiale, et de la tenir par conséquent aussi à l'abri que possible de toute émission.

La Recommandation UIT-R RA.479 recommande que, lors de la planification de l'utilisation du spectre radioélectrique dans la zone tranquille de la Lune, on tienne compte tant à l'échelon national qu'à l'échelon international, de la nécessité de pourvoir aux besoins de la radioastronomie. Elle recommande également qu'on accorde une attention particulière aux bandes de fréquences dans lesquelles l'observation radioastronomique est difficile, voire impossible à mener depuis la surface de la Terre, et qu'on s'en tienne à un ensemble de lignes directrices préliminaires pour tout ce qui touche à l'utilisation du spectre dans la zone tranquille de la Lune. Selon ces lignes directrices, la totalité du spectre radioélectrique resterait dans la zone tranquille à la disposition des services passifs à l'exception des bandes de fréquences déjà attribuées ou qui le seront dans le futur:

- aux services de recherche spatiale, d'exploitation spatiale, d'exploration de la Terre par satellite et de radiorepérage par satellite, afin d'assurer la logistique de la recherche spatiale;
- aux radiocommunications et aux transmissions de la recherche spatiale à l'intérieur de cette zone.

Ces activités de recherche nécessiteront des services radioélectriques spatiaux avec des émetteurs opérant à des distances supérieures à 100 000 km de la Terre pour assurer leur coordination avec le SRA. La recommandation finale est que la radioastronomie soit protégée contre tout brouillage préjudiciable lorsqu'elle opère dans la zone tranquille aux fréquences qu'il est envisagé d'assigner aux stations de recherche spatiale actives et passives de la zone.

Il est possible de tracer quelques lignes directrices pour le choix des bandes de fréquences à réserver pour la radioastronomie dans la zone tranquille de la Lune. Les transitions de l'hydrogène HI à 1 420 MHz, du monoxyde de carbone CO à 115 GHz et dans une moindre mesure celles du radical hydroxyle OH à 1 612 MHz, 1 665 MHz, 1 667 MHz et 1 720 MHz ont un rôle essentiel dans l'étude des galaxies lointaines aux fréquences déplacées vers le rouge. Il est donc nécessaire, pour l'étude de HI et de OH, de garder autant que possible la région spectrale en dessous de 2 GHz exempte de toute émission. Pour les observations de la raie CO déplacée par effet Doppler, les régions spectrales les plus importantes à réserver sont celles où l'opacité de l'atmosphère terrestre est élevée. Les bandes de fréquences correspondant à de nombreuses transitions parmi les plus importantes en astrophysique doivent être réservées, en particulier celles qui ne bénéficient actuellement que d'une faible protection. Cela permettrait d'effectuer des observations VLBI à l'aide d'une antenne située dans la zone tranquille. Ces fréquences doivent bénéficier d'une protection maximale contre les brouillages préjudiciables, qu'il s'agisse d'émissions dans la bande ou hors bande (y compris les rayonnements harmoniques). Aux fréquences supérieures à 15 GHz, les régions spectrales masquées par l'atmosphère terrestre doivent rester accessibles aux radioastronomes. Le problème de la possible détection dans le futur de raies spectrales dans des bandes non protégées pourrait être amoindri si les systèmes de radiocommunication et de transmission de données fonctionnant dans la zone tranquille de la Lune pouvaient avoir la souplesse

nécessaire pour changer de bande au cas où une raie spectrale majeure serait découverte dans une bande de fréquences d'émission utilisée.

## **7.5 Sites de Terre caractérisés par une absorption atmosphérique peu élevée**

Les sites dont l'atmosphère environnante présente une concentration en vapeur d'eau particulièrement faible sont les plus adaptés aux observations à partir de la Terre dans la plage des longueurs d'onde submillimétriques, c'est-à-dire aux fréquences radioélectriques supérieures à 300 GHz. Pour de plus amples détails sur les caractéristiques de sites, voir le Chapitre 13 de l'ouvrage [Thompson et autres, [2001].

### **7.5.1 Antarctique**

L'altitude élevée et le froid extrême du plateau antarctique se traduisent par une très faible densité de colonne de vapeur d'eau et en font le site le plus connu sur Terre pour l'observation astronomique entre 300 et 15 000 GHz (longueurs d'onde de 1 à 0,02 mm). Un avantage supplémentaire en matière d'observation radioastronomique à basse fréquence est que les satellites en orbite géostationnaire stricte sont en dessous de l'horizon à cet endroit. Par contre, le plateau antarctique, relativement inaccessible, est actuellement sous-équipé comme site d'observation. Bien que la qualité d'observation y soit un peu moins bonne que sur le plateau, le pôle Sud est sans doute le meilleur site d'observation pour les hautes fréquences dans la partie accessible du monde. Là, les télescopes peuvent réaliser des observations très difficiles ou même impossibles à réaliser ailleurs, car l'atmosphère y est pratiquement toujours transparente dans l'intervalle spectral susmentionné. La très grande stabilité de l'opacité atmosphérique présente un avantage tout particulier pour la mesure des caractéristiques de faible luminosité. Il convient de noter toutefois que la portion de la sphère céleste observable depuis le pôle par des radiotélescopes dont la couverture du ciel peut aller jusqu'à des angles minimaux d'élévation d'environ 5° est moitié moins grande que celle que l'on peut observer depuis des sites de latitude moins élevée tels que Cerro Chajnantor ou Mauna Kea (voir ci-dessous).

Le SPT (South Pole Telescope/télescope du pôle Sud), de 10 m de large, effectue des observations entre 95 et 350 GHz. Autre système situé au pôle Sud: l'interféromètre DASI à 13 antennes, qui fonctionne entre 26 et 36 GHz [Leitch et autres, 2002].

### **7.5.2 Cerro Chajnantor, Chili**

Le désert chilien d'Atacama, proche du site du télescope ALMA (67°45'11,4"W, -23°01'22"), est un site à 5 000 m d'altitude dont les conditions atmosphériques d'observation radioastronomique sont comparables à celles du pôle Sud. Le télescope ALMA est un instrument complexe composé de réseaux de 50 antennes de 12 m, de 12 antennes de 7 m et de 4 antennes de 12 m, qui effectuent des observations entre 30 et 950 GHz. A proximité se trouvent les télescopes de 12 m APEX et ASTE. Sur cette zone a également été installé un autre instrument spécialement conçu pour la mesure du CMB, l'imageur du fond cosmique, qui opère dans la même gamme 26-36 GHz que l'interféromètre DASI, mais couvre un éventail complémentaire de structures angulaires [Padin et autres, 2001].

### **7.5.3 Mauna Kea, Hawaï**

Le sommet de Mauna Kea à Hawaï (155°28'18"O, +19°49'36"), à 4 080 m d'altitude, abrite le réseau submillimétrique SMA (*SubMillimeter Array*), qui est constitué de 10 antennes de 6 m [Moran, 1998], le CSO de 10 m et le JCMT de 15 m, qui opèrent dans la gamme 180-900 GHz.

### **7.5.4 Mt Graham, Arizona**

Ce site, perché à une altitude de 3 200 m (109°53'28,5"W, +32°42'05,8"), héberge le SMT (10 m), qui fonctionne entre 200 et 700 GHz, ainsi que le grand télescope optique LBT, qui est composé de 2 antennes de 8 m.

## **7.6 Observation des pulsars et utilisation comme étalons de temps**

Les pulsars radioélectriques ont été traités en détail au Chapitre 2.

Les périodes de pulsation observées vont de quelques secondes à quelques millisecondes; une période de seulement 1,55 ms a même été détectée. L'impulsion principale – et quelquefois une faible impulsion

secondaire – n'occupe généralement qu'une faible fraction du cycle. En général, les cycles de pulsation sont remarquablement réguliers. Mais dans certains cas, les périodes subissent des variations brutales. De plus, certaines périodes présentent de petites variations périodiques régulières indiquant que l'étoile à neutrons fait partie d'un système binaire et gravite autour d'un compagnon stellaire de faible masse. La mesure de l'instant d'arrivée des impulsions sur quelques années fournit non seulement les positions exactes et les mouvements propres (c'est-à-dire les déplacements angulaires dans le ciel) des pulsars, mais aussi des informations sur la stabilité à long terme de leur période de pulsation.

La détection d'impulsions uniques n'est possible que pour les pulsars les plus intenses. Dans ce cas, on a trouvé que l'intensité des impulsions peut fortement varier; on pense qu'une partie de la variation est une scintillation due au milieu interstellaire traversé par les impulsions. Pour les pulsars de faible intensité, on a recours à des techniques d'intégration sur des périodes allant jusqu'à quelques heures afin de définir un profil moyen d'impulsion. En règle générale, l'intensité des émissions d'un pulsar décroît plus rapidement que la plupart des autres types de radiosources à mesure que la fréquence augmente.

### 7.6.1 Les pulsars: des horloges étalon

On a découvert que les pulsars dont la période est de l'ordre de la milliseconde étaient très stables à long terme. La dérive de période (variation de la période avec le temps) est de l'ordre de  $10^{-18}$  à  $10^{-20}$ , ce qui est environ de 4 à 5 ordres de grandeur plus petits que pour les autres pulsars. Ces pulsars sont d'un grand intérêt astrophysique, et plusieurs observatoires du monde entier mènent des recherches à ce sujet. Une centaine de pulsars dont la période est de l'ordre de la milliseconde sont connus.

On procède actuellement à l'observation à long terme du rythme des pulsars dont la période est de l'ordre de la milliseconde. Il en ressort que la stabilité à long terme des périodes des pulsars est au moins comparable à celles qu'on obtient actuellement avec les fréquences étalon atomiques. Cela laisse penser qu'il est possible d'utiliser ces pulsars comme futures références horaires de précision. Cette idée a gagné du terrain en raison de la détection d'un pulsar austral dont la période est de l'ordre de la milliseconde et qui est plus brillant, de deux ordres de magnitude, que tous les autres pulsars du même type déjà connus. Son intensité permet d'en recueillir des impulsions individuelles. Des travaux sont en cours pour étudier la manière d'utiliser ces pulsars pour réaliser une future échelle de temps de précision.

Plusieurs décisions doivent être prises avant que les pulsars dont la période est de l'ordre de la milliseconde puissent être utilisés dans les futures références horaires (voir par exemple la Question UIT-R 205/7 et le Rapport UIT-R RA.2099). Elles concernent des aspects liés à l'observation tels que les bandes de fréquences convenant le mieux à l'observation de ce type d'objet (il a été proposé d'utiliser une large bande à 1 330-1 427 MHz), les niveaux de signaux non désirés qui causeraient du brouillage préjudiciable, et la faisabilité du partage des bandes de fréquences d'observation avec les autres services. D'autres questions doivent également être examinées: la comparaison des données horaires avec l'échelle de temps atomique, la définition de l'instant d'arrivée des impulsions et l'évaluation de la précision de la mesure du temps, les méthodes de détection en présence de brouillage, et la procédure à suivre pour comparer les données horaires à une échelle de temps atomique.

### 7.6.2 Pulsars: points de coordonnées de référence

On a étudié au début du présent Chapitre l'application VLBI de radioastronomie en tant que technique offrant la résolution angulaire maximale (en particulier l'interférométrie VLBI spatiale). Les dimensions angulaires des pulsars sont seulement de  $10^{-7}$  à  $10^{-10}$  secondes d'arc. On pense que la distribution de brillance de leur magnétosphère ne peut pas être calculée. Les pulsars eux-mêmes peuvent être considérés comme des points de coordonnées de référence dans le ciel. La position d'un pulsar sur plusieurs années est mesurée dans le repère de référence dynamique avec une précision de 0,5 milliseconde d'arc (soit des incertitudes de 1  $\mu$ s, 300 m sur l'orbite de la Terre). Une précision comparable peut être obtenue grâce à l'interférométrie VLBI intercontinentale en bande S (Kalyazin, Russie - Kashima, Japon) [Sekido et autres, 1998]. Les données VLBI associées aux coordonnées pulsar sont obtenues dans le repère ICRF (*International Celestial Reference Frame*), ce qui permet de déterminer le système de coordonnées célestes avec une grande précision. Les coordonnées des pulsars déterminées grâce aux données VLBI pourraient être utilisées comme coordonnées indépendantes, lorsqu'une procédure de correspondance est appliquée pour déterminer les paramètres du pulsar

(période, dérivées de la période par rapport au temps, coordonnées, mouvement propre et paramètres de Kepler d'un système binaire).

## 7.7 Observation de l'activité solaire

L'activité solaire, qui peut perturber le fonctionnement de certains services comme la distribution d'énergie, est surveillée dans le monde entier, dans différentes régions du spectre électromagnétique. A titre d'exemple, le Conseil national de recherche du Canada procède depuis 1947 à des mesures quotidiennes de l'émission radioélectrique solaire à la longueur d'onde de 10,7 cm. Ce programme, qui consiste à mesurer avec précision la densité spectrale de puissance surfacique totale et à surveiller les éruptions solaires, a fourni le plus long enregistrement quantitatif existant de l'activité solaire. La mesure, exprimée en unités de flux solaire ( $1 \text{ sfu} \equiv 10^{-22} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ ), est couramment notée  $F_{10,7}$  et est utilisée dans le monde entier comme indice principal de l'activité solaire. Elle est utilisée non seulement par la communauté de la physique solaire, mais aussi par les spécialistes de l'atmosphère, les ingénieurs des communications, les compagnies de distribution d'énergie et les autres organisations dont le fonctionnement peut être perturbé par une forte activité solaire et par les orages géomagnétiques concomitants. Elle est également utilisée par les agences spatiales dans les calculs orbitaux pour modéliser la densité des couches supérieures de l'atmosphère terrestre. Puisque la contribution principale (la composante à variations lentes) à l'émission radioélectrique solaire aux longueurs d'onde centimétriques est engendrée dans des concentrations de plasma maintenues par des champs magnétiques et par des électrons thermiques situés dans des champs magnétiques, l'intensité à 10,7 cm est fortement corrélée avec le flux magnétique total. Bien corrélée également avec d'autres mesures de l'activité solaire, elle est souvent utilisée comme approximation de quantités telles que le nombre de taches solaires de Zurich, la luminosité solaire ou l'intensité UV intégrée, qui sont difficiles à mesurer avec l'homogénéité et la continuité requises. On trouvera dans [Tapping, 2013] une étude détaillée de  $F_{10,7}$ .

Le brouillage préjudiciable par les services actifs ne posait pas de problème ces dernières années en raison de l'intensité des émissions solaires, et parce que la plupart des mesures ont été réalisées depuis des sites bien protégés. Néanmoins, les principaux utilisateurs des informations collectées ont indiqué que le taux annuel des pertes de données dues aux pannes techniques ou au brouillage doit rester inférieur à 1%.

En 1992, la construction d'un puissant instrument d'observation du soleil a été achevée. Il s'agit du radiohéliographe Nobeyama (Japon). Il fonctionne le jour sur 17 GHz, avec une résolution angulaire sur le soleil de 10 s d'arc et une résolution temporelle élevée de 20 ms. Un nouvel instrument plus polyvalent, le réseau FASA (*frequency agile solar array*), capable d'imager le Soleil et son atmosphère à une résolution angulaire d'une seconde d'arc dans la plage de fréquences 0,1-30 GHz est actuellement à l'étude [Bastian et autres, 1998].



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BASTIAN, T. S., GARY, D. E., WHITE, S. M. and HURFORD, G. J. [1998] *Broadband imaging spectroscopy with a solar-dedicated array*. Proc. SPIE, Vol. 3357. Advanced technology MMW, radio, and terahertz telescopes. T. G. Phillips, ed. p. 609-619.
- D'ADDARIO, L. R. [1991] Time synchronization in orbiting VLBI. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. IM-40, p. 584-590.
- HEWISH, A., BELL, S. J., PILKINGTON, J. D. H., SCOTT, P. F. and COLLINS, R. A. [1968] Observations of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, Vol. 217, p. 709-713.
- HIRABAYASHI, H. *et al.* (52 coauthors) [1998] Overview and initial results of the very long baseline interferometry space observatory programme. *Science*, Vol. 281, p. 1825-1829.
- LEITCH, E. M. *et al.* [2002] Experiment design and first season observations with the degree angular scale interferometer. *Astrophys. J.*, Vol. 568, p. 28-37.
- LEVY, G. S. *et al.* (31 co-authors) [1989] VLBI using a telescope in Earth orbit. 1. The observations. *Astrophys. J.*, Vol. 336, p. 1098.
- LOVELL, J. E. J., MCCALLUM, J. N., REID, P. B., MCCULLOCH, P. M., BAYNES, B. E., DICKEY, J. M., SHABALA, S. S., WATSON, C. S., TITOV, O., RUDDICK, R., TWILLEY, R., REYNOLDS, C., TINGAY, S. J., SHIELD, P., ADADA, R., ELLINGSEN, S. P., MORGAN, J. S., & BIGNALL, H. E. [2013], «The AuScope geodetic VLBI array», *Journal of Geodesy* 87 527-538
- MORAN, J. M. [1998] *The submillimeter array*. Proc. Spie. Vol. 3357. Advanced technology MMW, radio, and terahertz telescopes, T. G. Phillips, ed., p. 208-219.
- PADIN, S. *et al.* [2001] First intrinsic anisotropy observations with the cosmic background imager. *Astrophys. J. Lett.*, L1-L5.
- PETRACHENKO, WILLIAM, BEHREND, DIRK, HASE, HAYO, MA, CHOPO, NIELL, ARTHUR, SCHUH, HARALD, & WHITNEY, ALAN 2013, «The VLBI2010 Global Observing System (VGOS)» EGU General Assembly, held 7-12 April, [2013] in Vienna, Austria, id. EGU2013-12867, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013EGUGA..1512867P>
- PRESTON, R. A., BURKE, B. F., DOXSEY, R., JORDAN, J. F., MORGAN, S. H., ROBERTS, D. H. and SHAPIRO, I. I. [1983] *The future of VLBI observatories in space. (Techniques d'interférométrie à très grande base)*. F. Biraud, ed., Cepadues, Toulouse, France.
- SEKIDO, M., IMAE, M., HANADO, Yu., HAMA, S., KOYAMA, Y., KONDO, T., NAKAJIMA, J., KAWAI, E., KURIHARA, N., ILYASOV, Yu. P., ORESHKO, V. V. and RODIN, A. E. [1998] Pulsar VLBI experiment with Kashima (Japan) – Kalyazin (Russia) baseline. *New Astronomy Rev.* Vol. 43, p. 599-602.
- SCHUH, H. and BEHREND, D. [2012], «VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry». *Journal of Geodynamics*, 61, 68-80.
- TAPPING, K.F., «The 10.7cm solar radio flux ( $F_{10.7}$ )», *Space Weather*, Volume 11, Issue 7, July [2013], Pages: 394–406.
- THOMPSON, A. R., MORAN, J. M. and SWENSON, G. W. [2001] *Interferometry and synthesis in radio astronomy*. 2nd ed. Wiley, New York, United States of America.
- USON, J. M., BAGRI, D. S. and CORNWELL, T. S. [1991] Radio detection of neutral hydrogen at redshift  $z = 3.4$ . *Phys. Rev. (Lett.)*, Vol. 67, p. 3328-3331.



## CHAPITRE 8

### Réduction des brouillages

Le présent Chapitre porte sur la réduction des brouillages radioélectriques en radioastronomie. Le Rapport UIT-R RA.2126 – *Techniques de limitation des brouillages radioélectriques en radioastronomie* analyse cette question de façon approfondie et donne de nombreuses références bibliographiques.

#### 8.1 Introduction - Objectifs

En radioastronomie, la limitation des brouillages consiste à réduire ou à supprimer l'incidence de signaux provenant de services actifs qui sont émis dans les bandes utilisées par la radioastronomie ou à l'extérieur de ces bandes. Les brouillages entraînent (presque) toujours une perte de données et une dégradation de la qualité des données. Lorsqu'ils surviennent à l'intérieur d'une bande attribuée au SRA, cela pose un problème de réglementation. En revanche, dans les bandes qui ne sont pas attribuées au SRA, aucune procédure réglementaire ne peut être invoquée en cas de perte de données. A l'évidence, la meilleure façon d'éviter ces problèmes est de prendre des mesures réglementaires pour limiter la présence de signaux brouilleurs; en matière de brouillages, mieux vaut prévenir que réduire. Des méthodes de réduction, notamment les méthodes proactives destinées à modifier l'environnement local de brouillage radioélectrique par des mesures réglementaires, les méthodes de prédétection et de postdétention, diverses méthodes de précorrélacion et les méthodes appliquées au niveau de la corrélacion et de la postcorrélacion, peuvent être introduites en différents points du système d'acquisition de données. Cela dit, plus un problème est géré en amont de la chaîne de traitement, plus le résultat est satisfaisant. En intervenant le plus tôt possible, on limite les pertes de données, les coûts en aval et la complexité du système. Il est plus facile de réduire les brouillages lorsque le rapport brouillage/bruit est élevé. Aussi, lorsque le brouillage radioélectrique est de faible intensité, il est préférable de le traiter plus tard dans la chaîne de traitement, après l'intégration des données, pour bénéficier d'un rapport signal/bruit (SNR) supérieur.

Pour des raisons scientifiques liées aux avancées technologiques, les systèmes actuels du SRA fonctionnent avec des largeurs de bande de plus en plus grandes et une sensibilité de plus en plus élevée. C'est pourquoi les observations occupent souvent des bandes attribuées à des services actifs, bandes pour lesquelles le SRA ne bénéficie d'aucune protection. D'où la nécessité d'employer des techniques de réduction des brouillages radioélectriques pour obtenir, dans ces bandes, des données astronomiques de bonne qualité.

L'exploitation du SRA sur de grandes largeurs de bande s'est heurtée à un problème majeur lors de la mise en service de dispositifs de faible puissance, à large bande et à étalement de spectre, non assujettis à licence et produits en série. Pour permettre au SRA de fonctionner de façon optimale, des solutions ingénieuses de réduction des brouillages s'imposent. Un autre problème qui se pose aux systèmes de radioastronomie hors bande concerne l'accès dynamique au spectre, qui autorise l'exploitation de fréquences libres (on parle d'«espaces vides»). Ainsi peut-on s'attendre à ce que les appareils de radiocommunication cognitifs utilisent une quantité de plus en plus grande de spectre sous une nouvelle forme de partage de fréquences. Du reste, l'exploitation large bande du SRA repose sur le même principe d'accès dynamique au spectre que ces nouveaux appareils.

## 8.2 Signatures et incidence des sources de brouillage radioélectrique

L'incidence réelle des brouillages sur les données produites par les télescopes de radioastronomie dépend de plusieurs facteurs, le premier étant le type de radiotélescope utilisé. Les télescopes monoparaboles sont les plus vulnérables. En effet, comme ils présentent une faible discrimination directionnelle contre les brouillages radioélectriques entrants, les signaux astronomiques et les signaux brouilleurs s'y additionnent de façon cohérente. Ce comportement tranche avec la sensibilité vis-à-vis des brouillages radioélectriques qui caractérise les télescopes intégrés dans les réseaux d'interférométrie; en effet, dans ce type de configuration, les brouillages pénètrent partiellement dans le système de façon incohérente, les grandes lignes de base faisant office de filtre spatial contre les brouillages. Tous les systèmes d'interférométrie utilisant des techniques de «blocage de franges» ont la faculté de rejeter les brouillages radioélectriques, et ce d'autant plus efficacement que la ligne de base est étendue. Cela étant, l'étalonnage d'une station du réseau reste perturbé par les brouillages radioélectriques présents au niveau de la station.

Le deuxième facteur dépend du type de l'observation. Dans les mesures du continuum, il est possible de sacrifier certains créneaux temporels ou certaines bandes de fréquences du diagramme temps-fréquence des observations. En revanche, dans le cas de l'observation des raies spectrales, la mesure est dégradée dès lors que le signal astronomique est directement perturbé par la fréquence et la largeur du brouillage radioélectrique.

Troisièmement, l'incidence sur les données dépend du type de brouillage radioélectrique. Le brouillage est-il variable dans le temps (de type impulsif), à bande étroite ou à large bande, et/ou y a-t-il une superposition de schémas de brouillage? Les émissions directes (et indirectes) des réseaux terrestres, qui dépendent de la densité de population et du niveau de vie des communautés locales, produisent un signal de fond persistant. Quant aux satellites et aux services aéronautiques, ils peuvent être à l'origine de composantes de brouillage radioélectrique constantes ou transitoires. Par ailleurs, la position d'un observatoire par rapport aux voies de circulation aéronautiques peut jouer sur la présence d'émissions directes de ces services et de réflexions de signaux de Terre, ceux provenant de radars d'aéroport par exemple. La plupart des brouillages radioélectriques sont le résultat d'un couplage, par les lobes latéraux, avec des services actifs. Il peut même arriver que des satellites ou des services aéronautiques provoquent un couplage destructif dans le faisceau principal; c'est notamment le cas des signaux à 94 GHz provenant du satellite Cloudsat. En plus des brouillages radioélectriques externes, il faut aussi compter avec les brouillages indésirables produits au niveau de l'observatoire lui-même par les ordinateurs et les composants électroniques qui s'y trouvent: ces sources, qui peuvent être identifiées, devraient être correctement blindées.

Quatrièmement, la variabilité du brouillage radioélectrique peut tout particulièrement gêner les observations astronomiques pour lesquelles le temps est un paramètre critique. Ainsi les brouillages variables et non répétitifs se produisant pendant l'étude de phénomènes transitoires et de pulsars peuvent-ils définitivement endommager des observations essentielles qui présentent un grand intérêt et ne peuvent pas être répétées. La variabilité des brouillages peut aussi perturber le séquençage des impulsions ainsi que l'étalonnage de données pour lequel le temps est un paramètre essentiel.

Enfin, depuis plusieurs années, avec la mise en service de nouvelles applications et le retrait d'autres, devenues obsolètes, le brouillage ambiant évolue rapidement. Les nouvelles applications à large bande et à étalement de spectre utilisées pour la radiodiffusion et la communication ainsi que les nouveaux dispositifs non assujettis à licence ont remplacé les signaux comportant des pics de forte puissance par des signaux plus larges et de moindre puissance, qu'il est difficile d'éliminer des données produites par le SRA. L'intensification de l'utilisation des fréquences et de l'accès dynamique au spectre modifie les caractéristiques du brouillage électromagnétique ambiant, et ce phénomène ira crescendo. La communauté de la radioastronomie sera donc amenée à adapter de plus en plus souvent ses procédures de réduction de l'incidence des brouillages radioélectriques sur les données qu'elle produit.

### 8.3 Méthodes de réduction des brouillages radioélectriques – notion de niveaux de réduction

Différentes méthodes de réduction des brouillages peuvent être utilisées selon les étapes du processus d'acquisition des données. La première méthode, qui est la plus efficace, consiste à contrôler les signaux de brouillage avant qu'ils ne pénètrent dans le récepteur en modifiant l'environnement de brouillage local et régional. A un deuxième niveau, on peut appliquer des méthodes de prédétection dans le récepteur lui-même, éventuellement en relation avec le système principal d'acquisition des données (*data-taking backend*). Un troisième niveau, consistant en des méthodes d'éradication numérique et de suppression des brouillages radioélectriques, peut être utilisé avant l'étape de corrélation. Compte tenu des progrès accomplis dans le domaine de la corrélation logicielle, ces méthodes numériques peuvent aussi être intégrées au processus de corrélation. On peut envisager un quatrième niveau consistant à appliquer des méthodes numériques après la corrélation et après l'intégration ou la mise en mémoire tampon des données. Enfin, un cinquième niveau de réduction des brouillages consiste à transformer (c'est-à-dire à éradiquer (*excising*) et à marquer (*flagging*)) les données astronomiques collectées afin d'éliminer les effets des sources de brouillage radioélectrique connues et inconnues.

L'efficacité de ces méthodes dépend du rapport brouillage/bruit, c'est-à-dire de la puissance relative du brouillage radioélectrique, ou du rapport de la variance du bruit du système à la variance du brouillage. La plupart des méthodes ne sont efficaces que si le brouillage radioélectrique est clairement détectable au sein des données et elles ne permettent pas de supprimer ses effets au-delà d'une certaine limite correspondant au niveau de bruit instantané. On peut prendre, comme facteur de qualité de ces méthodes, le gain de traitement obtenu après suppression ou réduction du brouillage radioélectrique, qui est donné par le ratio SNR(après)/SNR(avant).

Chaque niveau de réduction ayant ses propres limites, la qualité de l'une quelconque des méthodes dépend du degré de suppression requis. La largeur de bande occupée par le signal astronomique par rapport à celle du brouillage radioélectrique joue ici un rôle. Pour évaluer les résultats de la réduction des brouillages, il importe d'examiner l'affaiblissement du signal auquel on s'intéresse, car ce paramètre varie selon la méthode utilisée. De fait, l'empilage de plusieurs méthodes a un effet cumulatif, chaque niveau de réduction s'appliquant sur ce qui reste des éventuels signaux brouilleurs après l'exécution du traitement précédent. De plus, chaque méthode peut introduire un degré de «toxicité»; on dénomme ainsi les dégâts occasionnés aux données qui augmentent encore la dégradation incrémentale de leur qualité. La dégradation totale des données, qui est une mesure de la perte de données due aux traitements successifs de réduction des brouillages, est quantifiée par le rapport SNR (après traitement)/SNR (en l'absence de brouillage radioélectrique).

### 8.4 Méthodes proactives – modification de l'environnement de brouillage radioélectrique

La coordination avec les utilisateurs des services actifs et le recours à des réglementations nationales et internationales peuvent réduire la survenue des brouillages radioélectriques au niveau des stations de radioastronomie ainsi que leur impact sur les observations. L'amélioration et le renforcement du cadre réglementaire à l'échelon national, régional et international jouent un rôle important dans la protection de l'utilisation passive du spectre: on trouvera des informations à l'appui de cette approche dans le présent Manuel, dans les Recommandations UIT-R, en particulier celles de la série RA (radioastronomie), dans la série RA des Rapports UIT-R et dans le Manuel du CRAF (Comité des fréquences réservées à la radioastronomie). Pour modifier l'environnement de brouillage radioélectrique produit au niveau des télescopes par des émetteurs situés sur Terre, on peut définir des zones de coordination et des zones de silence radioélectrique. De nombreux observatoires bénéficient ainsi de réglementations locales et nationales qui interdisent l'installation d'émetteurs dans leur voisinage immédiat (entre 2 et 6 km). Des coordinations et des zones de silence de grande ampleur ont été mises en place pour quelques sites, notamment la National Radio Quiet Zone (zone nationale de silence radioélectrique) autour de Green Bank en Virginie occidentale (Etats-Unis d'Amérique), la Puerto Rico Coordination Zone (zone de coordination de Porto Rico) autour de l'observatoire d'Arecibo sur l'île de Porto Rico, ou encore la zone de coordination mise en place autour de l'observatoire ALMA dans le désert d'Atacama (Chili). Les environnements des nouveaux télescopes, comme ceux des deux sites envisagés pour le Square Kilometre Array (réseau d'un kilomètre carré), font actuellement l'objet de réglementations nationales

résolument novatrices, qui doivent permettre d'effectuer, sur les sites correspondants, des observations avec une sensibilité encore jamais atteinte.

Etant donné qu'il est préférable de résoudre les problèmes potentiels de brouillage radioélectrique avant la construction des sites de radioastronomie, il est important de recenser les émetteurs existants et les émetteurs en projet susceptibles de perturber les parties du spectre radiofréquences présentant un intérêt pour l'observatoire concerné, et ce en se tenant informé des changements en matière de délivrance de licences au niveau local et en suivant les tendances d'utilisation du spectre. Le contrôle du spectre peut servir à dégager ces tendances, à identifier les «voisins sur le spectre» et donc à «connaître son ennemi». Cet outil permet aussi de déterminer le pourcentage de pertes de données dues aux brouillages dans les bandes attribuées aux services passifs.

L'expérience montre que les observatoires eux-mêmes sont souvent des sources importantes de brouillage radioélectrique. Le matériel informatique et les équipements électroniques installés dans les bâtiments peuvent en effet produire des harmoniques et des émissions à large bande qui pénètrent dans le système de détection des télescopes. L'une des grandes priorités de tout observatoire est donc d'identifier et d'éliminer ces sources de brouillage. Utilisation d'armoires étanches aux brouillages radioélectriques et de cages de Faraday pour loger les équipements électroniques et informatiques, réduction de l'activité humaine (salles de commande à distance) et utilisation limitée des ordinateurs sur place, toutes ces mesures contribuent à faire d'un observatoire une zone de «silence radioélectrique». Entre autres travaux préparatoires nécessaires à la construction d'un observatoire capable d'effectuer des mesures très sensibles, il convient de dresser une liste des activités à mener.

## **8.5 Prédétection et postdétection**

Une méthode classique d'éradication des brouillages radioélectriques dans le domaine fréquentiel consiste à installer un filtre passe bande ou un filtre passe haut/passe bas dans un récepteur. Il en résulte un affaiblissement d'insertion et une augmentation substantielle de la température du système aux fréquences situées en limite de bande. La technologie des filtres supraconducteurs peut considérablement réduire les effets indésirables de ces filtres. Le filtrage des bandes du SRA permet de se prémunir des dégradations dues aux signaux de forte intensité situés en dehors des bandes. Dans le cas des observations du continuum, le filtrage entraîne également une perte de données. S'agissant des observations des raies spectrales, il est souvent indispensable lorsque le brouillage radioélectrique se produit à une fréquence critique à l'intérieur de la bande passante du récepteur.

La méthode du blocage ou de l'effacement appliquée au processus d'acquisition des données, qui consiste par exemple à arrêter leur accumulation dans le corrélateur, peut être utilisée pour éradiquer les brouillages dans le domaine temporel. Cette méthode a donné de bons résultats dans le cas des signaux périodiques de type impulsionnel. Par exemple, les ingénieurs de l'observatoire d'Arecibo ont développé un système de blocage des signaux radar d'aéroport, qui consiste à suspendre le traitement du corrélateur. Le système est synchronisé sur la période des impulsions radar pendant une fenêtre de temps qui est calculée pour englober les artefacts radar consécutifs dus au relief et à la diffusion par trajets multiples. Pour compter les données perdues, on prend en compte le temps d'observation perdu en raison de la survenue de ce type de brouillage à l'intérieur d'une bande attribuée au SRA.

De nombreux travaux de recherche ont été menés pour concevoir des récepteurs robustes présentant un degré élevé de linéarité, de telle sorte qu'ils ne soient pas perturbés par les environnements de brouillage sévère. Des observations à large bande sont possibles lorsque les systèmes de réception sont suffisamment linéaires pour qu'il n'y ait ni distorsion de repliement, ni produits d'intermodulation, ni surcharge.

## **8.6 Précorrélation**

### **8.6.1 Traitement numérique au niveau de l'antenne**

Un traitement numérique en temps réel peut être intégré au traitement en fréquence intermédiaire des radiotélescopes monoparaboles, au traitement effectué dans la station et/ou au processus de formation de faisceau dans le cas des équipements de type réseau. Cette méthode, qui présente un bon rapport coût-efficacité, donne de bons résultats dans le cas des brouillages radioélectriques (transitoires) de type impulsionnel. Elle

nécessite un échantillonnage rapide des données et la disponibilité de cycles de traitement informatique au niveau de chaque station. La quantité de données perdues dépend de la nature transitoire du brouillage. Le marquage (*flagging*) et l'éradication (*excision*) en temps réel, à la fréquence intermédiaire, permettent de réduire au minimum la perte de données occasionnée par la méthode marquage-éradication en ne traitant que les segments temporels et fréquentiels brouillés; cette procédure ne devrait pas causer de dommages collatéraux aux intervalles de temps et de fréquence voisins. Ce principe diffère du traitement postcorrélacion, qui est plus radical, car le marquage et l'éradication de l'antenne et de la ligne de base s'effectuent alors sur des échantillons de données intégrés.

Il est possible d'appliquer un seuillage à la fois dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel lorsque le brouillage radioélectrique présent dans les données échantillonnées est identifiable et de forte intensité et que son occupation spectrale est relativement faible. Mis en oeuvre pour la première fois pour éliminer les brouillages au niveau du télescope Ratan 600, le principe du seuillage a depuis été utilisé à de nombreuses reprises. Son application récente sur le radiotélescope à synthèse d'ouverture de Westerbork a été concluante: les données à double polarisation à 20 MHz provenant de chacun des quatorze télescopes ont été traitées en temps réel. Cette méthode du seuillage a aussi été appliquée aux données de pulsars avant repliement sur la période.

Les méthodes de filtrage en sous-espaces consistent à rechercher une signature particulière dans la composante de puissance de brouillage des données en vue de repérer et d'éliminer cette composante. Une application particulièrement efficace de cette méthode est la recherche d'une cyclo-stationnarité au sein des données, qui donne de bons résultats dans le cas des signaux de brouillage radioélectrique à modulation numérique.

Une autre forme d'éradication en sous-espaces repose sur l'analyse de la distribution de probabilité des signaux. Etant donné que la contribution du brouillage radioélectrique transforme le spectre de puissance en une distribution (khi-deux) non centrale, déterminée par ses moments d'ordres supérieurs, elle peut être éliminée des données. Une autre solution consiste à repérer et à éliminer la composante de brouillage radioélectrique à partir du coefficient d'aplatissement (kurtosis) (moment d'ordre 4 du spectre de puissance). Cette solution a été appliquée à des observations solaires monoparabole et au traitement (post)corrélacion dans un environnement de corrélacion logicielle. Le filtrage médian et l'exploitation des propriétés médianes des systèmes multisources permettent aussi de tirer parti des propriétés statistiques des données et de réduire efficacement et en temps réel le brouillage radioélectrique des données de raies spectrales.

Les méthodes de réduction des brouillages par précorrélacion qui nécessitent l'élimination de certains échantillons entraînent des modifications de l'étalonnage de gain des données. Il faut donc tenir un journal précis de ces opérations afin de déterminer l'incidence de ces méthodes sur les données et sur la perte de données associée. Le remplacement des données touchées dans le domaine fréquentiel (ou temporel) par une valeur de référence bien ajustée n'a d'incidence que sur la valeur quadratique moyenne des canaux concernés.

### 8.6.2 Annulation adaptative (temporelle) du bruit

L'annulation adaptative du bruit (ANC, *adaptive noise cancellation*) est souvent utilisée dans le domaine des communications et des technologies militaires. Le principe de base du filtrage adaptatif temporel consiste à calculer la transformée de Fourier rapide (TFR) des données entrantes, à effectuer une opération d'adaptation sur les segments (*bins*) de fréquence, et à revenir dans le domaine fréquentiel via une TFR inverse. Cette méthode, qui repose sur un filtrage de Wiener, est adaptée aux signaux brouilleurs présentant un rapport brouillage/bruit élevé, c'est-à-dire lorsque le brouillage radioélectrique prédomine par rapport au bruit du système. La suppression du signal brouilleur peut être à peu près égale au rapport brouillage/bruit instantané. Les filtres adaptatifs donnent de bons résultats lorsque l'information spectrale ne présente pas d'intérêt, par exemple dans le cas de l'étude des pulsars ou du continuum. Cette méthode a également donné de bons résultats avec des réseaux multisources ou plan-focal sur paraboles isolées (voir le paragraphe suivant). Une variante du filtrage adaptatif consiste à retrancher un canal de données de référence d'un canal de données de signal en utilisant une copie du brouillage radioélectrique; pour ce faire, on compare le signal «source dans le champ de visée + brouillage radioélectrique» (*on-source plus RFI*) et le signal «source hors champ de visée + brouillage radioélectrique» (*off-source plus RFI*). Dans certains systèmes de télescopes actuels, la copie du brouillage radioélectrique provient d'une antenne de référence auxiliaire spécifique à source de brouillage. Mais dans ce cas, chaque source de brouillage radioélectrique nécessite sa propre antenne.

La technique consistant à procéder à une estimation paramétrique de signaux de brouillage radioélectrique connus et à les retrancher des données a été appliquée avec succès aux émissions de satellites GLONASS à code C/A en s'appuyant sur leurs propriétés de modulation, qui sont connues: une annulation du signal de plus de 20 dB a été obtenue sans recourir à des antennes auxiliaires. Les techniques de filtrage adaptatif ont récemment été mises en oeuvre à l'observatoire d'Arecibo en vue de supprimer la signature des émissions L3 provenant d'un seul satellite GPS.

### **8.6.3 Filtrage spatial et annulation par un point zéro du diagramme de faisceau**

Tous les réseaux multi-antennes présentent, dans leur diagramme de faisceau, des lobes latéraux et des points zéro, dont on peut se servir pour réduire les signaux provenant de sources de brouillage radioélectrique localisées. En règle générale, les systèmes adaptatifs utilisant un algorithme de synthèse de faisceau exigent un rapport brouillage/bruit élevé et ne peuvent suivre, pendant une observation, qu'un petit nombre de sources de brouillage radioélectrique. Il faut en outre que ces sources de brouillage restent stables et prévisibles tout au long de l'observation. Normalement, le filtrage spatial en mode synthèse de faisceau appliqué à un nombre limité de sources de brouillage ne dégrade pas l'image produite par le faisceau principal.

Des techniques d'antennes intelligentes, reposant sur de multiples capteurs présents dans les systèmes radar et de communication, sont appliquées pour déterminer la direction d'arrivée et mettre en oeuvre les algorithmes de synthèse de faisceau. De même, les télescopes multicapteurs de nouvelle génération avec visée directe de sources identifiées de brouillage radioélectrique (par exemple, le Réseau basses fréquences [LOFAR] et le Murchison Widefield Array [WMA]) permettent d'optimiser le processus de synthèse de faisceau en y intégrant l'annulation adaptative et le filtrage spatial en temps réel des sources de brouillage en question. Citons un cas concret de mise en oeuvre: cent antennes LOFAR ont été utilisées pour générer deux faisceaux distincts, tout en plaçant un zéro permanent dans une direction précise, en l'occurrence  $15^\circ$  au-dessus de l'horizon. Les réseaux à commande de phase, multicapteurs, correctement étalonnés offrent la possibilité d'orienter un point zéro pour suivre un satellite tout en conservant un faisceau de gain élevé dans la direction de la cible. Cela étant, la complexité de traitement augmente rapidement lorsque l'on doit se protéger d'un système à plusieurs satellites.

Dans le cas des réseaux dispersés, qui présentent des lignes de base relativement grandes, la corrélation peut être effectuée avant la synthèse des faisceaux. Si l'on se place dans l'hypothèse où les sources de brouillage radioélectrique sont localisées, leur élimination s'obtient alors en traitant le flux de données par courts intervalles de temps et en appliquant une pondération complexe pendant l'étape de traitement de l'image. Les simulations du filtrage spatial postcorrélation par ordinateur montrent que l'application de l'algorithme CLEAN sur un faisceau corrigé en tenant compte du brouillage radioélectrique peut donner de bons résultats.

Les réseaux de type plan-focal et les récepteurs multifaisceaux offrent de nouvelles possibilités de filtrage spatial, étant donné que chacune des sources élémentaires capte un signal céleste indépendant combiné avec le signal de brouillage radioélectrique commun. De plus, dans un système multifaisceaux, l'une des sources peut toujours être utilisée comme antenne de référence.

## **8.7 Pendant l'étape de corrélation**

Pendant le processus de corrélation, les données numérisées sont généralement intégrées sur des intervalles de temps qui vont de la durée d'échantillonnage à plusieurs secondes, ce qui augmente le rapport brouillage/bruit de façon significative. Par conséquent, un brouillage radioélectrique persistant, mais faible, qui n'a pas pu être traité en temps réel, ainsi que les restes (spectraux) de faible intensité provenant de précédentes opérations de réduction des brouillages sont disponibles en vue d'un traitement. D'un autre côté, cette intégration peut entraîner une réduction d'intensité de certains pics importants des signaux de brouillage radioélectrique variables. Dans le cas des instruments de type réseau, le filtrage spatial résultant de la poursuite des retards (franges) d'une source céleste entraîne aussi une réduction de l'intensité des brouillages radioélectriques de Terre dans les données de corrélation croisée.

A cette étape du processus d'acquisition des données, il est possible d'incorporer des protocoles d'anticoïncidence pour identifier les composantes du brouillage radioélectrique; on peut aussi intégrer des traitements de réduction numériques et utiliser les données provenant d'une antenne de référence. Les corrélateurs logiciels de nouvelle génération permettent d'intégrer des applications (marquage reposant sur le



coefficient d'aplatissement) avant et après les protocoles d'empilement et de corrélation FX (transformée de Fourier avant multiplication). La réduction des brouillages à différentes étapes au cours du traitement est mise en oeuvre dans le réseau LOFAR. Dans le cas des installations monoparaboles, le processus de corrélation de (multiples) bandes isolées peut intégrer des méthodes de seuillage ou des méthodes statistiques et une annulation du bruit au moyen d'une antenne de référence.

Le recours à un traitement numérique et à des données provenant d'antennes de référence pendant la corrélation logicielle est équivalent au traitement de précorrélation en bande de base décrit plus haut. A noter néanmoins que la mise en oeuvre de ce principe dans des systèmes matériels (existants) de type conventionnel nécessite l'ajout de logiciels et de matériels spéciaux.

## 8.8 Postcorrélation - avant ou pendant la formation des images

La postcorrélation traditionnelle consiste à marquer (*flagging*) et à éradiquer (*excising*) les brouillages. Ces opérations, souvent manuelles, demandent beaucoup de temps. Comme elles sont appliquées sur des données intégrées et corrélées, la perte résultant du marquage peut être assez importante, d'autant plus que la totalité des créneaux temporels, des lignes de base et/ou des antennes risque d'être marquée. Les choses se présentent différemment avec le marquage ou l'éradication au niveau des antennes à la fréquence intermédiaire, car dans ce cas, de petits sous-ensembles seulement sont marqués, ce qui, logiquement, entraîne une perte de données globale moins importante (en pourcentage).

Il est possible de mettre en place un marquage et une éradication automatisés pendant le traitement en ligne ou hors ligne des données corrélées (intégrées); en effet, on peut éliminer la composante de brouillage radioélectrique sans perdre trop de données en appliquant des traitements en sous-espaces ou statistiques évolués (voir le § 8.6.1).

A telle enseigne qu'une antenne de référence a été mise en place à l'étape de postcorrélation pour éliminer, à partir des relations de fermeture disponibles, le signal émis par une source dont les caractéristiques sont connues.

Les équipements de réseau utilisent des techniques de blocage de franges et de compensation des retards afin de maintenir à zéro la fréquence des franges de la position d'observation centrale pendant toute la période d'observation. Il en résulte que les composantes des données correspondant au brouillage radioélectrique satellitaire et stationnaire (de Terre) se distinguent par une fréquence des franges plus élevée que celle des sources astronomiques (à la fréquence de blocage des franges). Ce mouvement (relatif) distinct permet l'identification hors ligne des sources de brouillages stationnaires et leur élimination à la fois des données corrélées et du plan image, et ce sans perte de données. Un code appliqué pour la première fois au télescope GMRT est aujourd'hui intégré dans le logiciel AIPS.

## 8.9 Mise en oeuvre au niveau des télescopes - stratégie

Le processus d'acquisition de données des observatoires de radioastronomie suit l'évolution rapide de la technologie. Les signaux analogiques sont désormais numérisés le plus tôt possible, ce qui permet d'appliquer aux données des traitements numériques sur la quasi-totalité de la chaîne. L'amélioration des performances permet de traiter des données présentant une plus grande largeur de bande, avec une résolution temporelle plus importante et une résolution en fréquence supérieure (< kHz).

Actuellement, de nombreux systèmes de traitement principaux (*backends*) ne permettent pas de réduire les brouillages dans les premières étapes de la chaîne de gestion des données, sauf à apporter des modifications (très substantielles) aux équipements matériels. A l'inverse, les systèmes principaux de nouvelle génération et la corrélation de type logiciel facilitent la mise en oeuvre de la réduction des brouillages à différentes étapes du traitement.

Etant donné que toutes les méthodes de limitation des brouillages nécessitent un seuil bien défini du rapport brouillage/bruit, l'élimination de l'essentiel du brouillage radioélectrique passe nécessairement par l'application de méthodes successives (en couches), et ce afin d'exploiter l'intégration progressive des données et le rapport brouillage/bruit croissant. Si aucune méthode n'est en mesure de supprimer le brouillage radioélectrique en deçà du bruit de fond qui se présente, il est éventuellement possible, à chaque étape, de supprimer ce qui reste

des brouillages après l'exécution des étapes précédentes, ainsi que les brouillages de faible intensité qui ne sont détectables qu'après intégration.

Dans le cas des équipements de type réseau, la mise en oeuvre d'antennes auxiliaires dépend de la possibilité d'intégrer les signaux en sortie de ces antennes dans le système de traitement, (et tout particulièrement) au niveau du corrélateur. En règle générale, les antennes de référence orientées dans une direction donnée recueillent les signaux d'une source de brouillage radioélectrique bien particulière et sont donc moins efficaces dans un environnement complexe.

L'intervention humaine dans le processus de réduction des brouillages radioélectriques joue un rôle important sur le plan opérationnel. C'est pourquoi il pourra être préférable d'appliquer un traitement en ligne et en temps réel, adaptable à toutes sortes de signatures de brouillage, plutôt que de restreindre les possibilités en recourant à des antennes de référence et/ou à un filtrage spatial applicables à des émetteurs fixes et connus. Il y a toutes les chances que ce soit le cas jusqu'à ce qu'un contrôleur à base d'intelligence artificielle puisse être invoqué pour guider et piloter le système de réduction des brouillages radioélectriques.

Les interféromètres sont moins vulnérables aux brouillages radioélectriques. En effet, le blocage des franges et la décorrélation par compensation des retards assurent l'élimination naturelle des brouillages sur les grandes lignes de base. Cela étant, les brouillages radioélectriques intenses amplifient le bruit du système et perturbent toujours l'étalonnage et les visibilité complexes des stations. Dans les stations d'interférométrie VLBI et les réseaux de capteurs répartis, il est possible de mettre en oeuvre des techniques de réduction des brouillages au niveau de chaque station pour limiter l'incidence du brouillage radioélectrique local sur l'ensemble du système.

Pour étalonner correctement le système, il est nécessaire de tenir un journal précis de toutes les données touchées de façon à déterminer les bonnes pondérations à appliquer aux procédures ultérieures d'auto-étalonnage, de nettoyage et de formation d'image.

Pour les futures mises en oeuvre de réduction des brouillages radioélectriques, il faudra envisager des méthodes plus évoluées que les simples algorithmes de marquage et d'éradication des brouillages (kurtosis ou autre) qui sont aujourd'hui les plus fréquemment utilisés. Les méthodes statistiques utilisant des moments d'ordre supérieur ouvrent la possibilité de supprimer des composantes de brouillage radioélectrique sans incidence sur le reste des données. Il existe en outre des méthodes qui permettent de restaurer partiellement les données et donc de limiter les pertes. Le filtrage adaptatif des systèmes à étalement de spectre pourrait être envisageable, à condition que le schéma de modulation numérique soit connu.

## 8.10 Conclusions

Les traitements de données en ligne et hors ligne ont fait la preuve de leur efficacité dans la réduction des brouillages radioélectriques qui perturbent les observatoires de radioastronomie. Si les solutions efficaces de réduction des brouillages radioélectriques se diversifient constamment, le choix de la méthode appropriée dépend fortement des caractéristiques du brouillage, du type de radiotélescope et du type d'observation. En particulier, dans un environnement de brouillage variable, il pourra être préférable d'appliquer un traitement des données en ligne et en temps réel; en revanche, lorsque les sources de brouillages sont fixes et connues, on donnera éventuellement la préférence à des mesures spéciales utilisant des antennes de référence et un filtrage spatial. Par ailleurs, le traitement en ligne automatisé, qui ne nécessite pas d'intervention humaine pendant le processus de réduction des brouillages, pourra constituer une solution intéressante.

Il n'existe donc pas de méthode universelle de limitation des brouillages radioélectriques dans les données astronomiques. L'efficacité de la méthode dépend du rapport brouillage/bruit et des caractéristiques en temps et en fréquence du brouillage radioélectrique. Il n'est pas toujours possible d'effectuer une évaluation quantitative de la méthode utilisée, car les algorithmes de réduction des brouillages sont généralement des processus non linéaires qui peuvent modifier les caractéristiques du bruit ainsi que l'étalonnage. La perte globale de données est un facteur qui guide le choix de la méthode.

Lorsque l'environnement de brouillage radioélectrique est moins spécifique, il pourra être nécessaire d'appliquer plusieurs méthodes. A noter cependant que, d'une part, la suppression du brouillage radioélectrique à chaque étape de réduction modifie les caractéristiques des données et que, d'autre part, l'effet cumulatif de ces réductions n'est pas linéaire, mais correspond plutôt à la somme de ce qui est pratiquement réalisable.

La diminution rapide du coût du matériel informatique et de la numérisation des données ouvre des perspectives en ce qui concerne la mise en oeuvre et l'automatisation des algorithmes de réduction des brouillages radioélectriques. Il devient ainsi possible d'augmenter la largeur de bande, la résolution temporelle et la résolution en fréquence des observations astronomiques. Cependant, en raison de l'augmentation du volume de données à traiter, il sera nécessaire de mettre en place des traitements en pipeline pour la réduction automatisée des données ainsi que et des algorithmes automatiques associés de limitation des brouillages.

De nouvelles technologies de communication et de radiodiffusion pénètrent le marché, souvent sous la forme de dispositifs mobiles non assujettis à licence. Comme ils changent en permanence de position, ils sont impossibles à contrôler et viendront bientôt perturber le fonctionnement des observatoires. Aussi est-il nécessaire de plancher sur de nouveaux algorithmes destinés à supprimer, dans les données astronomiques, les signaux de ce type. En particulier, les dispositifs à étalement de spectre (à bande ultralarge) sont problématiques pour les services passifs, car leurs schémas de modulation numérique dépassent les limites des attributions de fréquences. Les estimations actuelles semblent indiquer que le nombre de dispositifs émetteurs par personne devrait augmenter dans des proportions considérables et que bon nombre d'entre eux reposeront sur l'accès dynamique au spectre.

En radioastronomie, la marge de découverte est largement déterminée par les caractéristiques techniques des systèmes d'observation et par des facteurs limitatifs, notamment l'environnement de brouillage radioélectrique. Si les télescopes de nouvelle génération sont construits sur les sites les plus protégés que l'on puisse trouver, il n'en reste pas moins que les installations actuelles doivent coexister avec les conditions locales. Pour que les brouillages radioélectriques ne deviennent pas le facteur limitatif de ces installations, il faut absolument placer la gestion du spectre au premier rang des priorités.



## CHAPITRE 9

### Zones de silence radioélectrique

#### 9.1 Introduction

Le présent Chapitre porte sur la définition des zones de silence radioélectrique (ZSR) et sur les questions essentielles relatives à leur mise en place et à leur maintien. On trouvera dans le Rapport UIT-R RA.2259 – *Characteristics of radio quiet zones* une description plus complète et de nombreux exemples.

##### 9.1.1 Zone de silence radioélectrique: définition et critères d'ordre général

Etant donné que les observations de radioastronomie effectuées à la surface de la Terre sont par nature sensibles aux brouillages radioélectriques, intentionnels ou non, provenant de sources artificielles, certaines administrations ont mis en place des zones de silence radioélectrique (ZSR). On entend ici par ZSR toute zone géographique reconnue dans laquelle les procédures habituelles de gestion du spectre ont été modifiées dans l'objectif précis de réduire ou d'éviter les brouillages causés aux radiotélescopes et ainsi d'optimiser l'environnement dans lequel s'effectuent les observations.

On peut appliquer, pour ce faire, diverses procédures, selon les bandes de fréquences, les périodes de temps et/ou les classes des sources de brouillage. Les contrôles peuvent être d'ordre technique, géographique et/ou réglementaire. On appliquera donc des définitions et des méthodes de gestion des ZSR différentes en fonction des radiotélescopes et de leurs exigences particulières.

La plupart des restrictions mises en place dans les ZSR concernent les émetteurs fixes de Terre, et non les émissions de dispositifs aéroportés ou de satellite. Ce choix s'explique par le fait que les brouillages causés par des sources mobiles, en particulier aéronautiques, sont le plus souvent de courte durée; ces brouillages sont faciles à repérer, mais une fois identifiés, leur source est souvent déjà loin. Aucune ZSR n'impose de restriction sur les émissions de satellite. Le Rapport UIT-R RA.2259 recense les très nombreux contrôles utilisés et fournit des exemples de diverses ZSR mises en place à travers le monde.

Il importe de souligner que ZSR ne signifie pas nécessairement absence totale d'émissions radioélectriques. En effet, la cohabitation avec un certain nombre d'appareils d'origine industrielle restera toujours inévitable. Dans les ZSR, il peut être prévu de notifier les autres utilisateurs et de négocier la réduction des brouillages. Une ZSR est donc une zone tampon qui permet de mettre en oeuvre des mécanismes visant à protéger les observations de radioastronomie contre les brouillages radioélectriques préjudiciables, et ce via des stratégies efficaces de réduction des brouillages et une régulation des émetteurs radiofréquences.

##### 9.1.2 Rôle de la réglementation

Les contrôles réglementaires en matière de brouillages radioélectriques au niveau local sont gérés par les régulateurs publics à l'échelon national. Le plan de fréquences est un élément essentiel de la réglementation nationale. Il recense les attributions des bandes de fréquences aux différents services, notamment les attributions à la radioastronomie. Ces plans de fréquences nationaux s'appuient sur le Règlement des radiocommunications de l'UIT dans la mesure où cela est nécessaire pour éviter les brouillages préjudiciables entre pays.

Pour ce qui est des zones de silence radioélectrique, les régulateurs nationaux peuvent choisir de mettre en place divers contrôles parmi ceux décrits dans le Rapport UIT-R RA.2259 et d'aider à la résolution des problèmes de brouillages préjudiciables qui se posent lorsque la réglementation n'est pas respectée.

Dans le cas de brouillages mettant en jeu plusieurs administrations nationales, l'UIT peut apporter sa contribution à la résolution des problèmes. Il est peu probable que cette procédure soit nécessaire dans le cas des ZSR.

## **9.2 Considérations touchant à la mise en place d'une zone de silence radioélectrique (ZSR)**

### **9.2.1 Considérations d'ordre géographique**

Outre le fait d'éloigner les stations de radioastronomie autant que possible des zones à forte densité de population, il est utile de les placer dans des zones bénéficiant de l'effet d'écran naturel du relief. En outre, certains observatoires ont trouvé avantage à entourer leurs radiotélescopes de forêts de conifères, qui, grâce à la teneur en humidité de leurs aiguilles, offrent une protection supplémentaire contre les brouillages radioélectriques dans la direction de l'horizon, en particulier aux fréquences supérieures à quelques gigahertz. Les observatoires situés sur des pics montagneux et présentant de très longues lignes de visibilité sont particulièrement problématiques pour la coordination des ZSR.

Dans l'un des modèles de ZSR, aucun émetteur n'est autorisé à l'intérieur de la zone de silence, éventuellement au-dessus d'une bande de fréquences particulière, qui est liée aux besoins opérationnels du radiotélescope. Dans un autre modèle, les émetteurs sont autorisés à condition que le niveau de signal reçu par la station de radioastronomie ne dépasse pas un seuil de brouillage spécifié, ici encore au-dessus d'une certaine gamme de fréquences. On trouve aussi des zones de silence qui combinent les deux modèles, avec un «anneau intérieur» dans lequel aucun émetteur n'est autorisé et un «anneau extérieur» dans lequel tout émetteur doit respecter les critères de brouillage spécifiés. A noter que certaines zones de silence couvrent la totalité du spectre radioélectrique.

Certains brouillages parmi les plus importants causés aux observatoires de radioastronomie sont dus aux aéronefs. Il convient donc d'examiner la possibilité de définir, au niveau national, une zone d'interdiction de vol au-dessus de certains observatoires. Cette mesure permettra de limiter, mais pas d'éliminer les sources de brouillage aéroportées, car l'horizon radioélectrique d'un aéronef en altitude de croisière peut avoisiner les 400 km.

### **9.2.2 Considérations relatives à la fréquence**

La gamme de fréquences d'exploitation d'une ZSR doit être clairement en rapport avec la protection requise pour assurer le bon fonctionnement des instruments astronomiques situés à l'intérieur de la zone. Autrement dit, seules les fréquences qui sont nécessaires pour assurer la protection du fonctionnement des instruments présents et en projet doivent être réglementées. Cela étant, compte tenu des grandes largeurs de bande des récepteurs modernes et du souhait de suivre les décalages Doppler des signaux vers des fréquences inférieures dans l'Univers en expansion, la réglementation concerne nécessairement des gammes de fréquences étendues. Aussi une ZSR donnée couvrira-t-elle probablement les plages de fréquences utilisées par de nombreux autres systèmes de radiocommunication.

### **9.2.3 Incidence des brouillages radioélectriques sur les observations du SRA**

Les effets des brouillages sur les observations radioélectriques varient considérablement. Ainsi, selon leur intensité, les brouillages peuvent entraîner une simple augmentation des niveaux de bruit, que l'on parviendra à limiter, ou aller jusqu'à endommager définitivement les récepteurs des radiotélescopes. Pour le bon fonctionnement du SRA, les brouillages radioélectriques ne devraient jamais atteindre une intensité telle qu'ils amènent les amplificateurs des récepteurs à fonctionner dans leur domaine de non-linéarité. Pour autant, lorsque les brouillages radioélectriques sont suffisamment faibles pour ne pas empêcher les observations, il est toujours nécessaire de les atténuer. Le plus grand avantage des ZSR est qu'elles présentent, par définition, de faibles niveaux de brouillage radioélectrique, ce qui non seulement protège les récepteurs de radioastronomie, mais permet aussi d'appliquer les méthodes d'atténuation des brouillages les plus simples et les plus faciles à mettre en oeuvre. On trouvera une étude approfondie de l'incidence des brouillages radioélectriques sur les observations du SRA dans les Chapitres 6 et 8.

## **9.3 Environnement électromagnétique**

Les sources de brouillages susceptibles de perturber les observations de radioastronomie sont multiples et variées, chacune nécessitant éventuellement l'application d'une méthode d'atténuation différente.

Les problèmes de brouillages individuels dus à des émetteurs isolés peuvent, le plus souvent, être contrés grâce aux procédures existantes de gestion du spectre. Cela étant, la multiplication des systèmes de communication mobile et autres appareils électroniques émettant intentionnellement ou non des signaux entraîne une augmentation du bruit de fond. Il est donc essentiel de mettre en place un programme de mesures systématiques du bruit de fond et de sa variation dans le temps afin d'identifier les problèmes avant qu'ils ne se manifestent en causant d'importantes pertes de données et de temps d'observation.

### **9.3.1 Les sources de rayonnements intentionnels**

On entend par «sources de rayonnements intentionnels» des systèmes ou dispositifs qui produisent des émissions radiofréquences à des fins de communication ou de détection; l'émission d'énergie radioélectrique est donc intrinsèque à leur fonctionnement. En règle générale, leur plage de fréquences, leur largeur de bande, leur puissance d'émission, leur schéma de modulation et autres paramètres d'exploitation sont connus ou peuvent être évalués avec une certaine précision. Le plus souvent, les sources de rayonnements intentionnels fonctionnent dans des bandes de fréquences étroites contrairement aux sources de rayonnements non intentionnels et aux récepteurs de radioastronomie, qui couvrent de larges bandes.

L'UIT-R a défini un grand nombre de services radioélectriques, parmi lesquels les systèmes de Terre (mobile aéronautique, radionavigation aéronautique, amateur, radiodiffusion, fixe, mobile terrestre, mobile maritime, radionavigation maritime, auxiliaires de la météorologie, radiolocalisation, radionavigation, fréquences étalon et signaux horaires) ainsi que les systèmes par satellite (exploration de la Terre par satellite, fixe par satellite, inter-satellites, météorologie par satellite, mobile par satellite, exploitation spatiale et recherche spatiale).

Les dispositifs radioélectriques assujettis à licence sont ceux dont l'exploitation a été autorisée par le régulateur national. Ils peuvent être exploités sous licence à titre individuel, auquel cas le régulateur a connaissance de l'emplacement (ou de la zone d'exploitation), de la fréquence, de la puissance, de la bande passante, du schéma de modulation, de la hauteur d'antenne, du diagramme de rayonnement et autres paramètres de la station. Dans ce cas, un certain niveau de contrôle est possible au niveau de la zone de silence radioélectrique: il suffit de contraindre ou de limiter certains types d'émetteur, par exemple en spécifiant la bande de fréquences ou le niveau de puissance. De nombreuses administrations ont également mis en place une option d'octroi de licences pour l'utilisation du spectre, en vertu de laquelle les utilisateurs sont autorisés à émettre dans une bande de fréquences donnée, dans une zone géographique précise, et éventuellement pour un laps de temps spécifié. Conformément à leur licence, les utilisateurs sont autorisés à mettre en service, comme ils le souhaitent, des émetteurs radioélectriques fonctionnant dans la plage de fréquences et la zone géographique désignées. La supervision de la zone de silence radioélectrique est plus complexe dans ce cas que pour les dispositifs susmentionnés individuellement assujettis à licence, à moins que les conditions d'octroi de licences pour l'utilisation du spectre ne mentionnent expressément les limites de la ZSR.

Les dispositifs exploités sous licence catégorielle (ou non assujettis à licence) sont ceux qui fonctionnent sans accord de licence spécifique entre l'utilisateur et le régulateur. Ces dispositifs ne sont autorisés à fonctionner que dans certaines bandes de fréquences identifiées, et leur puissance, leur bande passante et d'autres paramètres sont limités par la réglementation nationale. Le plus souvent, il s'agit de dispositifs mobiles à faible puissance: téléphones sans fil, appareils WiFi, étiquettes d'identification par radiofréquences, systèmes d'ouverture des véhicules sans clé, etc. Ce sont en général des dispositifs grand public ou des appareils utilisés dans l'industrie et déployés à grande échelle. La régulation des émetteurs sous licence catégorielle en vue de protéger les zones de silence radioélectrique est plus difficile que dans le cas des dispositifs assujettis à licence, car le régulateur national ne connaît ni leur emplacement ni d'autres paramètres relatifs à ces émetteurs.

Comme on l'a vu plus haut, les émetteurs radioélectriques aéroportés aussi peuvent brouiller les récepteurs de radioastronomie.

### **9.3.2 Les sources de rayonnements non intentionnels**

Les sources de rayonnements non intentionnels émettent un bruit radioélectrique qui est un sous-produit de leur fonction principale. Le plus souvent, ces rayonnements présentent une densité spectrale de puissance inférieure à celle des sources de rayonnements intentionnels, mais couvrent des bandes de fréquences plus larges. L'énergie radioélectrique émise ne présente pas de caractéristiques spécifiques en termes de niveau de puissance, de fréquences ou de propriétés statistiques; elle correspond généralement à l'association d'un bruit

de fond de type gaussien et d'un bruit de type impulsionnel dont l'intensité est plus élevée, mais la probabilité plus faible.

Les équipements grand public et à usage industriel sont susceptibles d'émettre des brouillages radioélectriques. Si les niveaux de brouillages produits par un dispositif isolé peuvent ne pas dépasser les niveaux prescrits par les normes établies, le rayonnement total émis par un ensemble de dispositifs peut être suffisamment intense pour brouiller les observatoires de radioastronomie. Ce type de brouillage a toutes les chances de présenter un spectre à large bande assimilable à du bruit, sur lequel se superposent des signaux à bande étroite variables dans le temps.

Les circuits d'allumage des véhicules ainsi que d'autres équipements à moteur (ventilateurs, essuie-glaces, chaudières, etc.) aussi sont des sources de bruit radioélectrique. Le plus souvent, ce bruit décroît à mesure que la fréquence augmente, de sorte que les bandes les plus touchées sont celles situées en dessous de 1 GHz environ. A noter que de nombreux véhicules sont équipés de systèmes de gestion du moteur par ordinateur, qui constituent des sources potentielles supplémentaires de brouillages.

Les lignes électriques aussi peuvent être à l'origine de brouillages radioélectriques, soit lors de la formation d'étincelles, soit, dans le cas des tensions supérieures ou égales à 70 kV environ, par effet corona. Plus récemment, on s'est penché sur l'utilisation des systèmes de distribution d'énergie utilisés comme supports d'acheminement des services de télécommunication.

Les systèmes CPL (courants porteurs en ligne) fonctionnent par transmission de signaux radiofréquences de fréquences inférieures à 200 MHz sur des lignes de distribution du réseau électrique. Les signaux CPL acheminés sur ces lignes sont susceptibles de brouiller les services de radiocommunication, y compris le service de radioastronomie. Les modems CPL peuvent causer des brouillages préjudiciables aux observatoires de radioastronomie, même à grande distance, en raison des effets de l'ionosphère sur la propagation des ondes décimétriques et de l'accumulation des rayonnements CPL.

Les dispositifs ISM (industriel, scientifique et médical) désignent les appareils qui utilisent l'énergie radioélectrique à d'autres fins que la communication. Citons notamment les fours à micro-ondes, les appareils de diathermie médicale et les machines à souder à radiofréquences. Dans le contexte des ZSR, ces appareils sont comparables aux dispositifs sous licence catégorielle et partagent souvent les mêmes bandes de fréquences.

### **9.3.3 Propagation des signaux brouilleurs**

Pour évaluer le risque de brouillage des sites de radioastronomie par les sources décrites ci-dessus, il est nécessaire de prévoir la propagation du signal de brouillage radioélectrique.

A cet égard, il est essentiel de bien faire la distinction entre la prévision de la propagation dans la cadre de la conception des systèmes radioélectriques et celle effectuée dans le cadre de l'analyse des brouillages. En effet, lors de la conception d'un système, il est nécessaire de prendre en compte l'affaiblissement maximal (ou quasi maximal) le long d'un trajet entre l'émetteur et le récepteur pour s'assurer que le niveau de puissance reçue est suffisant. En revanche, dans le cadre de l'analyse des brouillages, il faut calculer l'affaiblissement minimal (ou quasi minimal) entre l'émetteur et le récepteur brouillé afin d'évaluer le niveau de puissance maximal susceptible d'être reçu. Il faut tenir compte de cette distinction lorsqu'on se réfère aux Recommandations de la Commission d'études 3 de l'UIT-R et aux autres méthodes de prévision de la propagation.

Les principaux mécanismes de propagation qui jouent sur le niveau de brouillage causé par une source brouilleuse à un récepteur de radiotélescope sont l'affaiblissement en espace libre, la diffraction sur le relief ou sur d'autres obstacles, l'affaiblissement par les gaz de l'atmosphère et/ou par les précipitations, la propagation par conduits et la diffusion ou la réflexion par des météores et par un aéronef survolant le site.

## **9.4 Méthodes permettant de constituer une ZSR**

Pour constituer une ZSR, plusieurs méthodes sont envisageables. Il est pratique de les classer en deux catégories: méthodes côté récepteur et méthodes côté émetteur. Plusieurs de ces méthodes peuvent être utilisées en combinaison, le choix dépendant dans une large mesure de la fréquence, de l'emplacement, du type d'observation requis, de l'occupation des sols et d'autres facteurs.



### **9.4.1 Méthodes côté récepteur**

Pour que l'environnement radioélectrique dans lequel les observations de radioastronomie sont effectuées soit optimal, le choix du site de l'observatoire est dicté par des considérations géographiques et par leur incidence sur la propagation des signaux radioélectriques. Une méthode consiste à choisir judicieusement ces facteurs géographiques pour satisfaire aux exigences d'une ZSR donnée.

La propagation en radiofréquences est ainsi faite que la puissance de brouillage décroît à mesure que la distance à l'émetteur augmente. La méthode la plus élémentaire consiste donc à choisir un site géographique suffisamment éloigné des agglomérations et du trafic. Si cette solution est idéale dans le cas des nouvelles installations majeures, elle n'est pas toujours pratiquement applicable à tous les sites de radioastronomie. Les sites installés sur des sommets montagneux offrent l'avantage de leur éloignement; ils offrent aussi un trajet plus court à travers l'atmosphère, ce qui est particulièrement intéressant aux hautes fréquences.

Dans la mesure du possible, on cherchera à tirer parti de l'effet d'écran naturel autour du site. Contrairement à l'implantation des sites sur des sommets montagneux, cette approche donne la préférence aux vallées entourées de collines ou de montagnes et se prête tout particulièrement aux observations à basse fréquence.

Cela étant, comme il n'y a pas de visibilité directe entre les sources de brouillage et la ZSR, le silence absolu n'est pas garanti; en effet, les signaux parviendront au site par diffraction sur le relief ou par réflexion sur de grandes structures. Aux basses fréquences en particulier (au-dessous de 1 GHz environ), l'effet d'écran au niveau du site peut présenter un avantage limité. L'effet de la diffraction devrait être évalué pour la gamme de fréquences exploitée par le radiotélescope; pour ce faire, on s'appuiera dans la mesure du possible sur une connaissance détaillée du relief environnant.

Toutefois, même lorsque le relief est susceptible d'apporter une protection suffisante, la simple construction d'une grande structure réfléchissante au sommet d'une colline voisine (une éolienne par exemple) peut réduire à néant les effets positifs du relief.

### **9.4.2 Méthodes côté émetteur - gestion d'une ZSR**

L'essentiel de la gestion d'une ZSR consiste à limiter les sources de rayonnement susceptibles de produire des brouillages à l'intérieur de la zone, tout en garantissant la fourniture des fonctions de télécommunication et autres services aux petites poches de population qui s'y trouvent. Lors de la définition de la zone, il convient de prendre en considération les besoins liés aux instruments qui s'y trouveront dans un premier temps, mais aussi les ressources et instruments qui pourraient fort bien être ajoutés pendant la durée de vie de la zone.

Il faut aussi prévoir des procédures administratives adaptées à la gestion de la ZSR sur des échelles de temps décennales pour faire face aux demandes de développement des industries et de la collectivité et autres processus ordinaires d'aménagement du territoire. En outre, il convient de ne pas oublier, dans la définition de la zone, la possibilité d'un renouvellement complet des instruments et des moyens d'observation.

#### **9.4.2.1 Contrôle législatif et réglementaire**

La législation peut apporter un cadre réglementaire de limitation des sources de brouillage radioélectrique à l'intérieur d'une ZSR. Il s'agit notamment de réglementer les émetteurs radioélectriques assujettis ou non à licence (ou sous licence catégorielle) ainsi que d'autres activités susceptibles de causer des brouillages.

Pour de nombreuses ZSR, on définit des zones de restriction et de notifications autour du site. La zone de restriction désigne une zone où les dispositifs radioélectriques sont limités. La limitation peut porter sur la ou les bandes de fréquences des émetteurs utilisés dans la zone. La gestion de la zone de restriction peut se faire via la délivrance de licences par les régulateurs.

La zone de notification désigne une zone dans laquelle tout projet d'installation radioélectrique (dans des bandes de fréquences spécifiées) doit être notifié au régulateur ou à l'exploitant du télescope. Cette notification déclenche une phase de négociation au cours de laquelle l'exploitant du télescope évalue l'incidence de l'émetteur en projet sur les observations de radioastronomie et tente de trouver une solution acceptable par les deux parties. En règle générale, la zone de notification est beaucoup plus étendue que la zone de restriction.

Habituellement, ces règles ne peuvent s'appliquer qu'aux dispositifs radioélectriques assujettis à licence, et présentent peu d'intérêt pour la limitation des appareils sans obligation de licence ou des sources de

rayonnements non intentionnels. Cela étant, les sources de rayonnements non intentionnels ne relèvent généralement pas des dispositions nationales en matière de réglementation du spectre et peuvent être réglementées via une législation d'échelon inférieur.

Il est essentiel de noter que l'utilisation de zones de notification et de restriction nécessite une gestion permanente, collaborative et dynamique de la ZSR pendant toute la durée de vie de l'observatoire de radioastronomie. Cela suppose aussi que l'implantation d'une ZSR devrait laisser ouvertes le maximum de possibilités (en termes de bandes de fréquences par exemple) pour permettre le renforcement ultérieur des capacités du radiotélescope.

Les limitations d'ordre réglementaire peuvent aussi être étendues, dans des zones géographiques limitées, aux dispositifs radioélectriques non assujettis à licence ou aux sources de rayonnements non intentionnels. Ces types d'appareil émettant généralement à faible puissance, la limite géographique ne constitue habituellement pas une contrainte excessive. Par ailleurs, on peut envisager de limiter l'accès aux personnes à proximité immédiate du site du radiotélescope pour garantir qu'aucun dispositif émetteur ne sera apporté sur les lieux.

Le régulateur national ou tout autre organisme public compétent peut en outre édicter des règles visant à limiter certaines classes d'activité (industrie lourde ou manufacturière par exemple) à l'intérieur de la ZSR.

On trouvera dans le Tableau 1 plusieurs exemples de ZSR nationales, avec, pour chacune, les méthodes de limitation ou de régulation appliquées. Souvent, les méthodes citées dans ce Tableau s'appliquent à une gamme de fréquences limitée correspondant au fonctionnement des instruments à protéger.

TABLEAU 9.1

**Limites appliquées dans différentes ZSR nationales**

<b>ZSR/pays</b>	<b>Limites concernant les émetteurs radioélectriques assujettis à licence</b>	<b>Limites concernant les émetteurs radioélectriques exploités sous licence catégorielle</b>	<b>Limites applicables aux aéronefs</b>	<b>Limites applicables aux sources de rayonnements non intentionnels</b>
LMT/Mexique	Rayon de 20 km – interdiction de toute autre radiocommunication			
NRQZ/Etats-Unis d'Amérique	Superficie de 34 000 km <sup>2</sup> – obligation pour les émetteurs fixes de procéder à une coordination			Limitation sur les équipements électroniques dans un rayon de 10 miles (15 km)
ALMA/Chili	Aucun émetteur autorisé dans un rayon de 30 km; coordination dans un rayon de 120 km			
Arecibo/Porto Rico	Restrictions dans un rayon de 4 km; coordination pour Porto Rico et les îles environnantes	Restrictions dans un rayon de 4 km	Zone d'interdiction de survol du télescope	Restrictions dans un rayon de 4 km
Divers/Australie	Zones de notification en vue d'une coordination jusqu'à 250 km		Zone d'interdiction de survol des télescopes	

ZSR/pays	Limites concernant les émetteurs radioélectriques assujettis à licence	Limites concernant les émetteurs radioélectriques exploités sous licence catégorielle	Limites applicables aux aéronefs	Limites applicables aux sources de rayonnements non intentionnels
MRO/Australie	Plan de fréquences – attribution au SRA à titre primaire dans un rayon de 70 km; zone de coordination jusqu'à 260 km	Licences catégorielles – aucun brouillage autorisé dans un rayon de 70 km	Zone d'interdiction de survol du site	Protocole applicable aux équipements électroniques utilisés par le SRA dans un rayon de 10 km
IRAM/Espagne	Restrictions applicables aux émetteurs dans un rayon de 5 km; coordination dans un rayon de 10 km			Distance minimale de 1 km entre le site et les activités industrielles, les voies ferrées et les lignes à haute tension
Itapetinga/Brésil	Aucune nouvelle activité urbaine dans un rayon de 2 km	Aucune nouvelle activité urbaine dans un rayon de 2 km		Aucune nouvelle activité urbaine dans un rayon de 2 km
AGAA/Afrique du Sud	Aucune émission sur une superficie de 140 km <sup>2</sup> ; seulement des services essentiels sur une superficie allant jusqu'à 123 408 km <sup>2</sup>		Zone centrale de 140 km <sup>2</sup> limitée jusqu'à une altitude de 18 500 m	
Pushchino/Fédération de Russie	Aucune nouvelle activité urbaine dans un rayon de 1 km	Limites dans une zone de 5 km (ville de Pushchino)		Limites du niveau des brouillages présents
Dominion RAO/Canada	Octroi de licences rigoureusement limité jusqu'à 200 km	Aucun émetteur dans la zone de visibilité directe et restrictions dans un rayon de 4 km, la valeur la plus grande étant retenue	Il a existé une zone d'interdiction de survol du site, qui n'a plus cours aujourd'hui	Nouvelles activités urbaines: aucune en ligne de visibilité ou dans un rayon de 4 km, la valeur la plus grande étant retenue
FAST/Chine	Aucun émetteur autorisé dans un rayon de 5 km; coordination dans un rayon de 75 km			

#### 9.4.2.2 Technologies de substitution et conception des réseaux

Le régulateur national ou l'exploitant du télescope peuvent décider d'offrir d'autres technologies pour remplacer celles qui causent des niveaux de brouillages préjudiciables. Par exemple, la télévision par câble sur fibre optique peut être une bonne solution de remplacement à la radiodiffusion. Un réseau de radiocommunication mobile pourrait être remplacé par un autre réseau exploitant une bande de fréquences plus adaptée.

### 9.5 Conséquence de la mise en place d'une zone de silence radioélectrique (ZSR)

#### 9.5.1 Maintenance des ZSR

Après leur mise en place, les ZSR imposent des efforts de maintenance considérables. La quasi-totalité de cette charge revient à l'exploitant de l'installation de radioastronomie.

L'une des activités indispensables concerne le suivi opérationnel de l'environnement radioélectrique, notamment de tous les équipements qui doivent être installés sur le site. Ce travail est souvent effectué à l'aide de stations de surveillance autonomes et de matériels de test qui, le plus souvent, ne font pas partie du radiotélescope.

Une autre activité consiste à analyser les données produites par le télescope pour repérer les sources de brouillage radioélectrique qui, en raison de leur trop faible intensité, pourraient ne pas être détectables par la ou les stations de surveillance. Cette analyse peut se révéler très difficile, car la largeur de bande, le suivi de l'effet Doppler, le temps d'intégration et le diagramme d'antenne du télescope peuvent ne pas convenir à la détermination précise de la fréquence, de la variabilité temporelle ou de l'emplacement de la source des brouillages. De plus, certains brouillages ne sont pas visibles immédiatement, mais longtemps après que les mesures d'observation ont été réalisées, lorsque l'ensemble complet des données peut être traité pour la première fois. Quoi qu'il en soit, une fois les brouillages radioélectriques identifiés, des mesures doivent être prises pour les réduire ou en éliminer la source.

Dans la plupart des observatoires, des zones tampons de brouillage radioélectrique ont été définies à l'intérieur du site; elles sont soumises à des restrictions de plus en plus strictes en matière de matériel potentiellement générateur de brouillages à mesure qu'on se rapproche de l'équipement de radioastronomie. Les personnes travaillant dans la zone de silence radioélectrique doivent éduquer le personnel et les visiteurs et être disposées à faire appliquer les règles de la zone. En bonne logique, les résultats des études concernant les zones de brouillage radioélectrique devraient être appliqués avant même la construction de l'observatoire.

Le personnel de la ZSR devra aussi faire face à des cas de brouillages radioélectriques provenant de sources situées à l'extérieur du site de l'observatoire. Le cas des émetteurs non autorisés qui nécessiteraient normalement une licence d'exploitation est sans doute le plus simple à gérer au titre de la réglementation nationale. Le cas le plus complexe pour l'administration de la ZSR est celui des brouillages radioélectriques causés par des dispositifs non assujettis à licence qui se trouvent à l'extérieur du domaine de l'observatoire. La prise en charge de ces situations dans les zones de silence existantes est de plus en plus problématique. Il n'existe aucune solution toute faite.

Dans les grandes ZSR, le traitement des demandes de licence en vue de l'exploitation de nouveaux émetteurs à l'intérieur de la zone peut représenter une charge de travail substantielle. Les ZSR dans lesquelles les émetteurs sont tout simplement interdits sont faciles à administrer. Dans d'autres zones, on pourra définir des seuils de brouillage préjudiciable, auquel cas les demandes de licence devront être analysées avec soin pour déterminer si le signal émis dépassera ou non les seuils en question au niveau de l'observatoire.

Enfin, les observatoires ne doivent pas sous-estimer la nécessité d'éduquer et de nouer le contact avec les populations afin d'expliquer pourquoi la zone de silence est nécessaire et de sensibiliser les utilisateurs du spectre aux obligations qui les lient à la réglementation de la zone.

### **9.5.2 Considérations à long terme**

Les ZSR ont souvent été conçues en ayant à l'esprit un télescope bien particulier. Par la suite, le télescope a évolué, la plupart du temps en vue de renforcer ses capacités dans les hautes fréquences via une mise à niveau de ses instruments. Plus récemment, on s'est orienté vers une cohabitation de plusieurs télescopes sur un même site permettant à chacun de remplir ses fonctions correctement tout en réalisant des économies d'échelle en ce qui concerne les infrastructures et la réglementation, mais aussi l'accès à l'électricité, aux fonctions de communication et aux infrastructures routières.

Cette tendance pourrait bien s'accompagner d'une extension de la bande de fréquences à protéger pour que les instruments sur site puissent fonctionner. Il est donc conseillé de choisir des paramètres de ZSR offrant une souplesse maximale, dans la limite de ce que les circonstances autorisent.

Une fois définie d'un commun accord, la ZSR devra rester en place pendant une très longue période. D'où il ressort que son impact économique et ses effets éventuels sur l'évolution de la répartition des populations et le développement futur dans la zone concernée doivent être pris en compte avec le plus grand soin lors de sa conception.

Enfin, les technologies se développent à un rythme tel dans la société qu'il faut s'attendre à des innovations techniques dont l'adoption entraînera des modifications de l'environnement CEM autour des ZSR. Cette évolution, bien qu'impossible à prévoir, montre, une fois encore, la nécessité de concevoir des ZSR aussi étendues et robustes que possible.

## CHAPITRE 10

### **Recherche d'une intelligence extraterrestre (SETI) au moyen d'observations radiofréquences**

#### **10.1 Introduction**

La vie intelligente n'existe-t-elle que sur la planète Terre? La réponse à cette question est fondamentale pour la perception de notre place dans l'Univers. Si seule la Terre abrite une vie intelligente, deux possibilités: il s'agit soit d'un événement extraordinaire, soit d'une conséquence exceptionnelle de l'évolution du cosmos. Mais si elle n'est qu'un des éléments d'une multitude de groupes intelligents qui peuplent notre Galaxie, alors la vie sur Terre pourrait bien être une composante d'un ensemble marqué par une très grande diversité d'évolution, et ne serait sans doute unique ni dans son développement ni dans sa civilisation. Le problème qui se pose est donc de déterminer si la vie n'existe que sur Terre.

Certains scientifiques pensent que la vie est un phénomène courant dans notre Galaxie, et qu'elle peut s'être développée en des formes évoluées disposant de capacités de télécommunication semblables ou supérieures aux nôtres. Il va de soi que les caractéristiques des stations émettrices – fréquences, modulations, polarisations et emplacements – utilisées par les civilisations extraterrestres, à supposer qu'elles existent, nous sont totalement inconnues. Pour trouver les signaux émis par ces stations, l'Univers doit être sondé au moyen d'équipements de réception parmi les plus sensibles, en passant au crible le spectre radioélectrique avec le plus grand soin, à la recherche d'indices de signaux produits par d'autres civilisations.

Le premier projet de diffusion de signaux radioélectriques vers l'espace remonte à 1899, avec les travaux de Tesla. En 1939, des signaux d'émissions de télévision américaines ont été envoyés dans l'espace; ils ont aujourd'hui atteint un milliard d'étoiles au minimum. C'est en 1974 qu'a été mis en oeuvre le projet le plus ambitieux d'envoi d'informations sur la vie sur Terre vers d'autres civilisations éventuelles, avec l'émission depuis le radiotélescope d'Arecibo (Porto Rico) (305 m de diamètre) d'informations décrivant notre système solaire, la structure de l'ADN et notre espèce.

Morrison et Cocconi [1959] ont été les premiers à signaler la possibilité de recevoir des signaux radioélectriques provenant de civilisations extraterrestres. Drake [1961] a effectué la première campagne de recherches dans les hyperfréquences (Projet Ozma), au moyen d'un radiotélescope de 25 m, pour observer deux étoiles situées à environ douze années-lumière de la Terre. Depuis, les scientifiques de plusieurs pays ont mené plus de 99 campagnes de ce type ayant fait l'objet d'une publication [Tarter, 2001]. La première décennie a été dominée par les scientifiques russes. Le premier ouvrage russe contenant une analyse des problèmes que pose la recherche SETI a été rédigé par I.S. Shklovsky, en 1962; cet ouvrage, traduit dans de nombreuses langues, a eu une influence majeure sur la poursuite des travaux SETI en URSS (aujourd'hui, la Fédération de Russie). Kardashev [1963] a évoqué la possibilité de trouver des sociétés plus avancées que la nôtre maîtrisant la technique des communications radioélectriques et capables de produire une puissance en sortie supérieure à  $10^{26}$  W pour émettre des signaux à large bande, isotropes et continus. De nombreuses recherches ont été menées [Troitsky et autres, 1971], notamment grâce aux progrès réalisés dans les domaines de l'informatique et des communications, qui ont rendu possibles des recherches plus fines et plus exhaustives. Certaines ont permis de déceler des événements inexplicables, notamment plusieurs signaux intrigants enregistrés entre 1986 et 1989 au cours du programme META (Recherche extraterrestre sur mégacanal) par un radiotélescope de l'Université de Harvard aux Etats-Unis d'Amérique [Sagan et Horowitz, 1993]. Les observations ont récemment été reproduites avec une sensibilité beaucoup plus grande [Lazio et autres, 2002]; leurs auteurs contestent qu'il s'agisse là d'un type de signaux émis par une technologie extraterrestre. Pour l'heure, aucune de ces campagnes n'a apporté d'éléments convaincants attestant l'existence de signaux émis par des civilisations extraterrestres. Les campagnes de recherche ont le plus souvent été effectuées avec des sensibilités insuffisantes et n'ont couvert qu'une infime partie des fréquences, des schémas de modulation et des directions possibles.

Oliver [1987], Bates [1988] et Drake et Sobel [1992] ont fourni des renseignements de base supplémentaires concernant la recherche d'une intelligence extraterrestre. Avec l'avènement de technologies informatiques et de techniques de traitement numérique du signal relativement bon marché ces vingt dernières années, des recherches plus systématiques ont été entreprises. En 1992, la NASA a lancé le programme HRMS (Recherche en hyperfréquence à haute résolution), qui utilise quelques-uns des plus grands radiotélescopes existant sur Terre ainsi qu'un nouvel équipement de réception radioélectrique très sensible. Malgré l'annulation de ce programme en 1993, la poursuite du volet «recherche ciblée» à haute sensibilité en a été assurée par l'Institut SETI américain, sous l'appellation de projet Phoenix.

L'Institut SETI et l'Université de Berkeley (Californie) ont construit le réseau de télescopes Allen (ATA, Allen Telescope Array) en vue notamment de rendre permanentes les observations SETI. L'ATA dispose d'une aire de captation équivalant à une parabole de 40 m; sa température de bruit est de 40 K et sa largeur de bande couvre la totalité de la plage 0,5-11,4 GHz. Il génère des faisceaux multiples à l'intérieur d'un champ de vision de trois degrés (à 1 GHz), ce qui lui permet d'effectuer en permanence des observations SETI et d'autres observations de radioastronomie. L'ATA peut être orienté sur 360° et ses temps d'intégration sont supérieurs à ceux des observations SETI effectuées dans le passé. Grâce aux progrès réalisés en informatique et en traitement numérique du signal, il est en outre possible d'améliorer la sensibilité intrinsèque des récepteurs SETI.

L'ATA sert par ailleurs de prototype à un télescope beaucoup plus grand, le Réseau d'un kilomètre carré ou «SKA» (Square Kilometer Array). Actuellement au stade de la conception et du prototypage, le SKA est en cours de développement par un groupement international d'universités et d'instituts de recherche. Si un financement international est trouvé, il disposera d'une aire de captation de 45 dB supérieure à celle de l'ATA et de plus de 13 dB supérieure à celle du télescope de 305 m d'Arecibo. La plupart des études en cours envisagent la possibilité de faisceaux multiples, ce qui permettra de procéder en permanence à des observations SETI. Grâce à l'utilisation de systèmes de traitement du signal plus puissants, le SKA permettra de rechercher l'équivalent d'une technologie de radiocommunication terrestre jusqu'à 1 000 années-lumière de distance.

La possibilité de détecter un signal hyperfréquences dépend fortement du silence de l'environnement radioélectrique des sites où les recherches sont menées. Ces sites doivent donc être protégés, dans toute la mesure possible, contre les brouillages radioélectriques artificiels. Bien que la technologie moderne permette de distinguer les signaux artificiels dans une certaine mesure, elle pourrait devenir insuffisante face à l'utilisation toujours croissante du spectre radioélectrique par des services et des fonctions de télécommunication aussi nombreux que variés. Avec le temps, la probabilité de détection diminuera en conséquence.

## 10.2 Déteçtabilité de signaux SETI

En supposant que des signaux émis par des civilisations extraterrestres parviennent jusqu'à la Terre, notre capacité à les détecter dépend de plusieurs facteurs:

- l'intensité des signaux qui parviennent sur la Terre;
- l'ouverture géométrique et le facteur d'illumination de l'antenne de recherche;
- la sensibilité et l'agilité de fréquence du système de réception de l'antenne;
- la possibilité de pointer l'antenne dans la direction des signaux;
- la capacité à distinguer le signal reçu du bruit dû aux constituants du système de réception, aux phénomènes naturels de la Galaxie et aux brouillages artificiels.

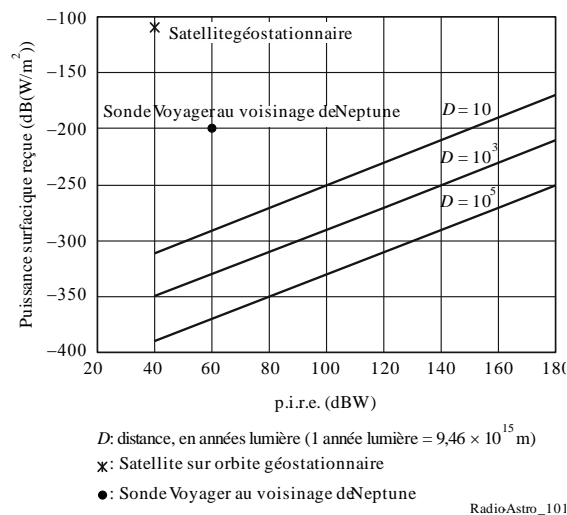
Les stratégies de pointage de l'antenne, le choix du temps d'intégration de recherche et d'autres paramètres du système sont des éléments de conception importants de la recherche SETI. Tout est mis en oeuvre pour mettre sur pied des systèmes sensibles, couvrant une large gamme de fréquences et capables de viser plusieurs étoiles simultanément, d'observer le ciel (en particulier le plan galactique) et de fournir en une passe une image couvrant  $2\pi$  stéradians. La qualité de fonctionnement ultime de ces nouveaux systèmes sera déterminée dans une large mesure par les conditions de brouillage environnantes.

### 10.3 Intensité du signal

L'intensité d'un signal d'origine extraterrestre à la surface de la Terre dépend de la puissance d'émission et des caractéristiques du trajet de propagation. Si la puissance surfacique du signal à détecter est inconnue, on peut néanmoins affirmer que la distance qu'il aura eu à parcourir sera sans doute très grande et qu'il est probable que son intensité à l'arrivée sur Terre sera très faible. La détection serait donc limitée par la sensibilité globale du système d'observation. La Figure 10.1 représente la puissance surfacique des signaux reçus sur Terre en fonction de la puissance émise, pour plusieurs distances de l'émetteur.

FIGURE 10.1

Puissance surfacique en fonction de la p.i.r.e.



Dans le cas d'un système d'observation situé à la surface de la Terre, l'atmosphère perturbe les signaux radioélectriques à certaines fréquences. La sensibilité sera par exemple réduite par la pluie au-dessus de 10 GHz, même si les observations n'en sont pas pour autant affectées sur la durée, et il est toujours possible en cas de mauvais temps d'utiliser des fréquences moins élevées. En dessous de 30 MHz environ, la réception est limitée par l'ionosphère; au-delà de 20 GHz environ, les signaux arrivant sur Terre sont affaiblis par les molécules atmosphériques (voir le Chapitre 3). L'influence sur les signaux dépend de l'emplacement de l'observatoire. Si l'observatoire est situé en dehors de la Terre, sur la Lune par exemple, les effets atmosphériques ne perturbent pas les signaux, et le spectre radioélectrique est accessible dans sa totalité (voir Chapitre 7).

### 10.4 Sensibilité du système de réception

Les problèmes de sensibilité des systèmes de réception en recherche SETI sont semblables à ceux qui ont été soulevés dans les chapitres précédents à propos des observations radioastronomiques. Pour un gain d'antenne donné, cette sensibilité dépend de la température de bruit du système, de la largeur de bande instantanée choisie et du temps d'intégration utilisé pour chacune des mesures.

La température de bruit du système est déterminée par les caractéristiques de l'équipement et par le bruit capté par l'antenne. Ce bruit comporte des contributions du cosmos, de l'atmosphère terrestre et du rayonnement de la Terre elle-même capté par les lobes latéraux de l'antenne. La première contribution est le résultat des émissions de bruit radioélectrique de notre Galaxie, des sources extragalactiques (autres galaxies, objets quasi stellaires) et du fond diffus cosmologique micro-onde (2,7 K). Cette contribution est élevée aux basses fréquences, mais diminue quand la fréquence augmente. En revanche, le bruit d'origine atmosphérique augmente sensiblement aux fréquences supérieures à 20 GHz environ, essentiellement en raison des molécules H<sub>2</sub>O et O<sub>2</sub>.

Pour un signal continu, le rapport signal/bruit augmente comme la racine carrée du temps d'intégration. Le temps effectif d'intégration est limité par la durée et la stabilité en fréquence du signal et par le temps d'observation disponible.

La fréquence du signal à l'arrivée est le résultat d'un déplacement Doppler qui dépend de la vitesse relative de l'émetteur (au moment de l'émission) et du système de réception terrestre. Ce déplacement varie en fonction du temps, ne serait-ce qu'en raison de la variation diurne due à la rotation de la Terre autour de son axe, ou de la variation annuelle due à la révolution de la Terre autour du Soleil. Ces rotations se traduisent par un déplacement de fréquence qui varie selon la direction d'arrivée du signal. Mais les variations de vitesse de l'émetteur, qui peuvent notamment se produire si ce dernier est situé sur une planète qui tourne sur elle-même et gravite autour d'une étoile, sont difficiles à établir avant la détection du signal. Il en découle que l'amélioration du rapport signal/bruit par l'augmentation du temps d'intégration dépend de la possibilité de suivre le signal déplacé par effet Doppler. Si la poursuite est imparfaite du fait que le signal sort de la voie fréquentielle analysée par le système de détection, l'avantage que procure l'allongement de la période d'intégration s'en trouve réduit.

Le temps total nécessaire pour une campagne de recherche dépend du nombre de directions à pointer, du nombre de fréquences à surveiller dans chaque direction et du temps d'intégration par observation. Pour un programme établi de directions et de fréquences, le temps total disponible limite le temps d'intégration par observation et donc aussi la sensibilité de la détection. Grâce au développement de réseaux à faisceaux multiples (tels que les réseaux ATA et SKA), dont un ou plusieurs faisceaux sont utilisés pour les observations SETI, on dispose de temps d'intégration plus longs et d'une sensibilité accrue.

#### 10.4.1 Puissance minimale détectable du signal

Selon le document [NASA, 1973], pour un signal restant dans le même canal fréquentiel du système de détection pendant toute la durée d'intégration et dans l'hypothèse d'un rapport  $S/N$  de 1, la puissance minimale détectable,  $P_{min}$ , du signal par le récepteur est la suivante:

$$P_{min} = 10 \log \left[ \frac{k T}{t} \left( 1 + (1 + Bt)^{0,5} \right) \right] \quad \text{dBW} \quad (10.1)$$

où:

$k$ : constante de Boltzman

$T$ : température de bruit du système (K)

$B$ : largeur de bande de fréquences du canal (Hz)

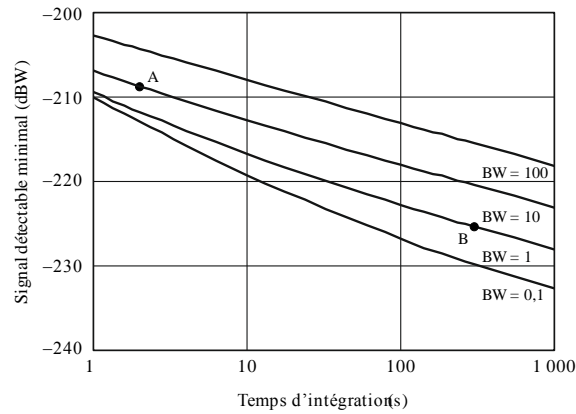
$t$ : temps d'intégration (s).

La Figure 10.2 représente la puissance minimale détectable,  $P_{min}$ , du signal en fonction du temps d'intégration pour différentes largeurs de bande. Les points A et B représentent deux récepteurs de recherche possibles dont les caractéristiques sont indiquées en légende.



FIGURE 10.2

**Puissance minimale détectable du signal pour des exemples de système**



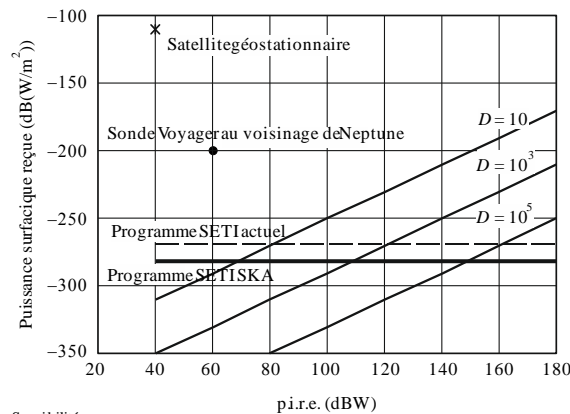
Température de bruit du système 30 K  
BW: largeur de bande (Hz)  
Exemple A, observation du ciel BW = 10 Hz, temps d'intégration = 2 s  
Exemple B, recherche ciblée BW = 1 Hz, temps d'intégration = 1 000 s

Radio-Astro\_10:

La Figure 10.3 illustre la relation entre les différentes puissances surfaciques reçues dans les conditions choisies à la Figure 10.1 pour un programme SETI actuel (ligne horizontale «fine») et pour un futur programme SETI sur le SKA (ligne horizontale «épaisse»). Le programme SETI actuel (projet Phoenix) fait intervenir les paramètres suivants: une antenne de 300 m caractérisée par une efficacité de 70% se rapportant à une ouverture équivalente d'illumination de 225 m, une température de bruit du système de 40 K, une largeur de bande de canal de 1 Hz et un temps d'intégration de 300 s. Le futur programme SETI sur le SKA fait appel aux mêmes paramètres d'observation, l'aire de captation étant toutefois augmentée de 13 dB. Cette estimation de la sensibilité repose sur des hypothèses prudentes puisque les temps d'intégration pourront vraisemblablement être supérieurs ou égaux à 1 000 s. Les combinaisons p.i.r.e.-distance qui donnent des puissances surfaciques détectables correspondent aux demi-plans situés au-dessus des lignes horizontales de chaque exemple de système.

FIGURE 10.3

Capacité de détection des signaux en fonction de la p.i.r.e. de l'émetteur



Sensibilité:  
 Programme SETI actuel (programme Phœnix : antenne de 300 m, largeur de bande de 1 Hz, temps d'intégration de 300 s)  
 Programme SETI avec le SKA : antenne de 1 000 m, largeur de bande de 1 Hz, temps d'intégration de 300 s

D: distance, en années lumière (1 année lumière =  $9,46 \times 10^{15}$  m)

x: Satellite sur orbite géostationnaire

●: Sonde Voyager au voisinage de Neptune

Radio-Astro 10:

Lorsque la largeur de bande du canal fréquentiel n'est pas affectée par la dérive de fréquence du signal, on améliore la sensibilité en adoptant une largeur de bande correspondant à la largeur spectrale du signal reçu. Or, cette largeur n'est pas connue *a priori*. Si le récepteur ne possède qu'un seul canal fréquentiel, la réduction de la largeur de bande du canal pose le problème de l'augmentation du temps d'exploration pour un intervalle fréquentiel donné. Par exemple, il faudrait 317 ans pour explorer les fréquences entre 1 et 2 GHz avec un récepteur à un seul canal de 1 Hz de largeur et un temps d'intégration de 10 s. C'est pour cette raison qu'on utilise aujourd'hui, pour l'exploration, des récepteurs dénommés communément spectromètres, qui captent une large bande de fréquences divisée en nombreux canaux spectraux à bande étroite. Il est aujourd'hui économiquement possible de fabriquer des spectromètres à  $10^9$  canaux.

### 10.5 Direction de pointage des antennes

Il est souhaitable d'utiliser des antennes ayant une grande surface collectrice (c'est-à-dire à gain élevé) afin d'accroître la sensibilité d'exploration et d'améliorer en conséquence la probabilité de détection. Mais avec les antennes simples, l'augmentation de la surface entraîne généralement une diminution de l'ouverture angulaire, et donc la multiplication du nombre de directions de pointage nécessaires pour explorer une zone donnée du ciel. Cela signifie que, pour un temps d'intégration donné, il faudra augmenter le temps total de recherche. Une solution pour résoudre ce problème serait d'augmenter la surface collectrice en installant des antennes supplémentaires.

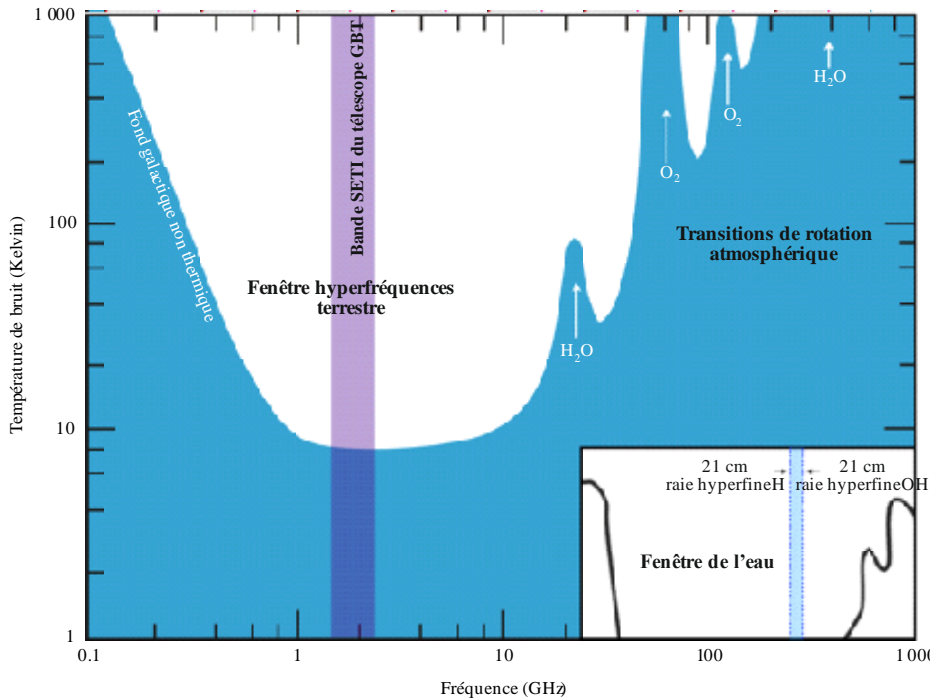
La stratégie de pointage des antennes est un élément fondamental de toute recherche SETI. Il existe deux stratégies: 1) la recherche ciblée, et 2) l'exploration globale du ciel. Dans une recherche ciblée, les antennes pointent en direction d'étoiles choisies, sachant qu'il existe près d'un milliard d'étoiles semblables au Soleil à moins de 100 années-lumière de la Terre. La surveillance des signaux en temps réel permet de confirmer un phénomène détecté en procédant à une vérification avec l'antenne de recherche ou avec un autre instrument du système d'appui. Un signal provenant d'un dispositif technique extraterrestre gravitant autour d'une étoile cible devrait disparaître lorsque l'antenne est dépointée de sa cible, et réapparaître après repointage. Comme chaque cible peut être pointée pendant une longue période de temps, il est possible d'analyser les signaux de sortie dans le domaine fréquence-temps du spectromètre pour y rechercher à la fois des signaux à onde entretenue et des signaux pulsés. La recherche peut même être élargie à des signaux déplacés en fréquence.

Les études des planètes extrasolaires offrent aux recherches SETI de nouveaux objectifs [Siemion, 2013]. Par ailleurs, les techniques de traitement numérique du signal s'améliorent constamment et permettent d'effectuer

des recherches dans des largeurs de bande beaucoup plus grandes et avec une meilleure résolution en fréquence. La plage de fréquences d'une recherche de signaux à bande étroite ( $< 5$  Hz) en direction de planètes connues est présentée à la Figure 10.4.

FIGURE 10.4

Courbe de l'intensité du fond radioélectrique en fonction de la fréquence



Cette courbe montre les facteurs externes qui contribuent à la température du système de réception ainsi que les plages de recherche SETI. La gamme de fréquences 1-10 GHz présente un rayonnement galactique faible et des contributions de l'atmosphère terrestre à la température du système. La plage de recherche des planètes Kepler par le télescope de Green Bank sur une largeur de bande de 0,8 GHz est indiquée. Figure tirée de [Siemion, 2013].

Radio-Astro 104

Les explorations globales du ciel sur de grands volumes d'espace nécessitent beaucoup plus de temps, et le temps passé à analyser chaque direction est plus limité. On peut imaginer des stratégies de balayage qui permettraient de distinguer les signaux associés à des objets célestes de ceux associés à des émetteurs au sol ou sur orbite.

Une solution hybride associant ces deux concepts consiste à utiliser un système équidirectif dont l'aire de captation est composée de plusieurs petits éléments et qui combine les sorties de ces éléments pour disposer simultanément du pointage de tous les faisceaux possibles vers le ciel visible. Ce réseau radioélectrique présente une sensibilité limitée, sauf s'il comprend un très grand nombre d'éléments, auquel cas le traitement informatique serait excessivement lourd et ne pourrait être mené à bien sur la base des techniques actuellement disponibles.

## 10.6 Identification des signaux et élimination des brouillages

La plupart des chercheurs supposent que les signaux provenant d'une civilisation extraterrestre seront à bande étroite (1 Hz par exemple) et varieront éventuellement en intensité en fonction du temps. La reconnaissance de tels signaux pose un problème fondamental: pouvoir déterminer si le signal détecté n'est pas le résultat d'un bruit naturel ou d'une activité humaine.

Dans le cas des bruits naturels aléatoires, les relations de probabilité liées à l'amplitude sont bien connues. La probabilité qu'une crête de bruit dépasse un seuil de détection choisi peut très bien être non nulle, cette crête sera pourtant enregistrée comme un possible signal extraterrestre. Le taux de ces fausses détections dépend du

seuil adopté et peut être calculé dans le cas d'un bruit (blanc) gaussien. Si on élève le seuil pour réduire le taux de fausses alertes, on réduit la sensibilité du récepteur. L'utilisation coordonnée de plusieurs antennes permet de réduire le taux de fausses détections. Lorsque ces antennes sont très éloignées les unes des autres, les brouillages de Terre sont décorrélés et fortement réduits.

Les signaux résultant de l'activité humaine occupent une grande partie du spectre radioélectrique, en particulier aux basses fréquences. Les stratégies de recherche doivent donc prévoir la possibilité de reconnaître ces signaux et de les éliminer de la liste des signaux extraterrestres possibles. Cette élimination peut reposer sur une connaissance *a priori* des signaux susceptibles de perturber les observations ou sur des mesures réalisées sur le site de l'observatoire. L'exclusion de ces signaux brouilleurs de la base de données qui servira à l'analyse détaillée joue un rôle essentiel dans la faisabilité d'une recherche concluante.

Compte tenu de l'exploitation accrue du spectre radioélectrique par les radiocommunications et les autres services, les recherches SETI seront à l'avenir encore plus difficiles à mener. En particulier, la multiplication rapide des satellites en orbite géostationnaire entravera de plus en plus l'exploration des zones du ciel situées à proximité de cette orbite à de nombreuses fréquences. Il est à noter que, du point de vue de la recherche SETI, toute émission radioélectrique d'origine humaine, qu'elle soit autorisée ou non, représente un brouillage radioélectrique potentiel. Étant donné l'exploitation croissante du spectre, il ne fait aucun doute que les recherches d'intelligences extraterrestres doivent être menées le plus tôt possible pour réduire au minimum les problèmes de brouillages radioélectriques.

## 10.7 Bandes de fréquences envisageables pour les recherches

Les fréquences et les autres caractéristiques des signaux détectables provenant de civilisations extraterrestres ne peuvent être connues *a priori*, et il n'est pas réaliste de vouloir couvrir le spectre radioélectrique dans sa totalité, ni même d'en explorer la partie accessible aux observatoires de Terre. On doit donc choisir d'explorer des bandes de fréquences restreintes sur la base d'hypothèses résultant de calculs.

Le Rapport 700-1 de l'ex-CCIR (Düsseldorf, 1990) analyse la pertinence du choix de certaines bandes de fréquences pour les recherches. Beaucoup de bandes proposées ont pour caractéristique commune d'être associées aux fréquences de certains phénomènes naturels. L'hypothèse sous-jacente est qu'une civilisation extraterrestre pensera sans doute à émettre à des fréquences courantes dans notre Galaxie ou à des multiples de ces fréquences; cette hypothèse part du principe que les autres civilisations s'intéresseront également à ces fréquences et concevront leurs propres systèmes de réception en conséquence. Ainsi les bandes qu'il est proposé d'explorer correspondent aux raies spectrales connues associées aux atomes et molécules interstellaires les plus abondants: hydrogène atomique (HI) à 1 420 MHz, radical hydroxyle (OH) à 1 612, 1 665, 1 667 et 1 720 MHz, et formaldéhyde (H<sub>2</sub>CO) à 4 830 MHz. La région spectrale située entre les raies de l'hydrogène et du radical hydroxyle, appelée «fenêtre de l'eau», a été privilégiée, car on pense que les formes de vie basées sur la chimie de l'eau pourraient accorder la même importance à cette région spectrale. Il a même été proposé d'explorer une bande contenant la raie spectrale à 203 GHz de l'atome artificiel le plus léger, le positronium.

Plusieurs bandes attribuées au SRA sont protégées contre les émissions radioélectriques humaines, de même que plusieurs bandes attribuées à la détection passive. Comme elles sont protégées contre les brouillages et qu'elles contiennent des raies spectrales très fréquentes dans toute la Galaxie, ces bandes peuvent aussi être envisagées pour la recherche SETI.

Beaucoup d'idées ont été avancées quant aux choix des bandes de fréquences à explorer. Cela étant, comme nous n'avons aucune connaissance *a priori* de la nature ou même de l'existence de signaux extraterrestres, il est nécessaire d'explorer le domaine fréquentiel le plus vaste que possible.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BATES, D. [1988] Radio searches for extraterrestrial civilizations. *Quarterly J. of the Royal Astronom. Soc.*, Vol. 29, p. 307-311.
- COCCONI, G. and MORRISON, P. [1959] Searching for interstellar communications. *Nature*, 184, p. 844-846.
- DRAKE, F. D. [1961] Project Ozma. *Physics Today*, Vol. 14, p. 40-46.
- DRAKE, F. D. and SOBEL, D. [1992] *Is anyone out there?: The Scientific Search for Extraterrestrial Intelligence*. Delacorte Press, New York, United States of America.
- KARDASHEV, N. S. [1964] Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations. *Soviet Astronomy*, AJ, 8, p. 217-221.
- LAZIO, T. J. W., TARTER, J. C. and BACKUS, P. R. [July 2002] The META Candidates Were Not Transmissions From Intrinsically Steady Sources. *Astronomical J.*, Vol. 124, p. 560-564.
- NASA [July 1973] Project Cyclops. Ames Research Center, Moffett Field, California, United States of America, Report CR 114445, Revised Edition, p. 243.
- OLIVER, B. M. [1987] The windows of SETI: frequency and time in the search for extraterrestrial intelligence. *The Planetary Report*, Vol. VII, 6, p. 23-25.
- SAGAN, C. and HOROWITZ, P. [September 1993] Five Years Of Project META: An All-Sky Narrowband Radio Search For Extraterrestrial Signals. *Astrophysical J.*, Vol. 415, 218, p. 218-235.
- TARTER, J. C. [2001] The Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI). *Annual Rev. of Astronom. and Astrophys.*, Vol. 39, p. 511-548.
- TROITSKY, V. S., STARODUBTSEV, A. M., GERSHTEIN, L. L. and RAKHLIN, V. L. [1971] The experience of the search for monochromatic radio emission from stars in the vicinity of the Sun at a frequency of 927 mc/s. *Astronomicheskii Zhurnal*, Vol. 48, p. 645-647.
- SIEMION, A. P. V, DEMOREST, P., KORPELA, E. MADDALENA, R., WERTHIMER, D., COBB, J., HOWARD, A.W., LANGSTON, G., LEBOFKY, M, MARCY, G.W., TARTER, J., [A 1.1-1.9 GHz SETI Survey of the Kepler Field. I. A Search for Narrow-band Emission from Select Targets](#), *Astrophysical J.*, Vol. 767, p. 94.
- SHKLOVSKII, I. S. and SAGAN, C. [1966] *Intelligent life in the Universe*, Holden-Day, Inc.



## CHAPITRE 11

### Radioastronomie par radiodétection au sol

#### 11.1 Introduction

L'astronomie par radiodétection ou «astronomie radar» a les mêmes besoins que la radioastronomie, à savoir l'accès à des bandes du spectre radioélectrique exemptes de brouillage. Elle diffère de la radioastronomie par le fait qu'elle est un service actif, qui émet autant qu'il reçoit. Elle en diffère également par le fait qu'il n'existe actuellement que trois sites émetteurs actifs dans ce domaine (un à Porto Rico, un en Californie et un en Crimée) fonctionnant dans cinq bandes de fréquences situées entre 430 MHz et 8 GHz (voir le Tableau 11.1). Comme l'écho radar peut être reçu par l'antenne émettrice ou par une antenne auxiliaire, il existe près de deux fois plus de sites de réception que de sites d'émission. Toutes les antennes d'émission et de réception actuellement utilisées servent également à l'observation passive en radioastronomie ou aux communications des engins spatiaux. On a récemment observé un regain d'intérêt pour les observations radar de la couronne solaire et l'on envisage d'ajouter un système d'émission au futur radiotélescope à réseau basse fréquence LOFAR (Low Frequency Array Radio Telescope). La fréquence n'a pas encore été choisie, mais elle sera vraisemblablement comprise entre 15 MHz et 50 MHz.

L'astronomie par radiodétection utilise des systèmes radar basés au sol pour:

- étudier la réflectivité aux ondes radioélectriques, la taille et les vecteurs rotation des corps solides petits et grands du système solaire;
- mesurer les déplacements Doppler et les temps de propagation et en déduire les vitesses et les distances en vue de la détermination des paramètres orbitaux, en particulier ceux des astéroïdes évoluant au voisinage de la Terre qui risquent à l'avenir de constituer une menace pour notre planète;
- étudier le milieu interplanétaire et la couronne solaire par leurs effets sur les signaux radar qui s'y propagent et par l'analyse des réflexions radar provenant de la couronne solaire.

L'étude de l'ionosphère et de l'atmosphère terrestre au moyen de radars stratosphériques et météoriques à diffusion incohérente est une discipline apparentée à l'astronomie radar, qui présente des besoins analogues.

Officiellement, les débuts de l'astronomie radar remontent à 1946 avec la détection des premiers échos réfléchis par la Lune, mais ses débuts réels comme sous-discipline de l'astronomie datent de 1961 avec la détection d'échos réfléchis de Vénus. Les autres planètes telluriques, Mercure et Mars, ont été sondées peu de temps après. Ces dernières années ont enregistré entre autres succès la détermination des périodes de rotation de Vénus et de Mercure, et une amélioration par un facteur cent de notre connaissance de l'unité astronomique. Ces années ont également connu un développement considérable des techniques d'observation et de l'instrumentation. Une description des premières observations et de la mise au point de l'instrumentation a été donnée par Evans et Hagfors [1968]. Les débuts de l'histoire de l'astronomie radar ont été décrits par Butrica [1996].

Au cours de la deuxième décennie de l'astronomie radar à partir du début des années 1970, la sensibilité des systèmes utilisés a considérablement augmenté, avec l'installation d'un radar à 2,38 GHz sur le réflecteur nouvellement resurfacé du télescope de 305 m d'Arecibo, et avec les améliorations apportées au système à 8,5 GHz sur le télescope de 64 m de Goldstone du JPL de la

NASA. Au même moment, l'exploitation des systèmes radar planétaires de Jodrell Bank (Royaume Uni) et de Haystack (Etats-Unis d'Amérique) a cessé, laissant les deux antennes des Etats-Unis d'Amérique et celle de ce qui était alors l'Union soviétique (à présent la République d'Ukraine) comme seuls sites émetteurs d'astronomie radar planétaire; cette situation prévaut encore à ce jour, comme l'indique le Tableau 11.1.

Entre 1972 et 1992, l'astronomie radar a beaucoup contribué à notre connaissance du système solaire (voir [Ostro, 2002] pour un examen de ces questions). On a ainsi constaté que les particules des anneaux de Saturne ont des dimensions de l'ordre du centimètre ou plus; on a découvert les propriétés de diffusion inhabituelles des satellites galiléens de Jupiter; on a cartographié 40% de la surface de Vénus avec une résolution de 2 km;

on a découvert des dépôts de glace sur les pôles de Mercure; on a mesuré les propriétés de réflectivité aux ondes radioélectriques de plusieurs comètes et de dizaines d'astéroïdes de la ceinture principale et d'astéroïdes proches de la Terre; et on a obtenu des images à haute résolution temps de propagation-Doppler de deux astéroïdes s'approchant de la Terre. Dans le domaine de l'instrumentation, l'interférométrie radar a été introduite pour lever l'ambiguïté nord-sud inhérente à l'imagerie temps de propagation-Doppler, on a développé des systèmes bistatiques, en particulier entre l'antenne de Goldstone (émettrice) et le réseau à très grande base du Nouveau-Mexique (récepteur), et on a utilisé des schémas de codage de longueur pseudo-infinie pour régler le problème de repliement pouvant surgir lors de la cartographie d'objets à rotation rapide.

Au milieu des années 1990, l'optique du télescope d'Arecibo a été remplacée par un système sous-réfecteur grégorien double destiné à corriger l'aberration sphérique de l'instrument. On a également installé un écran au sol de 15 m de haut autour du périmètre du réflecteur primaire de 305 m afin de protéger les récepteurs des rayonnements provenant du sol. Ces modifications se sont traduites par un accroissement significatif de la sensibilité du télescope aux fréquences supérieures à 1 GHz et par une réduction des températures du système. Associées au doublement (à 1 MW) de la puissance d'émission en bande S, ces améliorations ont permis d'accroître la sensibilité du système radar en bande S du télescope d'Arecibo d'un facteur 10 dans la direction du zénith et d'un facteur supérieur à 20 suivant l'angle maximal de 20° par rapport au zénith. A peu près à la même époque, les améliorations apportées aux klystrons ont permis d'améliorer légèrement la sensibilité du système radar en bande X du télescope de Goldstone. L'émetteur radar planétaire en bande S du télescope de Goldstone a été désactivé en 2001.

Ces dernières années, les systèmes d'Arecibo et de Goldstone modernisés ont été intensivement utilisés pour étudier les astéroïdes au voisinage de la Terre (NEA, *near earth asteroid*) et les astéroïdes de la ceinture principale, ce qui a conduit à la découverte de systèmes binaires NEA. Le télescope d'Arecibo a été utilisé pour étudier les surfaces de Titan et Iapetus, satellites de Saturne, et pour imager les anneaux de Saturne. Des images à haute résolution des couches de glace aux pôles de Mercure, des observations altimétriques des régions polaires de la Lune et l'étude des gisements superficiels à la surface de Vénus ont été réalisées grâce à l'analyse des propriétés de polarisation des échos réfléchis.



TABLEAU 11.1  
Installations d'astronomie radar

Système radar							Antenne auxiliaire de réception	
Emplacement	Latitude	Longitude E	Fréquence (GHz)	Type et puissance de l'émetteur (kW)	Gain d'antenne	Température système (K)	Emplacement	Type d'antenne
Arecibo <sup>(1)</sup> /Porto Rico	18° 21'	-66° 45'	0,430	A impulsions 150 (valeur moyenne) 2 500 (valeur de crête)	61	55		
Arecibo <sup>(1)</sup> /Porto Rico	18° 21'	-66° 45'	2,380	A ondes entretenues 1 000	73,4	26	Green Bank, Virginie occidentale, Etats-Unis d'Amérique Goldstone, Californie, Etats-Unis d'Amérique De St Croix à Hawaï, Etats-Unis d'Amérique	Parabole de 100 m Paraboles de 70 m et 34 m Réseau VLBA (10 paraboles de 25 m)
Goldstone, Californie, Etats-Unis d'Amérique	35° 23'	-116° 51'	8,560	A ondes entretenues 470	73	14	Socorro, Nouveau-Mexique, Etats-Unis d'Amérique Green Bank, Virginie occidentale <sup>(2)</sup> , Etats-Unis d'Amérique	Réseau VLA (27 paraboles de 25 m) Parabole de 100 m
Evpatoria, Crimée, Ukraine	45° 11'	33° 11'	5,01	A ondes entretenues 150	69	45	Effelsberg, Allemagne Medicina, Italie	Parabole de 100 m Parabole de 32 m

<sup>(1)</sup> Le télescope d'Arecibo peut pointer jusqu'à 20° par rapport à la verticale. Les paramètres sont ceux d'un pointage dans la direction du zénith.

<sup>(2)</sup> Une utilisation intense de cet instrument est prévue.

## 11.2 Problèmes de sensibilité

Pour atteindre ses objectifs d'étude des petits et grands corps de notre système solaire, l'astronomie radar a besoin de grandes antennes, d'émetteurs très puissants et d'amplificateurs d'entrée à très faible bruit. Ce besoin est dicté par le fait que l'intensité du signal reçu varie comme l'inverse de la distance à la puissance quatre. Pour une antenne de gain,  $G$ , équipée d'un émetteur à onde entretenue de puissance,  $P_T$  (comme la sensibilité totale dépend de la puissance moyenne transmise pour pratiquement tous les objets étudiés, tous les émetteurs radar planétaires sont à onde entretenue, à l'exception du système d'Arecibo à 430 MHz), la puissance,  $P$ , reçue par une antenne d'aire de captation effective égale à  $A$  après réflexion sur une cible de section transversale  $\sigma$  située à une distance  $R$  du radar est donnée par:

$$P = \frac{P_T G \sigma A}{(4 \pi R^2)^2} \quad (11.1)$$

Si, comme c'est normalement le cas, la même antenne est utilisée pour l'émission et la réception à la longueur d'onde  $\lambda$ , alors:

$$P = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (11.2)$$

La sensibilité totale du radar dépend du rapport entre la puissance du signal reçu et les fluctuations de la puissance de bruit (valeur quadratique moyenne) résultant de la somme des contributions de bruit provenant du ciel (le fond diffus cosmologique micro-onde ainsi que le rayonnement basse fréquence non thermique de notre Galaxie), de l'atmosphère, des rayonnements réfléchis par le sol, des amplificateurs d'entrée et bien sûr des brouillages. La somme de ces puissances de bruit est normalement caractérisée par une température de système,  $T_s$ , qui est liée à la puissance de bruit  $P_N$ , par l'équation  $P_N = k T_s B$ , où  $k$  est la constante de Boltzman et  $B$  est la largeur de bande de fréquences appropriée, c'est-à-dire en général celle résultant de l'effet Doppler. Les fluctuations de la valeur quadratique moyenne du bruit sont données par l'expression  $P_N (\tau B)^{-1/2}$ , où  $\tau$  est le temps d'intégration.

En ne tenant pas compte des propriétés de la cible et des autres constantes:

$$\text{Sensibilité} \propto \frac{P_T G A}{T_s} (\tau/B)^{1/2} \quad (11.3)$$

ou, lorsque la même antenne est utilisée pour l'émission et la réception:

$$\text{Sensibilité} \propto \frac{P_T G^2 \lambda^2}{T_s} (\tau/B)^{1/2} \quad (11.4)$$

Les besoins de l'astronomie radar sont donc très semblables à ceux de la radioastronomie (grandes antennes, amplificateurs d'entrée à faible bruit et absence de signaux brouilleurs), et exigent de plus des émetteurs très puissants. Comme le gain,  $G$ , est inversement proportionnel à  $\lambda^2$ , les équations (11.1) et (11.2) impliquent que plus la fréquence est élevée, plus la sensibilité l'est aussi.

## 11.3 Modes d'exploitation et spécifications des largeurs de bandes

Les ondes entretenues et modulées sont toutes deux utilisées en astronomie radar, le choix dépendant de la nature de la cible et des objectifs de l'expérience. Dans les expériences à onde entretenue pour lesquelles on transmet un signal monochromatique, le signal réfléchi est élargi par effet Doppler en raison de la vitesse angulaire de rotation de la cible ( $\Omega$  (rad/s)), l'élargissement étant donné par:

$$\Delta \nu = \frac{4a\Omega v_0}{c} \sin \theta \quad (11.5)$$

où:

- $a$ : rayon de la cible
- $\nu_0$ : fréquence émise
- $c$ : vitesse de la lumière
- $\theta$ : angle entre l'axe de rotation et l'axe de visée du radar.

Normalement, une onde polarisée circulairement est émise, et l'examen des spectres du signal réfléchi dans les deux sens de polarisation circulaire renseigne sur l'albédo radar, la rugosité de la surface à l'échelle de la longueur d'onde, la période de rotation, etc. Même si la fréquence du signal émis peut être commutée toutes les quelques secondes pour améliorer la détectabilité du signal reçu, il est rare que la largeur totale des bandes utilisées pour l'émission et la réception dépasse quelques dizaines de kilohertz pour la radioastronomie radar à onde entretenue.

L'imagerie bidimensionnelle (temps de propagation-effet Doppler) sert à cartographier les propriétés de réflectivité aux ondes radioélectriques de la surface des planètes telluriques, des astéroïdes et, on l'espère pour le futur, des comètes. La nécessaire modulation du signal émis peut être réalisée par modulation des impulsions. Si certains des premiers systèmes étaient à impulsions, tous les systèmes les plus récents sont à ondes entretenues, car la sensibilité dépend en principe de la puissance moyenne transmise et parce qu'il est plus facile et moins coûteux d'obtenir des puissances moyennes élevées avec des émetteurs à onde entretenue. C'est pourquoi les systèmes modernes modulent la phase d'un signal à onde entretenue en utilisant une modulation biphase basée sur un code répétitif à décalage de registre de longueur maximale. Les propriétés des fonctions d'autocorrélation de ces codes les rendent idéaux pour les applications planétaires de type radar. Actuellement, l'intervalle de commutation de phase le plus court entre deux états séparés de  $180^\circ$  est de  $0,1 \mu\text{s}$  en utilisation courante, ce qui correspond à une résolution de 15 m en distance. Avec un tel intervalle de commutation, la largeur de bande nécessaire du récepteur est de 20 MHz environ, et cette largeur de bande détermine les besoins courants de l'astronomie radar. Le déplacement Doppler dû à la vitesse relative de la cible par rapport à la Terre peut décaler la bande de réception jusqu'à plusieurs MHz par rapport à la fréquence de l'émetteur. Bien sûr, un fort brouillage intervenant juste en dehors des limites de la bande pourrait causer une dégradation importante de la qualité de fonctionnement du récepteur.

#### 11.4 Installations d'astronomie radar

En tant que service actif ayant des spécifications rigoureuses en matière de bandes spectrales exemptes de brouillage, l'astronomie radar a les mêmes besoins que la radioastronomie, mais sans pouvoir accéder à des bandes protégées. Jusqu'ici, le choix des fréquences a été dicté par des considérations telles que la disponibilité de klystrons à grande puissance ou, comme c'est le cas pour le système à 8,5 GHz de Goldstone, le besoin d'émetteurs très puissants à d'autres fins comme les communications avec les engins spatiaux.

Le Tableau 11.1 recense les systèmes couramment utilisés en astronomie radar planétaire. Les deux dispositifs les plus sensibles sont le système à 8,5 GHz sur l'antenne de 70 m du réseau de communications avec l'espace lointain de la NASA situé à Goldstone (Californie), et le système à 2,4 GHz sur le radiotélescope/télescope radar de 305 m d'Arecibo à Porto Rico, exploité par SRI International, USRA et UMET, dans le cadre d'un accord de coopération avec la Fondation scientifique nationale des Etats-Unis (NSF), et avec le soutien de la NASA pour le programme planétaire.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BUTRICA, A. J. [1996] *To See the Unseen: A History of Planetary Radar Astronomy*. NASA SP-4218, NASA History Office.

EVANS, J. V. and HAGFORS, T., Ed. [1968] *Radar Astronomy*, McGraw-Hill.

OSTRO S. J. [2002] *Planetary radar astronomy*. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Third Edition, Vol. 12, p. 295-327, Academic Press.

## APPENDICE 1

### Tableau des bandes de fréquences attribuées à la radioastronomie

Colonne 1: limites des bandes de fréquences.

Colonne 2: indique si l'attribution est à titre primaire (P) ou secondaire (s). Les bandes réservées aux services passifs sont indiquées par (Pas); dans ces bandes, toute émission est interdite, sauf quelques dérogations nationales. Les autres attributions sont partagées avec des services actifs (émetteurs).

Colonne 3: indique les cas où l'attribution est limitée à certaines Régions, mais ne donne pas tous les détails des dérogations nationales, etc. Pour plus de détails, se reporter à la dernière édition du Règlement des radiocommunications. Quelques raies spectrales, parmi les plus importantes, sont également indiquées.

Il convient de noter toutefois que l'on connaît plus de 10 000 raies (voir le § 2.4.1) et qu'il existe au-dessus de 40 GHz de nombreuses raies dans toutes les bandes.

Gamme de fréquences (MHz) (1)	Statut (2)	Remarques (3)
13,36-13,41	P	
25,55-25,67	P (Pas)	
37,50-38,25	s	
73,00-74,60	P	Région 2
150,05-153,00	P	Région 1, Australie, Inde
225,00-235,00	s	Chine (numéro <b>5.250</b> du RR)
322,00-328,60	P	Raie du deutérium
406,10-410,00	P	
606,00-608,00	P	Chine et Zone africaine de radiodiffusion
608,00-614,00	P s	Région 2, Chine, Inde et Zone africaine de radiodiffusion Régions 1 (sauf Zone africaine de radiodiffusion) et 3
1 400,00-1 427,00	P (Pas)	Raie de l'hydrogène
1 610,60-1 613,80	P	Raie du radical OH
1 660,00-1 670,00	P	Raies du radical OH
1 718,80-1 722,20	s	Raie du radical OH
2 655,00-2 690,00	s	
2 690,00-2 700,00	P (Pas)	
4 800,00-4 990,00	s	Raie H <sub>2</sub> CO; les bandes 4 825-4 835 MHz et 4 950-4 990 MHz sont attribuées à titre primaire en Argentine, en Australie et au Canada (numéro <b>5.443</b> du RR)
4 990,00-5 000,00	P	

Gamme de fréquences (GHz) (1)	Statut (2)	Remarques (3)
10,60-10,68	P	
10,68-10,70	P (Pas)	
14,47-14,50	s	Raies H <sub>2</sub> CO
15,35-15,40	P (Pas)	
22,21-22,50	P	Raies H <sub>2</sub> O
23,60-24,00	P (Pas)	Raies NH <sub>3</sub>
31,30-31,50	P (Pas)	
31,50-31,80	P	Passif (Pas) en Région 2
42,50-43,50	P	Raies SiO
48,94-49,04	P	Raie CS
76,00-77,50	P	
77,50-79,00	s	
79,00-86,00	P	
86,00-92,00	P (Pas)	Raies SiO
92,00-94,00	P	raie N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>
94,00-94,10	s	
94,10-100,00	P	Raie CS
100,00-102,00	P (Pas)	
102,00-109,50	P	
109,50-111,80	P (Pas)	Raies CO
111,80-114,25	P	Raie CO
114,25-116,00	P (Pas)	Raie CO
123,00-130,00	s P	Corée (128-130 GHz, raies SiO) numéro <b>5.562D</b> du RR
130,00-134,00	P	
134,00-136,00		
136,00-148,50	P	Raie CS
148,50-151,50	P (Pas)	
151,50-158,50	P	
164,00-167,00	P (Pas)	
171,00-171,60, 172,20-172,80 173,30-174,00	P	Corée numéro <b>5.562D</b> du RR
182,00-185,00	P (Pas)	Raie H <sub>2</sub> O
200,00-209,00	P (Pas)	
209,00-226,00	P	Raies CO
226,00-231,50	P (Pas)	Raie CO
241,00-248,00	P	Raies CS
248,00-250,00	s	
250,00-252,00	P (Pas)	
252,00-275,00	P	Raies HCN, HCO <sup>+</sup>

Outre la mention de ces attributions, le numéro **5.149** du RR prie instamment les administrations de prendre toutes les mesures pratiquement réalisables pour protéger le SRA contre les brouillages préjudiciables dans les bandes suivantes:

13 360-13 410 kHz,	4 950-4 990 MHz,	102-109,5 GHz,
25 550-25 670 kHz,	4 990-5 000 MHz,	111,8-114,25 GHz,
37,5-38,25 MHz,	6 650-6 675,2 MHz,	128,33-128,59 GHz,
73-74,6 MHz dans les Régions 1 et 3,	10,6-10,68 GHz,	129,23-129,49 GHz,
150,05-153 MHz dans la Région 1,	14,47-14,5 GHz,	130-134 GHz,
322-328,6 MHz,	22,01-22,21 GHz,	136-148,5 GHz,
406,1-410 MHz,	22,21-22,5 GHz,	151,5-158,5 GHz,
608-614 MHz dans les Régions 1 et 3,	22,81-22,86 GHz,	168,59-168,93 GHz,
1 330-1 400 MHz,	23,07-23,12 GHz,	171,11-171,45 GHz,
1 610,6-1 613,8 MHz,	31,2-31,3 GHz,	172,31-172,65 GHz,
1 660-1 670 MHz,	31,5-31,8 GHz dans les Régions 1 et 3,	173,52-173,85 GHz,
1 718,8-1 722,2 MHz,	36,43-36,5 GHz,	195,75-196,15 GHz,
2 655-2 690 MHz,	42,5-43,5 GHz,	209-226 GHz,
3 260-3 267 MHz,	48,94-49,04 GHz,	241-250 GHz,
3 332-3 339 MHz,	76-86 GHz,	252-275 GHz.
3 345,8-3 352,5 MHz,	92-94 GHz,	
4 825-4 835 MHz,	94,1-100 GHz,	

**Aux fréquences supérieures à 275 GHz, l'UIT-R n'a pas fait d'attributions de bandes. Cela étant, la CMR-2012 a adopté la disposition suivante via le numéro 5.565 du RR:**

**5.565** *Les bandes de fréquences suivantes dans la gamme 275-1 000 GHz sont identifiées pour être utilisées par les administrations pour les applications des services passifs:*

- *service de radioastronomie: 275-323 GHz, 327-371 GHz, 388-424 GHz, 426-442 GHz, 453-510 GHz, 623-711 GHz, 795-909 GHz et 926-945 GHz;*
- *service d'exploration de la Terre par satellite (passive) et service de recherche spatiale (passive):  
275-286 GHz, 296-306 GHz, 313-356 GHz, 361-365 GHz, 369-392 GHz, 397-399 GHz, 409-411 GHz, 416-434 GHz, 439-467 GHz, 477-502 GHz, 523-527 GHz, 538-581 GHz, 611-630 GHz, 634-654 GHz, 657-692 GHz, 713-718 GHz, 729-733 GHz, 750-754 GHz, 771-776 GHz, 823-846 GHz, 850-854 GHz, 857-862 GHz, 866-882 GHz, 905-928 GHz, 951-956 GHz, 968-973 GHz et 985-990 GHz.*

*L'utilisation de la gamme de fréquences 275-1 000 GHz par les services passifs n'exclut pas l'utilisation de cette gamme de fréquences par les services actifs. Les administrations souhaitant mettre des fréquences de la gamme 275-1 000 GHz à la disposition des applications des services actifs sont instamment priées de prendre toutes les mesures pratiquement réalisables pour protéger ces services passifs contre les brouillages préjudiciables jusqu'à la date d'établissement du Tableau d'attribution des bandes de fréquences dans la gamme de fréquences 275-1 000 GHz susmentionnée.*

*Toutes les fréquences de la gamme 1 000-3 000 GHz peuvent être utilisées à la fois par les services actifs et les services passifs. (Rév.CMR-12)*

## APPENDICE 2

### Enregistrement des stations de radioastronomie

Il est important que les administrations exploitant des stations de radioastronomie les enregistrent auprès du Bureau des radiocommunications (BR) de l'Union internationale des télécommunications (UIT).

Cet enregistrement offre un certain nombre d'avantages:

- La protection contre les brouillages dans un même canal, lorsque les observations sont effectuées dans des bandes utilisées en partage avec le SRA à titre primaire, notamment lorsque la protection transfrontière est nécessaire.
- Plusieurs renvois du Règlement des radiocommunications (RR) assurent la protection des stations de radioastronomie contre les rayonnements non désirés produits par des satellites. Ainsi, le numéro **5.511A** du RR dispose que:  
«... Afin de protéger le service de radioastronomie dans la bande 15,35-15,4 GHz, la puissance surfacique cumulative rayonnée dans la bande 15,35-15,4 GHz par toutes les stations spatiales de n'importe quel système à satellites non géostationnaires de liaisons de connexion (espace vers Terre) du service mobile par satellite fonctionnant dans la bande 15,43-15,63 GHz ne doit pas dépasser  $-156$  dB(W/m<sup>2</sup>) dans une largeur de bande de 50 MHz vers n'importe quel site d'observation de radioastronomie pendant plus de 2% du temps.»

Lorsqu'il examinera la conformité d'un système à satellites aux termes de ce renvoi, le BR ne considérera que les stations de radioastronomie enregistrées: L'enregistrement:

- permet la prise en compte d'une station de radioastronomie par ceux qui prévoient de placer des émetteurs dans son voisinage. L'enregistrement international est particulièrement important lorsqu'une station est située à proximité d'une frontière et qu'une coordination bilatérale ou multilatérale peut être nécessaire ou souhaitable;
- confère une priorité d'ordre chronologique à la station enregistrée. Après avoir été enregistrées, les stations de radioastronomie qui effectuent des observations dans certaines bandes (par exemple dans la bande 15,35-15,4 GHz) peuvent faire l'objet d'une demande de protection contre les rayonnements non désirés produits par des systèmes à satellites dont l'exploitation a été notifiée dans des bandes adjacentes ou proches à une date ultérieure.

L'enregistrement d'une station de radioastronomie doit être demandé par l'autorité chargée des télécommunications de l'administration nationale concernée. Les caractéristiques de la station de radioastronomie à fournir sont décrites à l'Annexe 2, Appendice 4 du Règlement des radiocommunications.

Des parties du RR, y compris les paramètres requis pour l'enregistrement d'une station de radioastronomie, peuvent être modifiées au cours de toute CMR. Par exemple, la CMR-03 a ajouté plusieurs nouveaux paramètres à ceux requis pour enregistrer une station de radioastronomie (notamment l'angle d'élévation minimal suivant lequel un radiotélescope peut procéder à une observation, nécessaire pour calculer la puissance surfacique cumulative rayonnée par les stations spatiales d'un système à satellites non géostationnaires telle que mentionnée dans le numéro **5.511A** du RR). Avant d'enregistrer une station, il convient de se reporter à la version la plus récente du RR.

La plupart des stations de radioastronomie effectuent des observations dans des bandes plus larges que celles attribuées à la radioastronomie. Lorsqu'on procède à l'enregistrement d'un observatoire de radioastronomie, il faut veiller à découper la bande observée pour séparer les sous-bandes attribuées à la radioastronomie à titre primaire et celles qui ne le sont pas, puisque la protection d'une station n'est assurée que dans les bandes attribuées à la radioastronomie à titre primaire. Par exemple, si une station utilise un récepteur couvrant la bande 15-16 GHz, l'enregistrement devra être effectué pour les trois bandes suivantes:

- 15,00-15,35 GHz, dans laquelle ne s'applique aucune protection;



- 15,35-15,40 GHz, dans laquelle s'applique le numéro **5.511A** du RR; et
- 15,40-16,00 GHz, dans laquelle ne s'applique aucune protection.

Si la bande 15,00-16,00 GHz est enregistrée comme une entité unique, aucune sous-bande ne bénéficiera d'une protection. L'enregistrement de bandes de fréquences qui ne bénéficient pas d'une protection peut cependant être utile, aux fins de planification et de coordination.

## APPENDICE 3

### Unités en radioastronomie

Les radioastronomes utilisent un certain nombre d'unités et de spécifications qui diffèrent de celles dont on se sert dans la plupart des autres services. Cet Appendice a pour objet de mettre en correspondance le jargon utilisé en radioastronomie et celui des autres services, en particulier en ce qui concerne l'intensité des signaux et le gain d'antenne.

#### Intensité des signaux

Les radioastronomes expriment l'intensité des signaux en Janskys (abréviation Jy). Cette unité tire son nom de Karl Jansky, physicien qui a découvert les signaux radioélectriques d'origine cosmique. Le Jy est une unité de puissance par unité de surface par unité de largeur de bande (c'est-à-dire une densité spectrale de puissance surfacique):

$$1 \text{ Jy} \equiv 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ Hz})$$

Les radioastronomes expriment la puissance de signal en Jy pour plusieurs raisons:

- Les signaux de radioastronomie sont très faibles, d'où la très petite valeur du Jy.
- Les radioastronomes utilisent divers types d'antennes d'aires de captation différentes. Pour faciliter la comparaison des mesures de puissance de signal entre différentes antennes, le Jy exprime la puissance de signal par unité de surface de l'aire de captation de l'antenne. En normalisant par unité de surface et par unité de largeur de bande, le Jy permet de comparer directement des mesures de puissance de signal effectuées sur différents radiotélescopes.
- De nombreux signaux de radioastronomie sont à large bande (par exemple, le rayonnement thermique émis par un gaz chaud) et la puissance reçue dépend de la largeur de bande totale du récepteur. Le Jy tient compte de cette particularité en exprimant la puissance de signal par unité de largeur de bande.

Dans de nombreux services de radiocommunication, l'intensité du signal est uniquement exprimée en termes de puissance. Le dBm, ou nombre de décibels au-dessus de 1 mW, est une unité courante. Le dBm étant une unité logarithmique, il offre l'avantage de pouvoir exprimer les nombreux ordres de grandeur d'intensité que présentent les signaux radioélectriques de Terre, et tout particulièrement d'exprimer à la fois la puissance reçue et la puissance émise, qui peuvent couvrir un intervalle de 200 dB ou plus. En comparaison, les intensités de signal en radioastronomie ne varient pas sur des intervalles aussi grands: une source de 1 Jy est très intense, et les sensibilités types des radiotélescopes descendent jusqu'au microjansky ( $\mu\text{Jy}$ ), ou un intervalle total de 60 dB environ seulement.

Bien que le Jy (densité spectrale de puissance surfacique) et le dBm (puissance) soient deux unités différentes, elles peuvent être comparées moyennant quelques hypothèses théoriques. Une valeur exprimée en Jy est convertie en une puissance en la multipliant par la largeur de bande du récepteur et par l'aire de captation équivalente de l'antenne. Les deux unités sont comparées dans le tableau ci-dessous sur la base des hypothèses suivantes: la largeur de bande choisie correspond à des signaux de Terre courants et l'aire de captation de l'antenne est l'aire de captation isotrope,  $\lambda^2/4\pi$ :

$$\text{Puissance (en mW)} = \text{densité spectrale de puissance surfacique (en Jy)} * 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ Hz}) * 1\,000 \text{ mW/W} * \text{largeur de bande (Hz)} * [\text{longueur d'onde (m)}]^2 \div 4\pi$$

$$\text{Puissance (dBm)} = 10 * \log_{10}[\text{puissance (mW)}]$$

**Exemples de l'intensité de signal reçu en dBm correspondant à un signal de 1 Jy reçu par une antenne isotrope dans une largeur de bande spécifiée, pour un certain nombre de signaux courants**

Type de signal	Largeur de bande	Fréquence/longueur d'onde	dBm correspondant à 1 Jy
Mobile terrestre	12,5 kHz	450 MHz/0,67 m	1 Jy = -204 dBm
GSM	200 kHz	1 800 MHz/0,17 m	1 Jy = -204 dBm
DVB-T	8 MHz	500 MHz/0,6 m	1 Jy = -176 dBm
LTE	10 MHz	2 655 MHz/0,11 m	1 Jy = -190 dBm
WiFi	40 MHz	5 300 MHz/0,06 m	1 Jy = -190 dBm

Pour mettre ces chiffres en contexte, prenons l'exemple d'un terminal GSM. La sensibilité de référence du terminal est égale à -111 dBm (d'après les spécifications GSM). On voit qu'un signal de 1 Jy est inférieur de 93 dB par rapport à la limite de sensibilité du GSM, tandis qu'un signal de 1 µJy est inférieur de quelque 153 dB par rapport à cette limite. Un radiotélescope peut donc être 15 fois plus sensible qu'un récepteur GSM. Les radioastronomes sont parfois amenés à convertir en Jy l'intensité d'un signal de Terre exprimée en microvolts par mètre (µV/m) ou en son équivalent en décibels, dB(µV/m)<sup>12</sup>. Il s'agit simplement d'une mesure du champ électrique (E), et la loi d'Ohm peut être utilisée pour convertir E en une puissance équivalente:  $P(W/m^2) = E^2/Z_0$ , où  $Z_0 = 377 \Omega$  désigne l'impédance de l'espace libre. Dans les travaux CEM, on rencontre souvent des valeurs de champ électrique (et non de puissance); c'est notamment le cas dans les règles relatives aux appareils non assujettis à licence éditées par la Federal Communications Commission des Etats-Unis d'Amérique. Moyennant quelques transformations algébriques, on peut déduire les conversions suivantes:

$$P(mW) = 1,9 \times 10^{-8} * [E(\mu V/m)]^2 * [f(MHz)]^{-2}$$

$$P(dBm) = -77,2 + E[dB(\mu V/m)] - 20 * \log_{10}[f(MHz)]$$

Cette conversion figure également dans le Rapport UIT-R RA.2131, qui donne les seuils de protection applicables aux observations du SRA sous forme de leurs équivalents en champ électrique.

**Antennes**

Les radioastronomes ont l'habitude de convertir la puissance surfacique ou la densité spectrale de puissance surfacique (qui toutes deux mesurent la puissance ou la densité spectrale de puissance par unité de surface) en une puissance totale. L'aire de captation équivalente est donc une valeur plus utile que le gain pour exprimer la qualité de fonctionnement d'une antenne. L'aire de captation équivalente d'une antenne  $A_e$  est une combinaison de l'aire de captation géométrique  $A_g$  (si celle-ci est définie) et du rendement d'ouverture  $\eta_a$ :  $A_e = \eta_a A_g$ . Une façon courante d'exprimer le gain d'une antenne en radioastronomie est d'indiquer l'élévation de température du récepteur (en Kelvins) due à la captation, suivant une polarisation unique, de la puissance émise par une source de densité surfacique totale (F) de 1 Jy. On parle alors de gain d'antenne (G) en K/Jy. Pour effectuer la conversion entre  $A_e$  et G, on applique les relations suivantes:

$$\frac{1}{2} F A_e = k_B \Delta T_K$$

$$A_e (m^2) = \frac{2 k_B \Delta T_K}{10^{-26} F_{Jy}} = 2 760 G (K/Jy)$$

où  $k_B$  est la constante de Boltzmann.

En principe, les services de radiocommunication spécifient la qualité de fonctionnement de base d'une antenne au moyen d'une expression du gain d'antenne différente, à savoir: la différence (positive ou négative) entre l'intensité du signal à la sortie de l'antenne et l'intensité du signal qui serait obtenue à la sortie d'une antenne de référence standard, dans l'hypothèse où le signal se trouve dans le faisceau principal de l'antenne de

<sup>12</sup> A noter que  $dB(\mu V/m) = 20 * \log_{10}(\mu V/m)$  et non  $10 * \log_{10}(\mu V/m)$ , car il s'agit d'une valeur de champ électrique et non d'une valeur de puissance.

référence. L'antenne de référence la plus courante est l'antenne isotrope. L'aire de captation équivalente  $A_e$  d'une antenne isotrope étant égale à  $\lambda^2/4\pi = 7162/[f(\text{MHz})]^2$ , celle d'une antenne de gain linéaire  $G$  (par rapport à l'antenne isotrope) est donc  $A_e = G(\text{isotrope}) * 7162/[f(\text{MHz})]^2$ . A partir des deux équations, celle donnant l'aire équivalente en fonction de  $G$  (K/Jy) et celle donnant l'aire équivalente en fonction du gain linéaire par rapport à l'antenne isotrope, on obtient par égalité:

$$G(\text{isotrope}) \frac{7162}{f_{\text{MHz}}^2} = 2760 G(\text{K/Jy})$$

$$G(\text{isotrope}) = 0,4 f_{\text{MHz}}^2 G(\text{K/Jy})$$

Ou en unités logarithmiques:

$$G(\text{dBi}) = -4 + 20\log_{10}(f_{\text{MHz}}) + 10\log_{10}[G(\text{K/Jy})]$$

Inversement:

$$G(\text{K/Jy}) = 2,5 f_{\text{MHz}}^{-2} 10^{G(\text{dBi})/10}$$

On trouvera dans le tableau ci-dessous quelques exemples de gain d'antenne dans les deux unités:

Antenne	Fréquence (MHz)	G (K/Jy)	Gain (dBi)	$A_e$ (m <sup>2</sup> )
Station de base cellulaire	1 800	$2,5 \times 10^{-5}$	15	0,07
Observatoire de Medicina, Italie	1 400	0,12	50	331
Observatoire d'Arecibo/Porto Rico	1 400	11	69	30 360

## APPENDICE 4

### Utilisations pratiques de l'échelle des décibels (dB)

Le décibel (dB) est une unité logarithmique qui indique le rapport entre une quantité physique (le plus souvent une puissance ou une intensité) et un niveau de référence spécifié ou implicite. Le rapport exprimé en décibels est égal à 10 fois le logarithme décimal du rapport entre deux puissances (définition IEEE). Un décibel est égal à un dixième de bel, unité rarement utilisée qui tire son nom d'Alexander Graham Bell.

Le décibel est utilisé pour exprimer des mesures très variées en sciences et en ingénierie, essentiellement en acoustique, en électronique et en théorie du contrôle. En électronique, le gain des amplificateurs, l'affaiblissement des signaux et les rapports signal/bruit sont souvent exprimés dans cette unité. Le décibel présente plusieurs avantages, notamment la possibilité de représenter aisément des nombres très grands ou très petits et d'effectuer des multiplications de rapports par simple addition ou soustraction.

(Les explications qui précèdent sont tirées d'un article de Wikipédia beaucoup plus complet, que l'on pourra consulter au sujet par exemple de l'utilisation du dBm et du dBW, qui correspondent au rapport de deux grandeurs exprimées en milliwatts ou en Watts).

#### Utilisation du dB pour la précision à 1%

Nous connaissons quasiment tous l'échelle logarithmique des décibels:

Facteur	dB
1/1000	-30
1/100	-20
1/10	-10
1	0
10	10
100	20
1000	30
Etc.	

Mais nous sommes moins nombreux à savoir que 11 dB correspond à  $4\pi$  et que 14 dB est un facteur de 25, avec, dans les deux cas, une précision de 1%.

Deux coïncidences numériques, à savoir  $3 \text{ dB} \approx 2$  et  $5 \text{ dB} \approx \pi$ , permettent d'établir la table suivante, précise à 1% :

Facteur	dB	Erreur
1	0	0
1,25	1	0,7%
$\pi/2$	2	0,9%
2	3	-0,2%
2,5	4	0,5%
$\pi$	5	0,7%
4	6	-0,5%
5	7	0,2%
$2\pi$	8	0,4%
8	9	-0,7%
10	10	0
$4\pi$	11	0,2%
16	12	0,95%
20	13	-0,2%
25	14	0,5%
Etc.		

Cette table, facile à mémoriser, permet d'effectuer des calculs rapides avec une précision de 1%.

### Autres échelles logarithmiques

Le néper, autre unité logarithmique exprimant un rapport, repose sur le logarithme népérien (base e).

Les décibels et les népers ne sont pas les premières échelles logarithmiques. Ainsi, depuis des temps très reculés, les astronomes utilisent les «magnitudes» pour caractériser la plus petite différence de luminosité entre deux étoiles, facilement détectable à l'oeil. Cette unité a été définie à l'époque moderne: une différence de +5 en magnitude correspond à une diminution de la luminosité d'un facteur 100. Ainsi, une magnitude de +1 vaut exactement -4 dB.

## APPENDICE 5

### Liste des abréviations et acronymes

A/N	(Conversion) analogique-numérique
ADN	Acide désoxyribonucléique
AIPS	Système de traitement d'images astronomiques ( <i>Astronomical Image Processing System</i> )
ALMA	Grand réseau d'antennes millimétriques/submillimétriques de l'Atacama ( <i>Atacama Large Millimeter/submillimeter Array</i> )
ANC	Annulation adaptative du bruit ( <i>Adaptive Noise Cancellation</i> )
AR	Assemblée des radiocommunications
ASTRO	Télescope antarctique submillimétrique d'observation distante ( <i>Antarctic Sub-millimetre Telescope and Remote Observatory</i> )
ATA	Réseau de télescopes Allen ( <i>Allen Telescope Array</i> )
BNetzA	Bundesnetzagentur
BR	Bureau des Radiocommunications
CAMR	Conférence administrative mondiale des radiocommunications
CCIR	Comité consultatif international des radiocommunications
CCV	Comité de coordination pour le vocabulaire ( <i>Coordinating Committee for Vocabulary</i> )
CE	Commission d'études
CEM	Compatibilité électromagnétique
CISPR	Comité international spécial des perturbations radioélectriques
CIUS	Conseil international des unions scientifiques
CMB	Fond diffus cosmologique micro-onde ( <i>Cosmic Microwave Background</i> )
CME	Ejection de matière coronale ( <i>Coronal Mass Ejection</i> )
CMR	Conférence mondiale des radiocommunications
CORF	Comité américain sur les fréquences radioélectriques de l'Académie nationale des sciences ( <i>the Committee on Radio Frequencies of the National Academy of Sciences</i> )
COSPAR	Comité de la recherche spatiale ( <i>the Committee on Space Research</i> )
CPL	Courants porteurs en ligne
CRAF	Comité des fréquences radioastronomiques ( <i>the Committee on Radio Astronomy Frequencies</i> )
CRF	Référentiel céleste ( <i>the Celestial Reference Frame</i> )
CT	Tomographie par ordinateur ( <i>Computed Tomography</i> )
CW	Onde entretenue ( <i>Continuous Wave</i> )
dB	Décibel
DVB-T	Radiodiffusion vidéonumérique de Terre ( <i>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</i> )
EOP	Paramètre d'orientation de la Terre ( <i>Earth Orientation Parameter</i> )
epfd	Puissance surfacique équivalente ( <i>Equivalent Power Flux Density</i> )

ESA	Agence spatiale européenne (European Space Agency)
FI	Fréquence intermédiaire
FPA	Réseau de type plan-focal ( <i>Focal plane array</i> )
FX	Transformée de Fourier avant multiplication
GBT	Télescope de Green Bank ( <i>Green Bank Telescope</i> )
GHz	GigaHertz (= 1 000 000 000 Hertz)
GMRT	Radiotélescope géant à ondes métriques ( <i>Giant Metrewave Radio Telescope</i> )
GPS	Système mondial de repérage ( <i>Global Positioning System</i> )
GSM	Système mondial pour communications mobiles ( <i>Global System for Mobile Communications</i> )
GT	Groupe de travail
HEMT	Transistor à mobilité électronique élevée ( <i>High Electron Mobility Transistor</i> )
HI	Hydrogène neutre
HII	Hydrogène ionisé
IEEE	the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
INR	Rapport brouillage/bruit ( <i>Interference to Noise Ratio</i> )
ISAS	Institut de l'espace et de la science astronautique (Institute of Space and Astronautical Science)
ISM	Industriel, scientifique et médical
ITU-R	Secteur des radiocommunications de l'UIT
ITU-T	Secteur de la normalisation des télécommunications de l'UIT
IUCAF	Commission interunion pour l'attribution de fréquences à la radioastronomie et à la science spatiale (the Inter-Union Commission for the Allocation of Frequencies for Radio Astronomy and Space Science)
IVS	Service international de VLBI pour la géodésie et l'astrométrie (International VLBI Service for Geodesy and Astronomy)
JAXA	Agence japonaise d'exploration aérospatiale (Japan Aerospace Exploration Agency)
JPL	Jet Propulsion Laboratory
Jy	Jansky (= $1 \times 10^{-26}$ W/m <sup>2</sup> /Hz = -260 dB(W/m <sup>2</sup> /Hz))
kHz	KiloHertz (= 1 000 Hertz)
LAN	Réseau local ( <i>Local Area Network</i> )
LOFAR	Réseau basses fréquences
LoS	Visibilité directe (Line of Sight)
LTE	Evolution à long terme ( <i>Long Term Evolution</i> )
MDP	Modulation par déplacement de phase
MDP-2	Modulation par déplacement de phase binaire
MGDM	Modulation gaussienne à déphasage minimal
MHz	Mégahertz (= 1 000 000 Hertz)
MPIfR	Max Planck Institut für Radioastronomie
MWA	Murchison Widefield Array
NASA	National Aeronautics and Space Administration



NIR	Infrarouge proche ( <i>Near Infrared</i> )
NRAO	Observatoire national de radioastronomie des Etats-Unis d'Amérique (National Radio Astronomy Observatory)
NSF	Fondation scientifique nationale des Etats-Unis (National Science Foundation (USA))
OoB	Hors bande ( <i>Out-of-Band</i> )
OSG	Orbite des satellites géostationnaires
OTB	Orbite terrestre basse
p.i.r.e.	Puissance isotrope rayonnée équivalente
pc	parsec (=3,09x10 <sup>16</sup> m = 3,26 années-lumière)
PET	Tomographie par émission de positons ( <i>Positron Emission Tomography</i> )
pdf	Puissance surfacique
RAFCAP	Comité des fréquences radioastronomiques de la région Asie-Pacifique (the Radio Astronomy Frequency Committee in the Asia-Pacific Region)
RF	Radiofréquence
RFI	Brouillage radioélectrique
rms	Valeur quadratique moyenne ( <i>root mean square</i> )
RPC	Réunion de préparation à la Conférence
RR	Règlement des radiocommunications
RRB	Comité du Règlement des radiocommunications
SCRPM	Commission spéciale chargée d'examiner les questions réglementaires et de procédure (the Special Committee for Regulatory and Procedural Matters)
SES	Service d'exploitation spatiale
SETI	Recherche d'une intelligence extraterrestre ( <i>Search for ExtraTerrestrial Intelligence</i> )
SETS	Service d'exploration de la Terre par satellite
SFCG	Groupe de coordination des fréquences spatiales (Space Frequency Coordination Group)
SFS	Service fixe par satellite
SIS	Supraconducteur-isolant-supraconducteur
SKA	Réseau d'un kilomètre carré ( <i>Square Kilometer Array</i> )
SMA	Réseau submillimétrique (the Submillimeter Array)
SMS	Service mobile par satellite
SNR	Rapport signal/bruit (=S/N) ( <i>Signal to Noise Ratio</i> )
spfd	Densité spectrale de puissance surfacique ( <i>Spectral Power Flux Density</i> )
SRA	Service de radioastronomie
SRI	Stanford Research Institute
SRL	Service de radiolocalisation
SRNS	Service de radionavigation par satellite
TEC	Transistor à effet de champ
TEC GaAs	Transistor à effet de champ à arséniure de gallium
TFR	Transformée de Fourier rapide

THz	Téraherz (= 1 000 000 000 000 Hertz)
TRF	Repère de référence terrestre ( <i>the Terrestrial Reference Frame</i> )
UAI	Union astronomique internationale
UE	Union Européenne
UIT	Union internationale des télécommunications
UMET	Universidad Metropolitana
URSI	Union radioscientifique internationale
USRA	Universities Space Research Association
UWB	Bande ultralarge ( <i>Ultra-Wide Band</i> )
VLA	Very Large Array (très grand réseau)
VLBA	Réseau à très grande ligne de base ( <i>Very Long Baseline Array</i> )
VLBI	Interférométrie à très grande ligne de base ( <i>Very Long Baseline Interferometry</i> )
VSOP	Programme d'observation de l'espace par interférométrie VLBI ( <i>VLBI Space Observatory Programme</i> )
WiFi	Sans fil ( <i>Wireless Fidelity</i> )
WMAP	Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
WSRT	Radiotélescope à synthèse d'ouverture de Westerbork ( <i>the Westerbork Synthesis Radio Telescope</i> )
ZSR	Zone de silence radioélectrique



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](mailto:sales@itu.int)  
Web: [www.itu.int/publications](http://www.itu.int/publications)



Imprimé en Suisse  
Genève, 2015

Crédits photos: ATCA David Smyth