

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R RA.1237-2
(01/2010)

**Protection du service de radioastronomie
contre les rayonnements non désirés
produits par des systèmes à modulation
numérique à large bande**

Série RA
Radio astronomie



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

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

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

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

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

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

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

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

Publication électronique
Genève, 2017

© UIT 2017

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

RECOMMANDATION UIT-R RA.1237-2*

Protection du service de radioastronomie contre les rayonnements non désirés produits par des systèmes à modulation numérique à large bande

(Question UIT-R 145/7)

(1997-2003-2010)

Champ d'application

La présente Recommandation traite de la protection du service de radioastronomie contre les rayonnements non désirés produits par des systèmes à modulation numérique à large bande. Des informations techniques sont données dans l'Annexe 1, en particulier sur les niveaux des brouillages causés au service de radioastronomie par des systèmes à satellites. Il est préconisé dans la Recommandation que, pour les systèmes utilisant les techniques de modulation numérique à large bande, toutes les mesures pratiquement réalisables soient prises pour réduire les rayonnements non désirés.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que le service de radioastronomie et d'autres services passifs continuent d'apporter à la science des contributions importantes et concrètes;
- b) que la recherche en radioastronomie dépend essentiellement des observations qui peuvent être faites aux limites extrêmes de sensibilité;
- c) que tous les services tireront parti de mesures permettant de réduire ou d'éliminer la présence de rayonnements non désirés dans le spectre;
- d) que la Résolution 739 (Rév.CMR-15) définit un processus de consultation à suivre lorsque les rayonnements non désirés produits par certaines liaisons descendantes de services spatiaux exploitées dans des bandes de fréquences bien précises dépassent le niveau de brouillage gênant dans certaines bandes attribuées à la radioastronomie;
- e) que les émetteurs, en particulier ceux des stations spatiales, utilisent de plus de plus des techniques de modulation avec étalement du spectre en séquence directe (DSSS) et de modulation numérique à large bande qui peuvent produire des bandes latérales de rayonnements non désirés s'étendant à des fréquences très éloignées de la porteuse tel que cela est expliqué à l'Annexe 1;
- f) que des moyens techniques pour filtrer ces bandes latérales ont été mis au point et utilisés avec succès;
- g) que l'on connaît des techniques de modulation numérique produisant des niveaux de rayonnements non désirés intrinsèquement faibles et que leur efficacité en terme d'utilisation du spectre a été démontrée;
- h) qu'il n'existe pas, du point de vue du service brouillé exploité dans une bande extérieure à la bande attribuée au service produisant les rayonnements non désirés, de distinction objective entre les brouillages du domaine des rayonnements non essentiels et les brouillages du domaine des émissions hors bande,

* La Commission d'études 7 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à la présente Recommandation en 2017 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

notant

a) que des exemples de systèmes à satellites utilisant la modulation DSSS susceptibles de causer des brouillages au service de radioastronomie sont donnés dans le Rapport UIT-R SM.2091,

recommande

1 pour les systèmes utilisant des techniques de modulation numérique à large bande, de prendre toutes les mesures pratiquement réalisables pour réduire le niveau des bandes latérales qui débordent de la bande attribuée au service, compte tenu des orientations données dans l'Annexe 1.

Annexe 1

Brouillage du service de radioastronomie par des rayonnements non désirés (rayonnements non essentiels et émissions hors bande) produits par des systèmes à modulation numérique à large bande

1 Introduction

L'expérience montre que la plupart des brouillages qui perturbent gravement le service de radioastronomie proviennent d'émetteurs montés à bord de satellites. La majorité de ces brouillages sont dus à des rayonnements non désirés (produits d'intermodulation, autres effets non linéaires et bandes latérales engendrées par des transmissions numériques, s'étendant parfois sur plusieurs fois la largeur de bande attribuée en dehors de la bande assignée à l'émetteur d'un satellite). Un site d'observation bien protégé contre les émetteurs de Terre n'est pas protégé contre les rayonnements provenant des satellites et les satellites ne sont pas accessibles pour une implantation de filtres ou d'autres techniques de filtrage. En conséquence, les rayonnements non désirés provenant des satellites constituent la menace la plus sérieuse pour le service de radioastronomie, compte tenu notamment de la rapidité à laquelle l'utilisation des satellites se développe actuellement.

2 Rayonnements non essentiels et émissions hors bande provenant de la modulation numérique

L'utilisation de techniques de modulation numérique, y compris de modulation avec DSSS, peuvent engendrer des bandes latérales éloignées de la porteuse. La classification de ces bandes latérales, en rayonnements non essentiels ou en émissions hors bande, est définie dans les numéros 1.144 à 1.146 du Règlement des radiocommunications (RR). Dues au processus de modulation, comme c'est le cas des bandes latérales des modulations par étalement du spectre, les émissions hors bande sont définies comme étant au voisinage *immédiat* de la largeur de bande nécessaire. Cette définition est communément interprétée comme signifiant que la gamme de fréquences des émissions hors bande est quelquefois plus large que la largeur de bande nécessaire. Les rayonnements non essentiels se produisent à l'extérieur de la largeur de bande nécessaire et leur niveau peut être réduit sans que soit altérée la transmission des informations correspondantes, deux caractéristiques s'appliquant également aux bandes latérales des modulations par étalement du spectre. Or, des bandes latérales de ce type peuvent sérieusement brouiller une bande adjacente ou une bande plus distinctement séparée en fréquences. La notion de domaines pour les rayonnements non désirés a été élaborée essentiellement pour préciser les définitions (voir les numéros 1.146A et 1.146B du RR).

3 Niveaux de brouillage pour la radioastronomie

Les niveaux de seuil auxquels des signaux brouilleurs deviennent gênants pour la radioastronomie sont donnés dans la Recommandation UIT-R RA.769 en termes de puissance reçue à la borne de l'antenne, de densité spectrale de puissance reçue, de densité surfacique de puissance et de densité spectrale de puissance au niveau de l'antenne de radioastronomie et sont calculés pour une série représentative de bandes de radioastronomie sur la totalité du spectre. Les niveaux de brouillage ainsi déterminés sont applicables, dans une large mesure, à un grand nombre de services actifs susceptibles de brouiller le service de radioastronomie.

L'Appendice 3 du RR fixe des limites aux rayonnements non essentiels en fonction de la puissance fournie à la ligne d'émission d'une antenne. Ces limites n'ont toutefois pas été définies pour protéger les services passifs et sont donc peut être insuffisantes pour protéger le service de radioastronomie dans certains cas. Or, pour traduire ces valeurs limites en niveaux de brouillage pour la radioastronomie, il faudrait connaître avec précision les caractéristiques de l'antenne émettrice pour chaque source potentielle de brouillage ainsi que l'affaiblissement le long du trajet entre cette antenne émettrice et une antenne de radioastronomie quelconque. Par ailleurs, de telles limites ne conviennent pas dans le cas de réseaux d'antennes actives, puisque dans ce cas la sortie d'émetteur n'est pas unique. Ces considérations nous amènent à conclure qu'il vaut mieux établir ces limites de rayonnement par rapport à la puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) dans la direction d'un observatoire de radioastronomie.

Prenons comme exemple de l'utilisation de la p.i.r.e. le cas d'un émetteur à bord d'un satellite géostationnaire: il est probable que n'importe quel satellite de ce type, étant donné qu'il est visible au-dessus de l'horizon depuis une grande partie de la Terre, émettra des lobes latéraux dans la direction d'un ou de plusieurs observatoires de radioastronomie, mais il est possible que sa liaison descendante n'illumine qu'une zone relativement peu étendue dans laquelle peut ne se trouver aucun observatoire. En conséquence, le concepteur d'un système à satellites peut choisir de réduire les niveaux de rayonnement dans les lobes latéraux pour éviter de brouiller le service de radioastronomie. Cette solution serait possible si les limites sont établies en fonction de la p.i.r.e. rayonnée dans la direction d'un observatoire, alors que si elles le sont en fonction de la puissance émise dans la ligne d'émission d'une antenne, comme c'est actuellement le cas dans l'Appendice 3 du RR, il faudrait alors supposer, dans le cas le plus défavorable, que le gain total de l'antenne émettrice pourrait rayonner en direction d'un observatoire. Ces dernières limites pourraient être beaucoup plus difficiles à observer. Il apparaît donc que les valeurs de p.i.r.e. dans la direction d'une antenne de radioastronomie conviennent beaucoup mieux à l'établissement de limites de rayonnements non désirés destinées à assurer la protection du service de radioastronomie. Cette conclusion s'applique aussi à n'importe quel autre type d'émission et notamment à celles provenant d'émetteurs au sol. Il est possible de calculer les valeurs de p.i.r.e. à partir des valeurs de puissance surfacique et de densité spectrale de puissance surfacique indiquées dans la Recommandation UIT-R RA.769 dès lors qu'on connaît les valeurs d'affaiblissement de propagation.

Il convient de noter en outre que pour calculer le niveau de brouillage, il faut connaître les niveaux de rayonnements non désirés en valeurs absolues, et non relatives (c'est-à-dire exprimées en décibels) par rapport aux émissions principales. En effet, dans de nombreux cas, les rayonnements non désirés sont fort éloignés en fréquence des émissions principales, lesquelles occupent des bandes attribuées différentes de celles du service affecté. Il est donc logique d'établir les limites en unités absolues de puissance (puissance surfacique ou densité spectrale de puissance surfacique) et non comme fraction de l'émission principale.

4 Brouillages causés par des satellites

Les brouillages causés à des stations de radioastronomie proviennent de satellites OSG ou non OSG en liaison descendante. Dans le premier cas, les brouillages ne varieront pas, quel que soit le lieu. Dans le second cas, la puissance brouilleuse variera en fonction du temps et de l'emplacement dans le ciel. Les deux cas sont donc traités séparément.

Dans les bandes où les observations du continuum prédominent, la largeur de bande utilisée pour calculer le niveau de seuil des brouillages gênants correspond à la largeur de la bande attribuée au service de radioastronomie (voir le Tableau 1 de la Recommandation UIT-R RA769). Dans les bandes où les observations des raies spectrales prédominent la largeur de bande de canal utilisée pour calculer les niveaux seuils de brouillage correspond à la largeur de bande supposée par les raies spectrales du récepteur de radioastronomie (voir le Tableau 2 de la Recommandation UIT-R RA.769.)

4.1 Rayonnements non désirés produits par des systèmes à satellites non OSG (liaison descendante)

La puissance surfacique des rayonnements non désirés peut être évaluée comme suit:

$$pfd_{\text{rayonnements non désirés}} = \int_{f_1}^{f_2} \frac{p(f) \cdot g(f)}{SL \cdot ATM(f)} df \quad (1)$$

où:

$pfd_{\text{rayonnements non désirés}}$: puissance surfacique au niveau de la station de radioastronomie (W/m²);

f_1, f_2 : bord inférieur et supérieur respectivement de la largeur de bande de référence de la station de radioastronomie (Hz);

$p(f)$: densité de puissance des rayonnements non désirés au port de l'antenne d'émission (W/Hz);

$g(f)$: gain de l'antenne d'émission dans la direction du site de radioastronomie;

SL : affaiblissement d'étalement (dB);

$ATM(f)$: absorption atmosphérique dans la bande $f_1 - f_2$ en fonction de la fréquence.

Il convient de noter que la densité de puissance du signal émis, le gain du sous-système d'antenne et l'absorption atmosphérique varient en fonction de la fréquence et sont donc représentés comme des fonctions de la fréquence. La puissance surfacique des rayonnements non désirés sur le site de la station de radioastronomie est l'intégrale de ces fonctions, comme indiqué ci-dessus, sur la fréquence de la bande passante du récepteur. Dans les cas où la densité de puissance des rayonnements non désirés, le gain d'antenne et l'absorption atmosphérique sont constants sur toute la largeur de bande du récepteur du service passif, la fonction peut être simplifiée comme suit:

$$pfd_{\text{rayonnements non désirés}} = \frac{P \cdot g}{SL \cdot ATM} (f_2 - f_1) \quad (2)$$

Dans les cas où la bande active est adjacente à la bande passive, il est possible de supposer que le gain de l'antenne d'émission reste un peu près constant dans la bande d'émission et dans la bande passive. Toutefois, cela peut souvent ne pas être le cas, en particulier lorsque la bande passive est située en dessous de la fréquence de coupure du réseau d'alimentation à guide d'ondes du sous-système d'antenne.

Ce niveau de puissance surfacique doit ensuite être comparé aux niveaux de seuil figurant dans la Recommandation UIT-R RA.769.

4.2 Rayonnements non désirés produits par des systèmes à satellites non OSG (liaison descendante)

Pour évaluer les brouillages causés par des systèmes à satellites non OSG du service fixe par satellite (SFS) aux stations de radioastronomie, il convient d'utiliser, en plus du calcul de la puissance surfacique d'un satellite particulier, la méthode indiquée dans la Recommandation UIT-R S.1586. De même, pour évaluer les brouillages causés par des systèmes non OSG du service mobile par satellite (SMS) et du service de radionavigation par satellite (SRNS) aux stations de radioastronomie, il convient d'utiliser la méthode indiquée dans la Recommandation UIT-R M.1583.

5 Rayonnements non désirés émis par des satellites posant un problème particulier au service de radioastronomie

5.1 Modulation avec étalement du spectre en séquence directe

Dans un système sans mise en forme des impulsions, ce type de modulation se traduit par un spectre de puissance dont la forme est celle d'une fonction en sinus carré de la fréquence avec des bandes latérales très étendues. Si f est la fréquence mesurée à partir de la porteuse et T la période de base de la fonction d'étalement, la forme du spectre est:

$$(\sin(\pi f T) / (\pi f T))^2 \quad (3)$$

Les niveaux de puissance de crête dans les bandes latérales décroissent en fonction de f^{-2} , c'est-à-dire uniquement de 6 dB par octave dans f . Dans le cas le plus défavorable, le spectre qui est rayonné suit l'équation (3) sur une large gamme de fréquences et peut sérieusement brouiller le service de radioastronomie à des fréquences très éloignées de la porteuse. Toutefois, dans des systèmes employant des techniques de ce type, il s'est généralement avéré que seule la partie centrale du spectre émis est acceptée par les filtres FI du récepteur, de sorte que les bandes latérales additionnelles constituent des rayonnements non désirés. Cela n'est peut-être pas le cas pour les signaux du SRNS pour lesquels il faudra peut-être tenir compte également des lobes latéraux dans le processus de corrélation afin d'obtenir une précision suffisamment grande pour l'emplacement déterminé par le système (voir le Rapport UIT-R SM.2091).

Il se peut qu'il ne soit pas possible d'éliminer les bandes latérales non désirées du spectre étalé à proximité de la porteuse en utilisant des filtres calés à la fréquence porteuse si la porteuse du spectre en question est voisine de la bande attribuée à la radioastronomie. Pour en réduire les effets, une autre méthode consiste à modifier le processus de modulation. Les techniques modernes de traitement numérique (la modulation par déphasage minimal avec filtre gaussien par exemple) permettent de conformer le spectre de façon précise, en agissant au niveau de la bande de base des signaux à spectre étalé.

Pour respecter les niveaux de seuil gênants pour le service de radioastronomie, les systèmes utilisant la modulation DSSS doivent abaisser les niveaux des bandes latérales en conjuguant filtrage et mise en forme du spectre. Ces techniques ont déjà été utilisées dans tous les systèmes du SRNS en service même s'il faudra peut-être apporter des améliorations dans l'avenir à certains de ces systèmes.

Des problèmes de brouillage dus aux bandes latérales étendues du spectre étalé ou à d'autres rayonnements non désirés émis par des satellites pourraient se poser par suite de l'attribution au service mobile par satellite pour des émissions espace-Terre des bandes 137-138 MHz, 387-390 MHz et 400,15-401 MHz. Les bandes attribuées à la radioastronomie sont dans ce cas 150,05-153 MHz, 322-328,6 MHz, 406,1-410 MHz et éventuellement 608-614 MHz. Les bandes de radioastronomie en question comptent parmi celles qui sont utilisées pour l'observation des émissions, fortement décalées vers le rouge, de la raie de l'hydrogène neutre, émissions qui permettent l'étude des parties les plus distantes de l'univers. Les bandes attribuées à la radioastronomie au-dessous de 1 400 MHz constituent un champ d'exploration exceptionnel, de la plus haute importance scientifique, que ne peuvent pas remplacer des observations dans d'autres bandes de fréquences.

5.2 Modulation de phase des signaux numériques

La transmission de données numériques à l'aide de la modulation par inversion de phase (MDP-2) ou par quadrature de phase (MDP-4) donne des spectres de la même forme en sinus carré que le spectre avec étalement en séquence directe. Dans ce cas, T dans l'équation (3) représente une fois la période binaire si la MDP-2 est utilisée et deux fois dans le cas de l'utilisation de la MDP-4. Pour des débits de données élevés, les bandes latérales peuvent être aussi gênantes que dans le cas d'étalement du spectre et il est possible d'appliquer les mêmes solutions, à savoir le filtrage ou l'affaiblissement des bandes latérales dans le processus de modulation.

Par exemple, un problème potentiel pour la radioastronomie est posé par l'attribution de la bande 1 452-1 492 MHz à la radiodiffusion audionumérique, pour les systèmes de Terre et les systèmes à satellites. Les bandes latérales de ces émissions situées dans la bande 1 400-1 427 MHz attribuée à la radioastronomie pourraient, si elles ne sont pas suffisamment affaiblies, dépasser le seuil de brouillage défini pour la radioastronomie. Il existe un système adopté de modulation dénommé «multiplexage par répartition en fréquence orthogonale codée» (MRFOC) comportant 1 536 porteuses individuelles à modulation MDP-4, et dont le spectre de puissance a la forme décrite dans l'équation (3), avec $T = 1,25$ ms. Chacune des porteuses est modulée numériquement en bande étroite. L'espacement des porteuses est de 1 kHz. Le spectre composite résultant est plat sur une bande de 1,54 MHz, puis s'atténue abruptement d'environ 45 dB en bordure de bande. Le niveau de la bande latérale extrême diminue approximativement en fonction de l'inverse du carré de la fréquence f^{-2} , mesurée à partir du centre de la bande composite. Un filtrage additionnel peut être nécessaire si l'on veut éviter que la densité de puissance surfacique globale non désirée en bande étroite ne dépasse le seuil de brouillage fixé pour la radioastronomie. Un tel filtrage ne pose aucun problème de fonctionnement au système MRFOC, qui est spécifiquement conçu pour tolérer des filtrages additionnels. Au cas où une autre forme de modulation serait utilisée pour la radiodiffusion audionumérique dans cette bande, il pourrait y avoir un problème de brouillage qu'il conviendrait de régler par le biais d'une coordination entre la radiodiffusion audionumérique de Terre et le service de radioastronomie.

6 Rayonnements non essentiels et émissions hors bande provenant d'émetteurs de Terre

Les rayonnements non essentiels et les émissions hors bande provenant d'émetteurs de Terre sont moins gênants pour la radioastronomie que les rayonnements émis par des satellites ou des aéronefs, étant donné que les observatoires de radioastronomie sont généralement situés dans des endroits très reculés, choisis pour tirer parti de l'effet d'écran. Toutefois, à titre d'exemple, les émissions en liaison montante provenant de stations de Terre dans la bande 1 610-1 626,5 MHz pourraient entrer en conflit avec l'utilisation par la radioastronomie de la bande 1 610,6-1 613,8 MHz. Comme le service de radioastronomie a une attribution à titre primaire dans la bande 1 610,6-1 613,8 MHz, qui est également protégée, dans le cadre des renvois 5.364 et 5.372

du RR, contre les rayonnements non désirés du SMS exploité dans la bande 1 610-1 626,5 MHz, la coordination est nécessaire. Les liaisons montantes de certains systèmes pourront utiliser la technique DSSS, et, sans coordination, il est possible que leurs bandes latérales soient source de brouillage, même lorsque le lobe central utile du spectre émis se situe à l'extérieur de la bande attribuée à la radioastronomie.
