

RECOMMANDATION UIT-R RA.769-2

Critères de protection applicables aux mesures en radioastronomie

(Question UIT-R 145/7)

(1992-1995-2003)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) qu'un grand nombre des progrès les plus fondamentaux réalisés en astronomie au cours de ces cinq dernières décennies (par exemple, la découverte de radiogalaxies, de quasars et de pulsars, la mesure directe de l'hydrogène neutre, la mesure directe de la distance de certaines galaxies extérieures et l'établissement d'un cadre de référence des positions précis à quelque 20 μ s d'arc près) a été rendu possible grâce à la radioastronomie, que les observations de radioastronomie devraient, selon toute attente, continuer d'apporter des contributions fondamentales à notre compréhension de l'Univers, et qu'elles constituent l'unique moyen d'étudier certains phénomènes cosmiques;
- b) que les progrès de la radioastronomie ont conduit à d'importants perfectionnements d'ordre technologique, en particulier dans les techniques de réception et d'imagerie, ainsi qu'à une meilleure connaissance des limites fondamentales imposées par le bruit radioélectrique, d'une grande importance pour les radiocommunications, et que ces progrès laissent prévoir d'autres résultats importants;
- c) que les radioastronomes ont fait des observations astronomiques utiles depuis la surface de la Terre dans toutes les fenêtres disponibles dans l'atmosphère, de 2 MHz à 1 000 GHz, et plus;
- d) que la technique de la radioastronomie spatiale, qui fait usage de radiotélescopes montés sur les plates-formes spatiales, permet d'accéder à la totalité du spectre des fréquences radioélectriques au-dessus de 10 kHz environ, notamment à des parties du spectre qui ne sont pas accessibles depuis la Terre à cause du phénomène d'absorption dans l'atmosphère;
- e) que la protection contre les brouillages est indispensable au progrès de la radioastronomie et des mesures qui s'y rapportent;
- f) que les observations en radioastronomie sont le plus souvent effectuées avec des antennes ou des réseaux d'antennes à gain élevé, pour obtenir la résolution angulaire la plus élevée possible, et qu'en conséquence, le brouillage reçu par le lobe principal n'a pas à être pris en considération dans la plupart des cas, sauf lorsque le récepteur risque d'être endommagé;
- g) que la plus grande partie du brouillage qui conduit à la dégradation des données en astronomie est reçue par les lobes latéraux lointains du télescope;
- h) que la sensibilité des équipements de réception en radioastronomie ne cesse de s'améliorer régulièrement, particulièrement dans les longueurs d'ondes millimétriques, et qu'elle dépasse de beaucoup celle de l'appareillage de télécommunication et des radars;
- j) que les observations types en radioastronomie exigent des temps d'intégration variant de quelques minutes à plusieurs heures, mais que les observations fines, particulièrement des raies spectrales, peuvent exiger des durées d'enregistrement plus longues, parfois de plusieurs jours;

- k) que certaines émissions d'engins spatiaux peuvent poser, pour la radioastronomie, des problèmes de brouillage qu'il n'est possible d'éviter ni par le choix de l'emplacement d'un observatoire, ni par une protection locale;
- l) que la radioastronomie peut subir des brouillages par suite de la réflexion d'émissions de services de Terre sur la Lune, sur des aéronefs et éventuellement sur des satellites artificiels;
- m) que certains types d'observations interférométriques à grand pouvoir de résolution spatiale exigent une réception simultanée, sur la même fréquence radioélectrique, par des systèmes de réception largement disséminés qui peuvent être situés dans des pays ou sur des continents différents, ou encore sur des plates-formes spatiales;
- n) qu'aux fréquences inférieures à 40 MHz environ, les conditions de propagation sont telles qu'un émetteur fonctionnant en un point quelconque de la Terre peut causer des brouillages préjudiciables à la radioastronomie;
- o) qu'un certain degré de protection peut être obtenu, grâce à des assignations de fréquence appropriées, sur une base nationale plutôt qu'internationale;
- p) que des CMR ont fait bénéficier la radioastronomie d'attributions de fréquences plus satisfaisantes que précédemment, particulièrement au-dessus de 71 GHz, mais que la protection dans bien des bandes, notamment celles utilisées en partage avec d'autres services radioélectriques, peut encore nécessiter une planification minutieuse;
- q) que des critères techniques concernant les brouillages préjudiciables pour le service de radioastronomie (SRA) ont été définis; ils figurent dans les Tableaux 1, 2 et 3,

recommande

- 1** que les radioastronomes soient invités à choisir des emplacements aussi exempts que possible de brouillages;
- 2** que les administrations se chargent d'assurer le maximum de protection possible aux fréquences et aux sites employés par les radioastronomes dans leurs propres pays et dans les pays voisins, et, en cas de planification de systèmes mondiaux, en tenant dûment compte des niveaux de brouillage indiqués dans l'Annexe 1;
- 3** que les administrations, en se chargeant d'assurer la protection de certaines observations en radioastronomie, prennent toutes les mesures possibles pour réduire au minimum absolu toutes les émissions brouilleuses dans les bandes de fréquences à protéger pour la radioastronomie, et notamment les émissions faites à bord d'aéronefs, de stations placées sur des plates-formes à haute altitude, d'engins spatiaux et de ballons;
- 4** que les administrations, lorsqu'elles proposent des attributions de fréquences, tiennent compte du fait qu'il est très difficile pour le SRA de partager des fréquences avec d'autres services lorsque les trajets de transmission entre les émetteurs et les observatoires sont en visibilité directe. Au-dessus de 40 MHz environ, on peut faire un partage avec un service dans lequel les émetteurs ne sont pas en visibilité directe des observatoires, mais une coordination peut être rendue nécessaire, en particulier quand ces émetteurs ont une puissance élevée.

Annexe 1

Sensibilité des systèmes de radioastronomie

1 Considérations générales et hypothèses utilisées dans le calcul des niveaux de brouillage

1.1 Critères de brouillage de niveau préjudiciable

La sensibilité d'une observation en radioastronomie peut être définie pour la plus petite variation de puissance ΔP du niveau de puissance P à l'entrée du radiomètre, qui puisse être décelée et mesurée. La sensibilité est donnée par l'équation suivante:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\sqrt{\Delta f_0 t}} \quad (1)$$

où:

P et ΔP : densité spectrale de puissance de bruit

Δf_0 : largeur de bande

t : temps d'intégration. P et ΔP dans l'équation (1) peuvent être exprimés en unités de température, par la constante de Boltzmann, k , soit:

$$\Delta P = k \Delta T; \quad \text{et} \quad P = k T \quad (2)$$

de sorte que nous pouvons exprimer comme suit la sensibilité d'un radiomètre:

$$\Delta T = \frac{T}{\sqrt{\Delta f_0 t}} \quad (3)$$

où:

$$T = T_A + T_R$$

Le résultat s'applique à une seule polarisation du radiotélescope. T est la somme de T_A (contribution à la température de bruit de l'antenne par le bruit de fond cosmique, l'atmosphère terrestre et le rayonnement de la Terre) et de T_R (température du bruit interne du récepteur). On peut utiliser les équations (1) ou (3) pour estimer la sensibilité et les seuils de brouillage préjudiciable pour les observations radioastronomiques. Les résultats sont donnés dans les Tableaux 1 et 2. On prend pour hypothèse un temps d'observation (ou d'intégration), t , de 2 000 s, et les seuils de brouillage, ΔP_H , indiqués dans les Tableaux 1 et 2 sont exprimés comme étant la puissance de brouillage à l'intérieur de la largeur de bande Δf qui fait apparaître une erreur de 10% dans la mesure de ΔP (ou de ΔT), c'est-à-dire:

$$\Delta P_H = 0,1 \Delta P \Delta f \quad (4)$$

En résumé, on peut calculer comme suit les valeurs des colonnes pertinentes des Tableaux 1 et 2:

- ΔT , au moyen de l'équation (3)
- ΔP , au moyen de l'équation (2)
- ΔP_H , au moyen de l'équation (4).

On peut encore exprimer le brouillage par la puissance surfacique incidente au niveau de l'antenne dans la largeur de bande totale, ou par la densité spectrale de la puissance surfacique, S_H , dans une largeur de bande de 1 Hz. On a indiqué les valeurs correspondant 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 la superficie équivalente est $c^2/4\pi f^2$, c étant la vitesse de la lumière et f la fréquence). Le gain d'une antenne isotrope, de 0 dBi, est utilisé comme valeur représentative générale pour le niveau des lobes latéraux (voir le § 1.3).

On obtient les valeurs de $S_H \Delta f$ (dB(W/m²)) en ajoutant à ΔP_H la quantité:

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

où f (Hz). Pour obtenir S_H , il suffit de retrancher la quantité $10 \log \Delta f$ (Hz) afin de tenir compte de la largeur de bande.

1.2 Temps d'intégration

On a calculé les sensibilités et les seuils du brouillage figurant dans les Tableaux 1 et 2 sur la base d'un temps d'intégration de 2000 s. En fait, les temps d'intégration effectivement utilisés pour les observations astronomiques diffèrent beaucoup d'un cas à un autre. Une valeur de 2000 s convient bien quand on observe le continuum avec un télescope à une antenne (et non avec un réseau interférométrique). Ce temps d'intégration correspond à des observations de bonne qualité. En revanche, une valeur de 2000 s est moins représentative pour les observations de raies spectrales. L'amélioration de la stabilité des récepteurs et la multiplication des spectromètres à corrélation ont permis d'utiliser plus souvent des temps d'intégration plus longs, nécessaires pour observer les lignes spectrales de faible intensité; dans pareil cas les observations durent normalement plusieurs heures. Pour ces observations un temps d'intégration plus représentatif serait de dix heures, auquel cas la valeur seuil du brouillage est de 6 dB plus stricte que les valeurs indiquées dans le Tableau 2. Certaines observations de phénomènes variant dans le temps, par exemple pulsars, éruptions stellaires ou solaires et scintillations interplanétaires, peuvent se contenter de durées nettement moindres.

1.3 Diagramme de sensibilité de l'antenne

Les brouillages causés aux appareils de radioastronomie passent presque toujours par les lobes latéraux de l'antenne, de sorte qu'il n'est pas nécessaire de prendre en considération la sensibilité du lobe principal au brouillage.

Le modèle des lobes latéraux pour des grandes antennes paraboliques dans la gamme de fréquences 2 à 30 GHz, présenté dans la Recommandation UIT-R SA.509, est une bonne approximation de la sensibilité d'un grand nombre d'antennes de radioastronomie; tout au long de la présente Recommandation il est considéré comme représentatif de l'antenne de radioastronomie de référence. Dans ce modèle, le niveau des lobes latéraux décroît en fonction de la distance angulaire (degrés) par rapport à l'axe du faisceau principal; il est égal à $32 - 25 \log \phi$ (dBi) pour $1^\circ < \phi < 48$. 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, étant donné que le gain des lobes latéraux, selon le modèle, varie de 32 à -10 dBi en fonction de cet angle. Toutefois, il est utile de calculer les seuils de la puissance de brouillage pour une valeur particulière du gain des lobes latéraux, que nous posons comme étant de 0 dBi et utilisons dans les Tableaux 1 à 3. Il apparaît que ce niveau des lobes latéraux se produit à un angle de $19,05^\circ$ par rapport à l'axe du faisceau principal. Un signal à la valeur seuil préjudiciable, définie pour un gain des lobes latéraux de 0 dBi, excédera le critère fixé pour le niveau préjudiciable à l'entrée du récepteur si au niveau de l'antenne il est incident à un angle

inférieur à $19,05^\circ$. L'angle solide à l'intérieur d'un cône de rayon angulaire de $19,05^\circ$ est égal à $0,344$ sr, ce qui équivaut à $5,5\%$ de la valeur de 2π sr du ciel au-dessus de l'horizon qu'un radiotélescope peut observer à n'importe quel moment. Ainsi, si la probabilité de l'angle d'incidence de brouillage était uniformément répartie sur le ciel, environ $5,5\%$ des signaux brouilleurs seraient incidents à moins de $19,05^\circ$ de l'axe du faisceau principal d'une antenne pointée vers le ciel. On notera également que le chiffre de $5,5\%$ correspond aux niveaux recommandés (voir la Recommandation UIT-R RA.1513) pour la perte de données dans les observations de radioastronomie en pourcentage de temps.

Cas particulier, les satellites sur l'orbite non géostationnaire (non OSG) présentent une situation dynamique, c'est-à-dire que leurs positions par rapport aux faisceaux de l'antenne de radioastronomie montrent de grandes variations à l'intérieur de l'intervalle de 2000 s correspondant au temps d'intégration. Pour analyser le brouillage dans ce cas, il faut intégrer la sensibilité pour l'ensemble des différents niveaux des lobes latéraux, par exemple en utilisant la notion de puissance surfacique équivalente (epfd) définie au numéro 22.5C du Règlement des radiocommunications (RR). Par ailleurs, il faut normalement combiner les réponses d'un certain nombre de satellites au sein d'un système particulier. Lors de calculs de ce type, il est recommandé d'utiliser, pour les antennes dont le diamètre est supérieur à 100λ , le diagramme de sensibilité défini dans la Recommandation UIT-R S.1428 pour représenter l'antenne de radioastronomie, en attendant l'établissement d'un modèle fondé spécifiquement sur des antennes de radioastronomie (voir le § 2.2 pour de plus amples détails).

1.4 Largeur de bande

L'équation (1) montre que les observations les plus fines sont obtenues lorsque les radioastronomes utilisent toute la largeur de bande possible. En conséquence, au Tableau 1 (observations du continuum), on suppose que Δf est la largeur des bandes attribuées à la radioastronomie pour les fréquences jusqu'à 71 GHz; au-delà, on utilise une valeur de 8 GHz, largeur de bande représentative qui est généralement utilisée sur les récepteurs de radioastronomie dans cette gamme. Au Tableau 2 (observations de lignes spectrales), on utilise pour les valeurs au-dessous de 71 GHz une largeur de voie Δf égale à l'effet Doppler, correspondant en vitesse à 3 km/s. Cette valeur constitue un compromis entre la résolution spectrale élevée qui est souhaitée et la sensibilité. Au-dessus de 71 GHz les lignes qui revêtent une importance pour les astrophysiciens sont très nombreuses, comme l'atteste la Recommandation UIT-R RA.314, mais le Tableau 2 ne donne qu'un petit nombre de valeurs représentatives des niveaux préjudiciables pour la gamme 71 - 275 GHz. La largeur de voie utilisée pour calculer les niveaux préjudiciables au-dessus de 71 GHz est dans tous les cas de 1000 kHz (soit 1 MHz); cette valeur a été choisie pour des raisons pratiques. Bien qu'elle soit légèrement plus large que la largeur des voies spectrales habituellement utilisées dans les récepteurs de radioastronomie à ces fréquences, cette valeur est utilisée comme la largeur de bande de référence normalisée pour les services spatiaux au-dessus de 15 GHz.

1.5 Température de bruit du récepteur et température de l'antenne

Les températures de bruit du récepteur (Tableaux 1 et 2) sont représentatives des systèmes utilisés en radioastronomie. Pour les fréquences au-dessus de 1 GHz, il s'agit d'amplificateurs ou de mélangeurs à refroidissement cryogénique. L'effet quantique impose une limite basse théorique de hf/k sur la température de bruit de ces dispositifs, où h et k sont les constantes respectivement de Planck et de Boltzmann. Cette limite devient importante aux fréquences au-dessus de 100 GHz, où elle est égale à $4,8$ K. Les mélangeurs et amplificateurs en exploitation pour les bandes à 100 GHz et au-dessus donnent des températures de bruit supérieures à hf/k d'un facteur quatre environ. C'est pourquoi, pour les fréquences au-dessus de 100 GHz, on a utilisé dans les Tableaux 1 et 2 des températures de bruit égales à $4 hf/k$.

Les températures d'antenne indiquées dans les Tableaux sont elles aussi représentatives de systèmes utilisés communément en radioastronomie. Elles comprennent les effets de l'ionosphère ou de l'atmosphère neutre, les effets du sol dans les lobes latéraux résultant des phénomènes de diffraction ou de diffusion, les pertes par effet joule et le bruit de fond d'origine cosmique. Aux fréquences au-dessus de 100 GHz, l'affaiblissement dû à la vapeur d'eau de l'atmosphère neutre devient très important. Pour ces fréquences, les valeurs indiquées sont typiques des sites terrestres utilisés pour les principales installations de radioastronomie en ondes millimétriques, telles que Mauna Kea (Hawaii) ou le Llano de Chajnantor (Chili), qui est à une altitude de 5 000 m, site choisi pour un important dispositif international d'observation de radioastronomie dans les fréquences situées entre 30 GHz et 1 THz.

2 Cas particuliers

Les niveaux indiqués dans les Tableaux 1 et 2 sont applicables à des sources de signaux brouilleurs de Terre. Les puissances surfaciques préjudiciable et spectrale indiquées dans les Tableaux 1 et 2 supposent que les brouillages sont reçus par un lobe latéral de 0 dBi; elles devraient être considérées comme les critères de brouillage généraux à appliquer pour des observations de radioastronomie de haute sensibilité, lorsque les brouillages ne pénètrent pas dans les lobes latéraux proches.

2.1 Brouillages causés par les satellites OSG

Le brouillage causé par les satellites OSG constitue un cas particulièrement important. Les niveaux de puissance figurant aux Tableaux 1 et 2 ayant été calculés sur la base d'un gain d'antenne de 0 dBi, des brouillages préjudiciables se produisent lorsqu'une antenne de référence, semblable à celle qui est décrite dans la Recommandation UIT-R SA.509, est pointée à moins de $19,05^\circ$ d'un satellite rayonnant à des niveaux conformes à ceux indiqués dans ces Tableaux. Avec une série d'émetteurs de ce type situés sur l'OSG, il ne serait pas possible de faire des observations de radioastronomie de grande sensibilité dans une bande de la voûte céleste large de $38,1^\circ$ et centrée sur l'orbite. La perte d'une portion aussi importante de la voûte céleste imposerait de graves restrictions aux observations de radioastronomie.

En général, il n'est pas possible dans la pratique de ramener les émissions non désirées, provenant de satellites en dessous du niveau préjudiciable dans le cas où le faisceau principal d'un radiotélescope est pointé directement sur le satellite. Une solution possible consiste à observer la projection de l'OSG en coordonnées célestes, vue des latitudes de plusieurs observatoires importants de radioastronomie (voir la Recommandation UIT-R RA.517). S'il était possible de pointer un radiotélescope à moins de 5° du plan de l'OSG sans qu'il soit soumis à un brouillage préjudiciable, les observations de haute sensibilité resteraient impossibles pour ce radiotélescope dans une bande de ciel large de 10° , cela constituerait une perte importante pour un observatoire donné. Toutefois, on constate que pour une combinaison de radiotélescopes situés à des latitudes nord et sud et fonctionnant sur les mêmes bandes de fréquences, la totalité de la voûte céleste serait accessible. On peut donc considérer qu'une valeur de 5° constitue l'écart angulaire minimal nécessaire entre le faisceau principal d'une antenne de radioastronomie et le plan de l'OSG.

Dans le modèle d'antenne de la Recommandation UIT-R SA.509, le niveau des lobes latéraux à 5° du faisceau principal est de 15 dBi. Ainsi, pour éviter que des brouillages préjudiciables ne soient causés à un radiotélescope, satisfaisant aux critères de performance des lobes latéraux de la Recommandation UIT-R SA.509, pointé à moins de 5° de l'émetteur, il est souhaitable que les émissions des satellites soient réduites de 15 dB au-dessous des puissances surfaciques indiquées aux Tableaux 1 et 2. Lorsque l'espacement des satellites sur l'OSG n'atteint que quelques degrés, le niveau des émissions de chaque émetteur doit être encore plus faible pour satisfaire à la condition suivante: la somme des puissances de tous les signaux brouilleurs reçus doit être inférieure de 15 dB aux ΔP_H spécifiés aux Tableaux 1 et 2.

Il est reconnu que les limitations des émissions dont il est question plus haut, ne permettent pas, dans la pratique, un partage de la même bande de fréquences entre la radioastronomie et les émissions sur les liaisons descendantes des satellites. Ces limitations s'appliquent néanmoins aux émissions non désirées provenant des émetteurs de satellite qui tombent dans les bandes de radioastronomie énoncées aux Tableaux 1 et 2. Ces limitations des émissions ont des conséquences pour les services spatiaux responsables des brouillages, qui exigent une évaluation approfondie. En outre, dans la conception des nouvelles antennes de radioastronomie, il faudra s'efforcer de réduire à un minimum le gain des lobes latéraux à proximité du faisceau principal, moyen important pour réduire les brouillages causés par les émetteurs sur l'OSG.

2.2 Brouillages émis par les satellites non OSG

Dans le cas des satellites non OSG, et en particulier dans celui des satellites sur orbite terrestre basse, les systèmes mettent en jeu habituellement des constellations de satellites. Aussi, pour déterminer les niveaux de brouillages, faut-il analyser l'effet combiné de nombreux signaux, dont la plupart sont reçus via les lobes latéraux lointains de l'antenne de radioastronomie. Il est en conséquence souhaitable de disposer d'un modèle plus détaillé que celui de la Recommandation UIT-R SA.509, et il est proposé d'utiliser le modèle de la Recommandation UIT-R S.1428 en attendant de disposer d'un modèle plus représentatif des antennes de radioastronomie. Dans ce modèle proposé, il convient en général d'utiliser pour des applications de radioastronomie des antennes dont le diamètre est supérieur à 100λ . Il convient d'observer que la Note 1 de la Recommandation UIT-R S.1428, qui permet d'ignorer les composantes à polarisation croisée, ne peut pas être appliquée étant donné que les antennes de radioastronomie reçoivent en général les signaux simultanément dans deux polarisations orthogonales. Étant donné le déplacement des satellites non OSG dans le ciel pendant une période d'intégration de 2 000 s, il faut établir la moyenne des niveaux de brouillage sur cette période, c'est-à-dire que la sensibilité vis-à-vis de chaque satellite doit être intégrée au fur et à mesure que le satellite se déplace dans le diagramme des lobes latéraux. Un système d'analyse qui satisfait à ces exigences est la méthode par l'epfd décrite au numéro 22.5C du RR. Les valeurs d'epfd représentent la puissance surfacique d'un signal entrant dans l'antenne par le centre du lobe principal qui produirait un niveau de puissance de brouillage équivalent. Étant donné que les seuils de brouillage préjudiciable indiqués dans les Tableaux 1 et 2 correspondent à une puissance surfacique reçue avec un gain d'antenne de 0 dBi, il faut les comparer avec les valeurs de $(epfd + G_{mb})$, où G_{mb} est le gain du lobe principal, afin de déterminer si le brouillage dépasse le niveau préjudiciable. Utilisant la méthode epfd, la Recommandation UIT-R S.1586 qui a récemment été élaborée traite des calculs de brouillage entre les télescopes de radioastronomie et les systèmes à satellites non OSG du SFS. Une Recommandation analogue, la Recommandation UIT-R M.1583, traite quant à elle des calculs de brouillage entre les télescopes de radioastronomie et les systèmes à satellites non OSG du SMS et du service de radionavigation par satellite. L'applicabilité des critères de protection présentés dans les Tableaux 1 et 2 est décrite dans la Recommandation UIT-R RA.1513.

2.3 Sensibilité des interféromètres et des réseaux d'antennes aux brouillages radio-électriques

Deux paramètres réduisent la sensibilité au brouillage. Ils tiennent d'une part à la fréquence des instabilités (oscillations) des franges que l'on observe lorsque les sorties de deux antennes sont combinées et d'autre part au fait qu'on observe des temps de propagation relatifs différents avant recombinaison des composantes du signal brouilleur reçu par différentes antennes largement espacées. Le cas est plus complexe que pour les antennes uniques (§ 1). En gros, si la puissance du signal brouilleur reçue demeure constante, l'effet est réduit d'un facteur à peu près égal à la période moyenne d'une oscillation naturelle des franges, divisée par le temps d'intégration des données. Ce

temps est généralement compris entre quelques secondes dans le cas d'un réseau dense où l'espacement prévu entre les antennes est le plus grand $L' \sim 10^3 \lambda$ où λ est la longueur d'onde, et moins de 1 ms pour des réseaux intercontinentaux où l'espacement est égal à $L' \sim 10^7 \lambda$. Ainsi, par rapport à un radiotélescope unique, l'interféromètre a une insensibilité au brouillage qui, avec des hypothèses raisonnables, augmente en fonction des dimensions du réseau exprimées en longueurs d'onde.

Les plus insensibles aux brouillages sont les interféromètres et les réseaux d'antennes dans lesquels l'espacement entre les antennes est suffisamment grand pour que le risque de brouillages corrélés soit très faible (par exemple pour l'interférométrie à très grande base (VLBI)). Dans ce cas, les considérations précédentes ne s'appliquent pas. Le niveau de brouillage acceptable est assujéti à la contrainte suivante: le niveau de puissance du signal brouilleur ne devrait pas dépasser 1% du niveau de bruit du récepteur afin d'éviter de graves erreurs dans la mesure de l'amplitude des signaux cosmiques. Les niveaux de brouillage applicables à des observations VLBI types sont indiqués dans le Tableau 3, compte tenu des valeurs de T_A et de T_R indiquées au Tableau 1.

Il faut souligner que l'utilisation de grands interféromètres et de grands réseaux se limite généralement aux études des sources discrètes de forte intensité avec des dimensions angulaires inférieures à quelques dizaines de seconde d'arc pour la VLBI. Pour des études plus générales des radiosources, les résultats indiqués dans les Tableaux 1 et 2 sont valables et conviennent pour la protection générale de la radioastronomie.

TABLEAU 1

Seuils de brouillage préjudiciable aux observations du continuum en radioastronomie

Fréquence centrale ⁽¹⁾ f_c (MHz)	Largeur de bande supposée Δf (MHz)	Température de bruit minimale de l'antenne T_A (K)	Température de bruit du récepteur T_R (K)	Sensibilité du système ⁽²⁾ (fluctuations du bruit)		Seuils de brouillage ^{(2) (3)}		
				Température ΔT (mK)	Densité spectrale de puissance ΔP (dB(W/Hz))	Puissance reçue à l'entrée ΔP_H (dBW)	Puissance surfacique $S_H \Delta f$ (dB(W/m ²))	Densité spectrale de puissance surfacique S_H (dB(W/(m ² · 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	-278	-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

⁽¹⁾ Le calcul des seuils du brouillage est fondé sur la fréquence centrale indiquée dans cette colonne, bien que toutes les régions n'aient pas les mêmes attributions.

⁽²⁾ Le temps d'intégration supposé est de 2 000 s; selon qu'on utilise un temps d'intégration de 15 min, 1 h, 2 h, 5 h ou 10 h, ajouter aux valeurs correspondantes du Tableau respectivement: +1,7; -1,3; -2,8; -4,8 ou -6,3 dB.

⁽³⁾ Les niveaux de brouillage indiqués sont ceux qui s'appliquent aux mesures de la puissance totale que reçoit une seule antenne. Des niveaux moins stricts peuvent convenir pour d'autres types de mesure (voir le § 2.2). Pour les émetteurs sur orbite géostationnaire, il est souhaitable d'abaisser les niveaux de -15 dB (voir le § 2.1).

TABLEAU 2*

Seuils de brouillage préjudiciable aux observations de raies spectrales en radioastronomie

Fréquence f (MHz)	Largeur supposée de la voie pour la raie spectrale bande Δf (kHz)	Température de bruit minimale de l'antenne T_A (K)	Température de bruit du récepteur T_R (K)	Sensibilité du système ⁽¹⁾ (fluctuations du bruit)		Seuils de brouillage ^{(1) (2)}		
				Température ΔT (mK)	Densité spectrale de puissance ΔP_S (dB(W/Hz))	Puissance reçue à l'entrée ΔP_H (dBW)	Puissance surfactive $S_H \Delta f$ (dB(W/m ²))	Densité spectrale de puissance surfactive S_H (dB(W/(m ² · 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
14 488	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

* 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.

- (1) Le temps d'intégration supposé est de 2 000 s; selon qu'on utilise un temps d'intégration de 15 min, 1 h, 2 h, 5 h ou 10 h, ajouter aux valeurs correspondantes du Tableau respectivement: +1,7; -1,3; -2,8; -4,8 ou -6,3 dB.
- (2) Les niveaux de brouillage indiqués sont ceux qui s'appliquent aux mesures de la puissance totale que reçoit une seule antenne. Des niveaux moins stricts peuvent convenir pour d'autres types de mesure (voir le § 2.2). Pour les émetteurs sur orbite géostationnaire il est souhaitable d'abaisser les niveaux de -15 dB (voir le § 2.1).

EXPLICATION DES EN-TÊTES DES COLONNES DES TABLEAUX 1 ET 2

Colonne

- (1) Fréquence centrale de la bande attribuée à la radioastronomie (Tableau 1) ou fréquence nominale de la raie spectrale (Tableau 2).
- (2) Largeur de bande supposée ou attribuée (Tableau 1) ou largeur supposée des canaux représentant les valeurs typiques pour l'observation de raies spectrales (Tableau 2).
- (3) La température de bruit minimale de l'antenne se compose du bruit ionosphérique, du bruit atmosphérique et du rayonnement de la Terre.
- (4) Température de bruit du récepteur représentative d'un système radiométrique de bonne qualité, destiné à des observations radioastronomiques de grande sensibilité.
- (5) Sensibilité totale du système, (mK), qu'on a calculée d'après l'équation (1) en tenant compte des températures de bruit combinées de l'antenne et du récepteur, de la largeur de canal indiquée sur la liste et d'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 la relation $\Delta P = k \Delta T$, avec $k = 1,38 \times 10^{-23}$ (J/K) (constante de Boltzmann). Les nombres inscrits dans cette colonne sont les valeurs logarithmiques de ΔP .
- (7) Puissance à l'entrée du récepteur que l'on considère comme préjudiciable pour des observations de grande sensibilité, ΔP_H . Il s'agit du seuil de brouillage qui introduit une erreur au plus égale à 10% dans la mesure de ΔP ; $\Delta P_H = 0,1 \Delta P \Delta f$. Les nombres inscrits dans ce Tableau sont les logarithmes de ΔP_H .
- (8) Puissance surfacique dans le canal de la raie spectrale, qui est nécessaire pour donner une puissance ΔP_H dans un système de réception équipé d'une antenne de réception isotrope. Les nombres inscrits dans ce Tableau sont les logarithmes de $S_H \Delta f$.
- (9) Densité spectrale de puissance surfacique, qui est nécessaire pour donner une puissance ΔP_H dans un système de réception, équipé d'une antenne de réception isotrope. Les nombres inscrits dans ce Tableau sont les logarithmes de S_H . Pour obtenir les niveaux de puissance correspondants dans une largeur de bande de référence de 4 kHz ou de 1 MHz ajouter respectivement 36 dB ou 60 dB.

TABLEAU 3

Seuils de brouillage applicables aux observations VLBI

Fréquence centrale (MHz)	Seuils de brouillage (dB(W/(m ² · Hz)))
325,3	-217
611	-212
1 413,5	-211
2 695	-205
4 995	-200
10 650	-193
15 375	-189
23 800	-183
43 000	-175
86 000	-172