

# UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

## Recommandation UIT-R RA.1513-2 (03/2015)

**Niveaux de perte de données pour les observations de radioastronomie et critères de pourcentage de temps découlant des dégradations générées par les brouillages, dans le cas des bandes de fréquences attribuées à titre primaire au service de radioastronomie**

**Série RA  
Radio astronomie**



## 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 oeuvre 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
<b>BO</b>	Diffusion par satellite
<b>BR</b>	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
<b>BS</b>	Service de radiodiffusion sonore
<b>BT</b>	Service de radiodiffusion télévisuelle
<b>F</b>	Service fixe
<b>M</b>	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
<b>P</b>	Propagation des ondes radioélectriques
<b>RA</b>	<b>Radio astronomie</b>
<b>RS</b>	Systèmes de télédétection
<b>S</b>	Service fixe par satellite
<b>SA</b>	Applications spatiales et météorologie
<b>SF</b>	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
<b>SM</b>	Gestion du spectre
<b>SNG</b>	Reportage d'actualités par satellite
<b>TF</b>	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
<b>V</b>	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.1513-2\*

**Niveaux de perte de données pour les observations de radioastronomie et critères de pourcentage de temps découlant des dégradations générées par les brouillages, dans le cas des bandes de fréquences attribuées à titre primaire au service de radioastronomie**

(2001-2003-2015)

**Domaine d'application**

La présente Recommandation traite des niveaux de perte de données pour les observations de radioastronomie et des critères de pourcentage de temps découlant des dégradations générées par les brouillages, dans le cas des bandes de fréquences attribuées à titre primaire au service de radioastronomie (voir le titre ci-dessus). Elle comporte des études sur les situations de partage de fréquences pour les applications de Terre et les applications spatiales, ainsi qu'une longue section consacrée à la mesure de la perte de données due à des brouillages par impulsions de faible puissance.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant,*

- a)* que la recherche en radioastronomie dépend de façon critique de la capacité d'observer aux limites extrêmes de sensibilité et/ou de précision et que l'utilisation croissante du spectre radioélectrique accroît le risque de brouillages préjudiciables causés au service de radioastronomie (SRA);
- b)* que, pour certaines observations de radioastronomie, telles que celles liées au passage d'une comète, à une occultation par la lune, ou à l'explosion d'une supernova, une probabilité élevée de succès est souhaitable, du fait de la répétitivité difficile, voire impossible, de ces phénomènes;
- c)* que, puisque les brouillages causés au SRA peuvent avoir pour origine des rayonnements non désirés émanant de services qui fonctionnent dans des bandes de fréquences adjacentes, proches, ou en relation harmonique, une seule bande de fréquences attribuée au SRA peut subir des brouillages causés par plusieurs services ou systèmes;
- d)* que le partage des contraintes pourrait s'avérer nécessaire pour faciliter l'utilisation efficace du spectre radioélectrique;
- e)* que les techniques d'atténuation des brouillages font partie du partage des contraintes, et que des techniques plus novatrices sont en cours d'élaboration pour des applications futures, afin de permettre une utilisation plus efficace du spectre radioélectrique;
- f)* que des niveaux de seuil de brouillages (en supposant un gain d'antenne de 0 dBi) préjudiciables au SRA pour des temps d'intégration de 2 000 s sont spécifiés dans la Recommandation UIT-R RA.769, mais qu'aucun pourcentage de temps acceptable n'a été défini pour des brouillages causés par des services dont les émissions sont réparties dans le temps de façon aléatoire, et qui partagent une bande de fréquences avec le SRA ou génèrent des rayonnements non désirés dans une bande de fréquences de la radioastronomie;

---

\* 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.

g) que les administrations pourraient avoir besoin de critères d'évaluation des brouillages entre le SRA et d'autres services fonctionnant dans des bandes de fréquences partagées, adjacentes, proches, ou en relation harmonique;

h) que des méthodes (par exemple celle de Monte Carlo) ont été élaborées pour déterminer la distance de séparation appropriée entre sites de radioastronomie et groupes de stations terriennes mobiles, et que ces méthodes nécessitent la spécification d'un pourcentage de temps acceptable durant lequel la puissance brouilleuse cumulative dépasse les niveaux de seuil préjudiciables au SRA;

i) que des études de scénarios de partage de bandes ainsi que l'expérience issue d'une longue pratique ont permis de déterminer des valeurs acceptables de perte de temps due à la dégradation de la sensibilité, à des échelles de temps d'une observation unique, comme on le verra plus en détail dans l'Annexe 1,

*recommande*

**1** que, pour l'estimation des brouillages, un critère de 5% soit utilisé pour la perte globale de données du SRA, due aux brouillages causés par l'ensemble des réseaux, dans l'une quelconque des bandes de fréquences attribuées à titre primaire au SRA, sachant que des études complémentaires de la répartition des brouillages entre différents réseaux sont nécessaires;

**2** que, pour l'estimation des brouillages, un critère de 2% soit utilisé pour la perte de données du SRA, due aux brouillages causés par un réseau quelconque, dans toute bande de fréquences attribuée à titre primaire au SRA;

**3** que le pourcentage de perte de données, dans les bandes de fréquences attribuées à titre primaire au SRA, soit déterminé à l'aide d'une des méthodes suivantes, selon le cas: 1) conformément à la Recommandation UIT-R S.1586; 2) conformément à la Recommandation UIT-R M.1583; ou 3) comme le pourcentage des périodes d'intégration de 2000 s durant lesquelles la valeur moyenne de la densité spectrale de puissance surfacique détectée au niveau du radiotélescope est supérieure aux valeurs définies (en supposant un gain d'antenne de 0 dBi) dans la Recommandation UIT-R RA.769;

**4** que les critères exposés dans le § 3.3.2 de l'Annexe 1 soient utilisés pour évaluer, dans toute bande attribuée à titre primaire au SRA, le brouillage causé aux sites de radioastronomie par des rayonnements non désirés produits par tout système à satellites non OSG.

## Annexe 1

### Pertes de données dues au brouillage

	<i>Page</i>
1 Introduction .....	3
2 Perte de données et occultation du ciel.....	5
3 Situations de partage de fréquences.....	6
3.1 Brouillages générés par la variabilité des conditions de propagation.....	7
3.1.1 Applications de Terre.....	7
3.1.2 Applications spatiales.....	7

3.2	Partage de bande de fréquences, pour une propagation variable dans le temps et de trajet instable .....	7
3.2.1	Applications de Terre .....	7
3.2.2	Applications spatiales.....	7
3.2.3	Applications de radioastronomie s'effectuant dans l'espace .....	8
3.3	Rayonnements non désirés dans une bande de fréquences attribuée à la radioastronomie, dans le cas d'une transmission variable dans le temps et/ou par sa direction d'incidence.....	8
3.3.1	Applications de Terre.....	8
3.3.2	Applications spatiales.....	8
3.4	Mesure de la perte de données due à des brouillages par impulsions de faible puissance.....	10
3.4.1	Méthode.....	11
3.4.2	Incidences d'impulsions régulières.....	13
3.4.3	Impulsions à période longue .....	13
3.4.4	Méthodes d'atténuation des brouillages .....	13
3.4.5	Equivalence entre impulsions rapides et émissions continues.....	14
3.4.6	Résumé.....	14
4	Conclusions .....	15

## 1 Introduction

Le pourcentage de temps perdu à cause des brouillages constitue un paramètre important de tout service de radiocommunication. Les administrations peuvent avoir besoin de critères quantitatifs relatifs aux opérations de radioastronomie dont les services actifs fonctionnent dans des bandes de fréquences identiques, adjacentes, proches, ou en relation harmonique. Ainsi, la Recommandation UIT-R M.1316 utilise ce pourcentage de temps perdu dans le calcul, par la méthode de Monte Carlo, de la distance de séparation par défaut entre les stations du SMS (Terre vers espace) et un observatoire de radioastronomie.

Le Tableau 1 présente à titre de comparaison les valeurs limites de pertes de temps globales tolérées par un certain nombre d'autres services «scientifiques».

TABLEAU 1

**Exemple de critères de pourcentage de temps global de perte  
de données utilisés pour d'autres services scientifiques**

Service d'exploration de la Terre par satellite (détecteurs passifs) (%) (Recommandation UIT-R SA.1029-2) – Explorations atmosphériques en 3-D – Tous les autres détecteurs passifs	0,01 1,0-5,0
Systèmes de télécommande et de transmission de données fonctionnant dans les services d'exploration de la terre par satellite et de météorologie par satellite (%) (Recommandation UIT-R SA.514-3)	0,1-1,0
Services d'exploration de la Terre par satellite et des auxiliaires de la météorologie utilisant des engins spatiaux sur l'orbite des satellites géostationnaires (%) (Recommandation UIT-R SA.1161-1)	0,0025-0,1
Systèmes d'exploitation spatiale $S/N > 20$ dB pendant plus de 99% du temps (%) (Recommandation UIT-R SA.363-5)	1,0

Les radiotélescopes sont conçus pour être exploités en continu, suivant une grille de programmes d'observation établie par les astronomes. En principe, l'accès au radiotélescope se fait de manière concurrentielle, les propositions de recherche dépassant souvent d'un facteur 2 à 3 le temps disponible pour les observations télescopiques. Les sites de radioastronomie sont quasiment tous exploités par le biais de fonds publics, et doivent donc être gérés de manière très efficace. On ne peut toutefois pas éviter la perte de temps d'observation due aux travaux de maintenance ou de remise à niveau du matériel ou des logiciels. L'expérience acquise par une administration lors de l'exploitation d'instruments de premier plan pendant de longues années montre que ces pertes ne doivent pas nécessairement dépasser 5% du temps d'observation, ce qui représente par exemple une journée de 8 h par semaine. Des considérations d'efficacité globale et de coût d'exploitation suggèrent que la perte de temps globale à ajouter du fait des brouillages devrait elle aussi être limitée à 5%.

Pour obtenir les chiffres indiqués par le Tableau 1, chaque service devrait concevoir ses systèmes et maîtriser ses opérations de façon à ne pas dépasser une fraction donnée de ces chiffres. La prudence impose que les différents systèmes ne puissent dépasser une fraction du bilan de brouillage, selon des facteurs liés à l'état effectif des attributions des bandes de fréquences, tels que le partage de bandes et la probabilité de brouillages dus à des rayonnements non désirés provenant d'autres services.

Notons qu'à l'heure actuelle, le concept de perte globale de données n'est pas pleinement mature. Des outils de simulation, tels que celui décrit dans la Recommandation UIT-R M.1316, permettent d'analyser le cas de brouillages émanant d'un seul système. D'autres méthodes pour étudier des systèmes uniques sont actuellement en cours d'élaboration. Il n'existe pas pour l'instant d'outil similaire permettant d'analyser la perte globale de données provoquée par la conjonction de plusieurs systèmes. Une telle méthode qui tiendrait compte des caractéristiques de plusieurs systèmes pourrait s'avérer difficile à mettre au point. Répartir l'origine de ces pertes globales entre les différents systèmes est une difficulté de taille. D'où la nécessité d'étudier plus avant ces problèmes.

L'apparition de services de radiocommunication faisant appel à des stations spatiales et à des stations placées sur des plates-formes à haute altitude exige le réexamen des mesures visant à protéger le SRA contre les brouillages. Le partage de fréquences avec de tels services est en



principe impossible, mais ces services, qui opèrent dans des bandes de fréquences proches de celles attribuées au SRA, risquent de perturber celui-ci de deux manières:

- a) par des rayonnements non désirés dans des bandes de fréquences attribuées au SRA;
- b) par des effets d'intermodulation et de non-linéarité affectant les systèmes de radiotélescope en raison de la présence de signaux de forte intensité dans les bandes adjacentes.

On suppose bien sûr que les opérateurs de satellite utiliseront tous les moyens possibles pour minimiser les rayonnements non désirés, et que les radioastronomes chercheront eux aussi à minimiser autant que possible la sensibilité de leur système radio vis-à-vis des signaux qui occupent des bandes adjacentes aux leurs ou proches. Le point b) devra toutefois être très attentivement observé lors de l'exploitation de systèmes dans des bandes de fréquences adjacentes ou proches de celles attribuées au SRA.

## 2 Perte de données et occultation du ciel

Lorsque l'on évoque les pertes de données dans la présente Recommandation, il s'agit des données à éliminer du fait de leur brouillage par une ou plusieurs sources dans des proportions supérieures aux valeurs définies par la Recommandation UIT-R RA.769, sous réserve du respect des hypothèses contenues dans cette Recommandation. Le terme occultation est utilisé ici pour indiquer les directions de pointage d'antenne pour lesquelles le niveau de brouillage subi dépasse celui autorisé par la Recommandation UIT-R RA.769. En présence de tels brouillages, il devient généralement impossible d'extraire les données utiles à une recherche qui sonde les limites de la connaissance. Les pertes de données peuvent trouver leur origine dans la perte d'une partie de la bande spectrale consacrée à l'observation, dans la perte d'une partie du temps d'observation, ou dans l'occultation d'une partie du ciel. La perte du temps effectif d'observation est le terme qui exprime toutes ces contributions.

Il est dit dans la Recommandation UIT-R RA.1031 que de nombreuses mesures de radioastronomie peuvent tolérer, de la part d'un service partageant leur bande de fréquences, des niveaux de brouillage qui dépassent les seuils indiqués dans la Recommandation UIT-R RA.769 pendant 2% du temps. Notons que de telles observations, qui supportent des erreurs de mesure accrues, peuvent par exemple concerner des lots entiers de mesures radioélectriques d'éruptions solaires. En radioastronomie, une observation revêt une signification particulière lorsqu'elle permet d'accéder à un nouveau savoir en matière de phénomènes astronomiques. Il s'agit alors, soit de l'observation d'objets n'ayant encore jamais été étudiés auparavant, soit de l'observation avec une précision accrue d'objets connus. Dans un cas comme dans l'autre, on doit pouvoir faire des observations à la sensibilité maximale. La radioastronomie étant plus mature, les données dont la précision est entachée par des brouillages voient leur utilité diminuer, à telle enseigne que la pratique courante des astronomes est d'éliminer les données pour lesquelles la présence de brouillage est patente. Ainsi, la pratique montre que toute donnée pour laquelle on peut établir qu'elle a été brouillée est systématiquement rejetée.

La Recommandation UIT-R SA.509 définit le diagramme d'antennes à grande ouverture entre 2 GHz et environ 30 GHz, dont le contour à 0 dBi possède un rayon de 19°. Lorsqu'un radiotélescope pointe à moins de 19° d'un émetteur, l'émission dans une bande de fréquences attribuée à la radioastronomie au seuil préjudiciable établi par la Recommandation UIT-R RA.769 entraîne l'apparition de brouillages. Cela occulte l'observation radioastronomique d'une portion du ciel de 19° de rayon angulaire. On appelle alors occultation fractionnelle du ciel le rapport entre l'occultation du ciel (au-dessus de l'horizon) définie plus haut et l'angle solide de l'hémisphère visible.

La Fig. 1 montre les effets d'un émetteur fictif à l'horizon, à l'origine de l'axe azimutal, remplissant à l'emplacement de la station de radioastronomie les conditions de densité spectrale de puissance

surfacique définies dans la Recommandation UIT-R RA.769. Les contours de la figure indiquent, en fonction de l'angle de pointage de l'antenne de radioastronomie, le niveau (dB) pour lequel la puissance reçue de l'émetteur est supérieure à la valeur préjudiciable aux mesures radioastronomiques. L'onde reçue génère des brouillages préjudiciables lorsqu'elle atteint avec un gain supérieur à 0 dBi les lobes secondaires de l'antenne de radioastronomie. Le Tableau 2 présente, pour une antenne pointant à plus de 5° d'élévation, le pourcentage du ciel occulté par ces brouillages. L'angle d'élévation le plus faible envisagé ici est de 5°, les antennes de radioastronomie pointant rarement en deçà de cette valeur. Dans le cas d'une source brouilleuse pointant à plus de 19° d'élévation (cas d'un émetteur aéroporté ou spatial), pour laquelle la densité spectrale de puissance atteignant une station de radioastronomie satisfait au seuil limite énoncé dans la Recommandation UIT-R RA.769, une zone circulaire du ciel, avec un rayon de 19° centré sur la source brouilleuse, est occultée et n'est plus observable en radioastronomie au niveau utile de sensibilité. Cette zone sous-tend un angle solide de 0,344 sr, et occupe ainsi 5,5% des  $2\pi$  sr du ciel par-delà l'horizon.

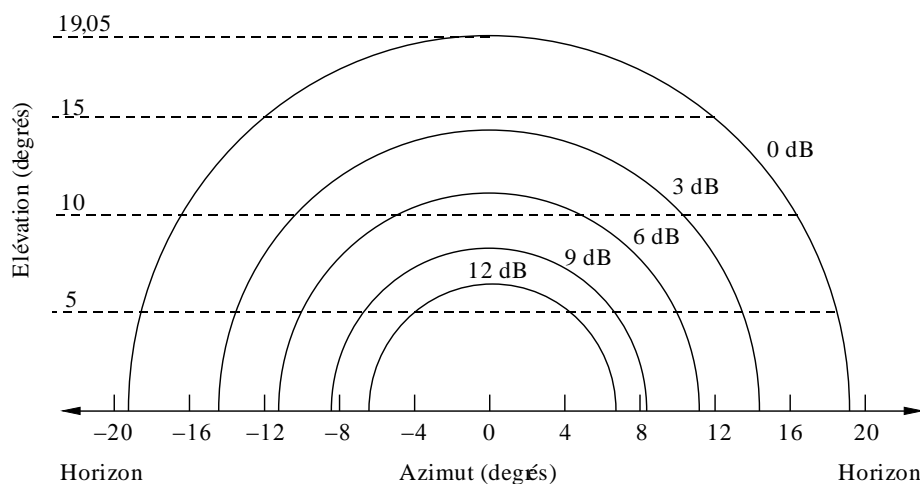
L'application à un environnement non stationnaire (systèmes non OSG ou mobiles par exemple) du concept d'occultation du ciel exige des études complémentaires.

### 3 Situations de partage de fréquences

Il est utile pour évaluer les brouillages d'opérer un distinguo entre les transmissions d'origine terrestre, particulièrement en l'absence de trajet à visibilité directe, et les transmissions émanant des plates-formes aéroportées de haute altitude et des émetteurs embarqués sur satellite situés en visibilité directe des radiotélescopes brouillés. Pour ce qui est du pourcentage de temps d'observation perdu, il faut là aussi établir une distinction entre les brouillages générés par des émetteurs lointains en raison de conditions de propagation variables (c'est-à-dire, non maîtrisables par l'homme) et les brouillages de services actifs pour lesquels l'émission est effectivement aléatoire eu égard au niveau de puissance et à l'angle d'incidence sur le radiotélescope (voir le § 3.1).

FIGURE 1

Effet d'une source brouilleuse de niveau préjudiciable au SRA, placée à l'horizon, au zéro azimutal



RA.1513-01

Les courbes indiquent, pour différents angles de pointage de l'antenne de radioastronomie, le niveau de décibels par lequel les brouillages atteignant le récepteur de radioastronomie dépassent le seuil critique. Notons que les observations de radioastronomie sont généralement effectuées à des angles d'élévation de plus de 5°.



TABLEAU 2

**Pourcentage du ciel dans lequel toute observation est interdite en raison de brouillages dépassant le seuil préjudiciable, en fonction de l'angle d'élévation du radiotélescope, dans le cas de la source brouilleuse décrite sur la Fig. 1**

Angle d'élévation minimal (degrés)	Ciel occulté (%)
5	2,0
10	1,3
15	0,6
20	0

### 3.1 Brouillages générés par la variabilité des conditions de propagation

#### 3.1.1 Applications de Terre

Lorsque l'intensité d'un signal brouilleur varie du fait de conditions de propagation variables dans le temps, un pourcentage de temps doit être spécifié pour les calculs de propagation. La Recommandation UIT-R RA.1031 propose le chiffre de 2%, ce qui ne signifie pas pour autant qu'une perte de données de 2% entache automatiquement les observations de radioastronomie. Les conditions de propagation varient de façon épisodique, typiquement sur des périodes de quelques jours. Il est donc intéressant de remarquer que, sur des périodes données de plusieurs semaines, la durée pendant laquelle des données sont à rejeter pour cause de brouillages peut se limiter à quelques jours. Ces phénomènes surviennent principalement aux grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire pour des fréquences inférieures à environ 1 GHz. L'occurrence de pertes de données peut être réduite par une redéfinition dynamique du programme d'observations radioastronomiques, pour profiter au mieux des périodes les plus favorables.

#### 3.1.2 Applications spatiales

En visibilité directe, il est inutile de tenir compte de conditions de propagation troposphérique variables dans le temps.

### 3.2 Partage de bande de fréquences, pour une propagation variable dans le temps et de trajet instable

#### 3.2.1 Applications de Terre

Il faut chercher à éviter la perte de temps d'observation induite par les brouillages occasionnés par d'autres utilisateurs du spectre, afin d'utiliser les radiotélescopes avec un maximum d'efficacité. Des pertes minimales semblent toutefois inévitables. Les rayonnements non désirés produits par des stations (terriennes) mobiles du SMS en sont une illustration. En pratique, on peut accepter un niveau de perte de données de 2% pour un tel système. Un exemple de coordination entre le SRA et le SMS (Terre vers espace) est fourni dans la Recommandation UIT-R M.1316. Le pourcentage de temps d'observation perdu y est utilisé pour le calcul de la distance de séparation par défaut entre les stations terriennes mobiles du SMS (Terre vers espace) et la station de radioastronomie, au travers de la méthode de Monte Carlo.

#### 3.2.2 Applications spatiales

Le partage avec des liaisons descendantes par satellite n'est pas possible dans les bandes de fréquences attribuées à titre primaire au SRA.

### 3.2.3 Applications de radioastronomie s'effectuant dans l'espace

Chaque application doit faire l'objet d'un examen particulier approprié.

## 3.3 Rayonnements non désirés dans une bande de fréquences attribuée à la radioastronomie, dans le cas d'une transmission variable dans le temps et/ou par sa direction d'incidence

### 3.3.1 Applications de Terre

Généralement, le temps partagé n'est pas envisagé comme un mode opératoire pouvant être mis en oeuvre entre les applications de Terre et la radioastronomie. Le filtrage au niveau des émetteurs et la séparation géographique sont utilisés pour que les rayonnements non désirés parvenant au radiotélescope dans la bande de fréquences attribuée à la radioastronomie soient de niveau inférieur aux seuils définis par la Recommandation UIT-R RA.769. Il existe un risque de brouillage lorsque le faisceau de radioastronomie pointe à moins de  $19^\circ$  d'une source de Terre (voir la Fig. 1). Les valeurs fournies par la Recommandation UIT-R RA.769 reposent sur l'hypothèse d'une source brouilleuse située sur le contour isotropique. Comme l'indique la Fig. 1, une source de Terre à l'horizon (angle d'élévation de  $0^\circ$ ) peut générer, dans le cas d'un télescope pointant à moins de  $5^\circ$  de l'horizon, des brouillages préjudiciables sur une zone occupant jusqu'à 2% de l'hémisphère visible. D'une manière générale cependant, les radiotélescopes pointent à moins de  $5^\circ$  de l'horizon pendant seulement une partie de leur temps total d'observation. Certaines sources brouilleuses sont connues et peuvent être évitées. Dans la pratique, un système brouilleur générant moins de 2% de perte de données pourrait être toléré. Il faut remarquer aussi que le bruit du système s'accroît lorsque le télescope pointe à des angles d'élévation très faibles, ce qui induit une diminution de la sensibilité. Ces éléments ne sont pas pris en compte par la Recommandation UIT-R RA.769; en effet, le temps passé dans la zone de sensibilité dégradée est très faible, car l'angle d'élévation habituel se situe entre  $5^\circ$  et  $10^\circ$ .

Les effets des rayonnements non désirés d'origine terrestre sur une bande de fréquences attribuée à la radioastronomie pourraient aussi être évalués par la méthode décrite dans la Recommandation UIT-R M.1316.

### 3.3.2 Applications spatiales

La protection de la radioastronomie en présence de satellites OSG fait l'objet de la Recommandation UIT-R RA.769.

L'UIT-R a élaboré deux Recommandations afin de traiter la compatibilité entre les constellations à satellites non OSG et les sites de radioastronomie:

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.

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.

Ces Recommandations UIT-R proposent une méthode pour évaluer le niveau des rayonnements non désirés produits par les constellations à satellites non OSG et certains autres systèmes au niveau des sites de radioastronomie avant leur mise en service. Elles décrivent notamment des méthodes qui permettent d'évaluer la compatibilité entre les sites de radioastronomie et les systèmes à satellites au stade de leur construction et avant leur lancement, conformément aux points 1 et 2 du *décide* de la Résolution **739 (Rév.CMR-07)**.

La première étape de cette approche consiste à diviser le ciel en cellules. Tout d'abord, on choisit au hasard une direction de pointage de l'antenne SRA, qui se situera dans une cellule spécifique du ciel. Ensuite, on choisit au hasard l'heure de départ de la constellation. La valeur *epfd* correspondant à cet essai est ensuite calculée pour la direction de pointage choisie et l'heure de départ choisie de la constellation au moyen de l'équation suivante pour déterminer la valeur *epfd* correspondant à chaque échantillon temporel:

$$epfd_{G_r = 0\text{dBi}} = 10 \log_{10} \left[ \sum_{i=1}^{N_a} 10^{\frac{P_i}{10}} \cdot \frac{G_t(\theta_i)}{4\pi d_i^2} \cdot G_r(\phi_i) \right] \quad (1)$$

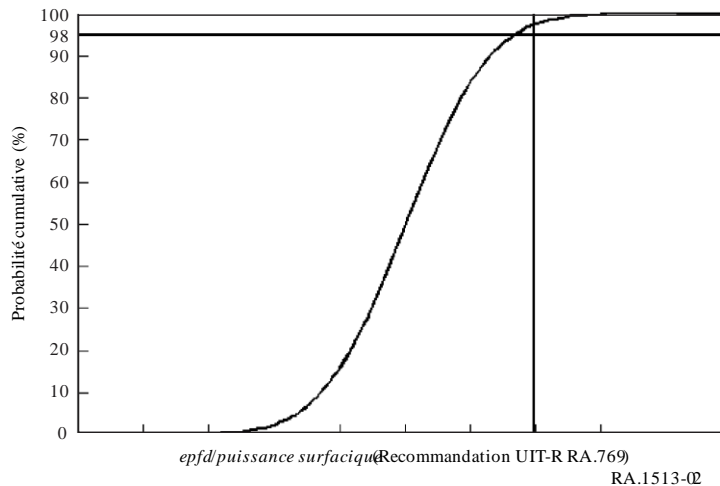
où:

- $N_a$ : nombre de stations spatiales non OSG visibles depuis le radiotélescope
- $i$ : indice de la station spatiale non OSG considérée
- $P_i$ : puissance RF des rayonnements non désirés à l'entrée de l'antenne (ou la puissance RF rayonnée dans le cas d'une antenne active) de la station spatiale d'émission considérée dans le système à satellites non OSG (dBW) dans la largeur de bande de référence
- $\theta_i$ : angle par rapport à l'axe principal entre le point de visée de la station spatiale d'émission considérée dans le système à satellites non OSG et la direction du radiotélescope
- $G_t(\theta_i)$ : gain d'antenne à l'émission (exprimé sous forme de rapport) de la station spatiale considérée dans le système à satellites non OSG dans la direction du radiotélescope
- $d_i$ : distance (m) entre la station d'émission considérée dans le système à satellites non OSG et le radiotélescope
- $\phi_i$ : angle par rapport à l'axe principal entre la direction de pointage du télescope et la direction de la station spatiale d'émission considérée dans le système à satellites non OSG
- $G_r(\phi_i)$ : gain de l'antenne de réception (exprimé sous forme de rapport) du radiotélescope, dans la direction de la station spatiale d'émission considérée dans le système à satellites non OSG.

On détermine, pour chacune de ces cellules, une distribution statistique de l'*epfd*. Ensuite, ces distributions de valeurs *epfd* peuvent être comparées aux niveaux de *pfd* de la Recommandation UIT-R RA.769 (définis en supposant un gain de 0 dBi de l'antenne de réception dans la direction du brouillage et compte tenu d'un temps d'intégration de 2 000 s) de telle sorte que le pourcentage d'essais pendant lesquels ce critère est satisfait peut être déterminé pour chacune des cellules définies.

FIGURE 2

Comparaison entre les niveaux de puissance surfacique mentionnés dans la Recommandation UIT-R RA.769 et la distribution d'epfd donnée pour une cellule



A partir des seuils de puissance surfacique du brouillage préjudiciable à la radioastronomie indiqués dans la Recommandation UIT-R RA.769, on peut calculer les seuils d'epfd compte tenu du gain maximal,  $G_{max}$ , de l'antenne de radioastronomie supposé dans les calculs, au moyen de l'équation suivante:

$$epfd_{threshold} = pfd_{RA.769} - G_{max}$$

Sur l'ensemble du ciel, pour les élévations supérieures à l'angle d'élévation de fonctionnement minimal du télescope, le niveau limite de seuil d'epfd défini ci-dessus ne devrait pas être dépassé pendant plus de 2% du temps.

Cette méthode a initialement été mise au point pour le cas des systèmes à satellites non OSG, mais on peut aussi l'utiliser pour certains systèmes aéroportés, par exemple dans le SMS aéronautique.

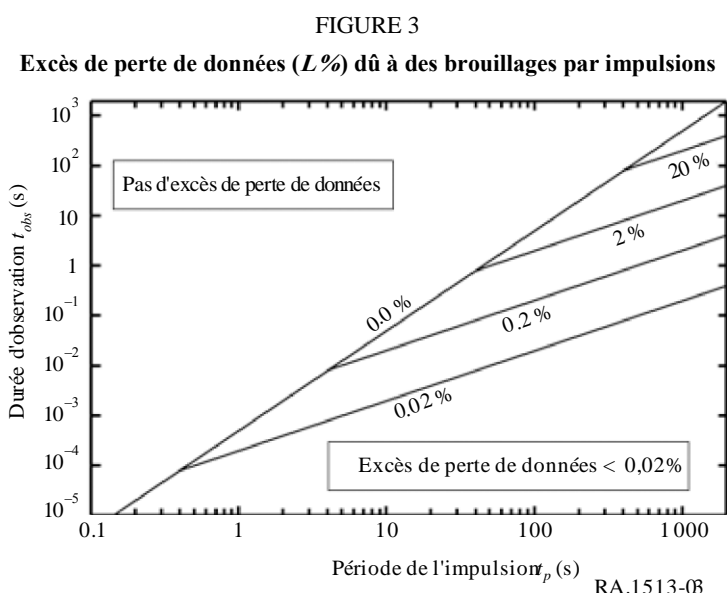
### 3.4 Mesure de la perte de données due à des brouillages par impulsions de faible puissance

La présente section décrit la mesure de l'excès de perte de données dû à des brouillages par impulsions dont le niveau moyen sur une période d'intégration de 2000 s se situe en deçà du seuil de brouillage préjudiciable aux observations de raies spectrales spécifié dans la Recommandation UIT-R RA.769. Il s'agit du cas de brouillage de faible puissance. Les signaux à impulsions et les signaux continus ont des propriétés très différentes du point de vue des brouillages. Des brouillages continus et constants, dont le niveau ne dépasse pas le seuil de brouillage préjudiciable défini dans la Recommandation UIT-R RA.769 pour des périodes d'intégration de 2000 s, n'affecteront pas des observations d'une durée plus courte, étant donné que le rapport brouillage/bruit est plus élevé pour des périodes d'intégration longues. Cela n'est pas toujours le cas pour les signaux qui varient au cours du temps. Sont traitées ci-après les situations dans lesquelles des signaux à impulsions, tout en étant conformes au seuil spécifié pour des périodes d'intégration de 2000 s, entraînent un excès de perte de données pour des observations d'une durée plus courte.

En cas de brouillage périodique, la mesure de l'excès de perte de données dépend de deux échelles de temps, à savoir la période de l'impulsion du signal brouilleur,  $t_p$ , et l'intervalle d'observation,  $t_{obs}$ , sur lequel est calculée la moyenne des données astronomiques afin de produire une mesure. La durée de  $t_{obs}$ , généralement de quelques secondes, est déterminée à partir de critères techniques et scientifiques. Lorsque cette durée est supérieure à 0,8 s, un excès de perte de données supérieur

à 2% est possible, mais uniquement si la période d'impulsion du signal brouilleur est supérieure à 40 s, comme le montrent les calculs ci-après.

Les mesures de la perte de données sont présentées de manière synthétique dans la Fig. 3.



L'excès de perte de données dépend uniquement de la relation entre la période de l'impulsion et la durée de l'observation, comme le montre la Fig. 3. Une observation est considérée comme perdue si elle contient un signal dont la puissance est supérieure à 1/10 du bruit du système, en moyenne pendant la durée de l'observation. On constate que l'excès de perte de données maximal au cours d'une période de 2000 s est inférieur à la durée de la période de l'impulsion. Par conséquent, les signaux radar et autres signaux par impulsions à période courte ne causent pas d'excès de perte de données important.

### 3.4.1 Méthode

Considérons le cas d'impulsions périodiques dont le niveau moyen au cours du temps correspond au seuil préjudiciable en termes de pertes de données défini dans la Recommandation UIT-R RA.769 pour une période de 2000 s. Il est clair que, contrairement à ce qui se passe dans le cas de brouillages constants, des observations qui, par leur nature même, sont d'une durée inférieure à 2000 s (par exemple, les pulsars, qui sont des émetteurs périodiques sur des échelles de temps beaucoup plus courtes que 2000 s) subiront dans certains cas des pertes de données, parce que l'énergie brouilleuse pulsée peut être concentrée sur une ou quelques-unes de ces observations plus courtes.

Par exemple, une impulsion brouilleuse unique qui se produit toutes les 2000 s affectera une observation sur deux lors d'une série d'observations de 1000 s chacune. Le rapport brouillage-bruit ne vaut plus alors 1/10, valeur prescrite dans la Recommandation UIT-R RA.769, mais  $\sqrt{2}/10$  pour une observation et 0 pour l'autre. L'excès de perte de données correspondant est de 50%. (Le facteur  $\sqrt{2}$  vient du fait que les brouillages sont en moyenne deux fois plus élevés lors de l'observation affectée, alors que le bruit quadratique moyen pour cette observation plus courte n'augmente que d'un facteur  $\sqrt{2}$ .) Cet exemple correspond au cas le plus défavorable en termes d'excès de perte de données, comme cela est montré ci-après.

L'excès de perte de données se calcule comme suit:

Soient:

$t_{obs}$	la durée d'observation, en secondes
$t_p$	la période de l'impulsion, en secondes
$N_{obs}$	le nombre d'observations par période de 2 000 s, = 2 000/ $t_{obs}$
$N_p$	le nombre d'impulsions par période de 2 000 s, = 2 000/ $t_p$
$P$	la puissance moyenne des impulsions pendant l'intervalle d'observation $t_{obs}$
$P_{sys}$	la puissance de bruit moyenne du système non perturbé sur une période de 2 000 s
$L$	l'excès de perte de données, en secondes, et
$L\%$	le pourcentage d'excès de perte de données.

L'énergie produite par le train d'impulsions devrait être inférieure à 1/10 de l'énergie du système non perturbé (voir la Recommandation UIT-R RA.769), soit:

$$N_p P t_{obs} \leq (2000 P_{sys})/10 \quad (2)$$

Paramétrons  $P$  comme suit:

$$P = (a P_{sys}/10) \sqrt{(2000/t_{obs})} \quad (3)$$

de sorte que la puissance moyenne des impulsions est égale à un facteur près au seuil de brouillage préjudiciable pendant l'intervalle de temps  $t_{obs}$ .

On déduit des équations (2) et (3) une borne supérieure pour le nombre d'impulsions régulières au cours d'une période de 2 000 s:

$$N_{p,max} = (1/a) \sqrt{(2000/t_{obs})} \quad (4)$$

et la période de l'impulsion minimale admissible correspondante:

$$t_{p,min} = a \sqrt{(2000 t_{obs})} \quad (5)$$

Par conséquent, la période de l'impulsion brouilleuse doit être supérieure à la moyenne géométrique de la durée d'observation et de 2 000 s pour causer un excès de perte de données lors d'observations plus courtes, tout en respectant la limite de brouillage préjudiciable pour une période de 2 000 s définie dans la Recommandation UIT-R RA.769, qui correspond au cas  $a = 1$ . Par exemple, dans le cas où  $t_{obs} = 20$  s, le nombre d'observations au cours d'une période de 2 000 s est exactement égal à 100, et si l'on applique (5), on obtient  $t_{p,min} = 200$  s. Etant donné que  $t_{p,min}$  est la plus longue période qui satisfasse le critère  $a = 1$ , un nombre d'impulsions inférieur à 10 peut entraîner une perte de données, qui concernera au plus neuf des 100 observations d'une durée de 20 s.

La perte de données est alors:

$$L = N_p t_{obs} \quad \text{en secondes,} \quad (6)$$

et le pourcentage de perte de données est:

$$L\% = 100 L/2000 \quad (7)$$

Des équations (5) et (6), on déduit:

$$L(\text{limite sup.}) = t_{p,min} \text{ en secondes, et} \quad (8)$$

$$L\%(\text{limite sup.}) = 100 (t_{p,min}/2000) \quad (9)$$

D'après ce qui précède, il est clair que des signaux par impulsions à période courte ( $t_p < 40$  s) ne peuvent pas causer d'excès de perte de données supérieur à la limite de 2%.

La relation entre  $t_{obs}$ ,  $t_p$  et  $L\%$  est présentée dans la Fig. 3, ci-dessus, pour des excès de perte de données de 0%, 0,02%, 0,2%, 2% et 20%.

### 3.4.2 Incidences d'impulsions régulières

Les impulsions brouilleuses périodiques de puissance constante représentent le cas le plus défavorable en termes d'excès de perte de données. Des impulsions espacées de manière irrégulière dans le temps ou de puissance variable causeront au pire le même niveau de perte de données, à condition, une fois encore, qu'elles respectent le critère  $a = 1$ , c'est-à-dire que leur puissance moyenne n'excède pas le seuil de brouillage préjudiciable pour une période de 2 000 s. Dans certains cas, plusieurs impulsions brouilleuses peuvent se produire au cours d'une seule observation, ce qui, toutefois, n'augmente pas le nombre d'observations perdues, puisqu'une seule impulsion suffit pour entraîner la perte d'une observation.

D'une manière analogue, des impulsions brouilleuses de puissance variable peuvent faire diminuer le nombre d'observations perdues. Cette situation a lieu lorsque la puissance de certaines impulsions est suffisamment inférieure à la moyenne pour rester au-dessous du seuil de brouillage préjudiciable. Aucun de ces deux cas ne peut donc être plus dommageable que les impulsions périodiques de puissance constante.

### 3.4.3 Impulsions à période longue

Les seules impulsions brouilleuses qui entraînent un excès de perte de données important sont celles qui ont une période très longue, dont la durée se compte en dizaines, voire en centaines de secondes. Ces trains d'impulsions font rarement l'objet d'une utilisation commerciale, même si les applications de type «appuyer pour parler» peuvent produire des émissions irrégulièrement espacées à un rythme similaire.

Afin de comprendre pourquoi seules les impulsions à période longue peuvent occasionner des pertes de données importantes, considérons l'exemple suivant. D'après l'équation (5), pour qu'une impulsion cause un excès de perte de données, sa période doit être supérieure à la moyenne géométrique de la durée d'observation et de 2 000 s. Il y a par exemple 100 intégrations de 20 s dans 2 000 s. Par conséquent, une impulsion unique peut avoir une puissance moyenne sur 20 secondes 100 fois supérieure au seuil de brouillage préjudiciable pour une période de 2 000 s tout en conservant une puissance moyenne égale à ce seuil et en causant un excès de perte de données de 1%. Cet excès de puissance peut être réduit d'un facteur  $\sqrt{100}=10$  et réparti sur au plus 10 impulsions avant de passer sous le niveau préjudiciable de 20 s, ce qui correspond à une période minimale de 200 s.

### 3.4.4 Méthodes d'atténuation des brouillages

Lorsque des brouillages sont facilement détectables dans une antenne isotrope pour des intervalles d'intégration d'une seconde ou plus, on peut déjà en conclure que la puissance moyenne sur 2 000 s sera supérieure au seuil de brouillage préjudiciable, comme le montre l'analyse suivante.

Pour des signaux qui se situent au niveau ou au-dessous du seuil de brouillage préjudiciable ( $a \leq 1$ ), la puissance maximale d'impulsion qui cause une perte de données de 2% correspond à une impulsion unique toutes les 2 000 s à 1,5 dB au-dessous du bruit moyen sur 40 s. Cette impulsion affectera une intégration de 40 secondes sur 50, soit une perte de 2%. Le bruit moyen sur 40 s est  $\sqrt{50}$  (8,5 dB) fois supérieur au bruit sur 2 000 s, alors que la puissance de l'impulsion peut-être 50 fois (17 dB) supérieure à ce niveau. La différence est de 8,5 dB, ce qui reste  $\sqrt{2}$  fois plus faible que le bruit moyen sur 40 s, et ne sera donc pas détectable lors d'observations normales.



Seules de très courtes observations (de l'ordre de la milliseconde) peuvent permettre une détection significative des impulsions, cinq sigmas ou plus au-dessus du bruit.

Dans tous les cas, la détection des brouillages par impulsions nécessitera un gain d'antenne dans la direction des brouillages bien plus élevé que celui d'une antenne isotrope, ou, dans le cas d'impulsions très courtes, une résolution temporelle élevée. Il en résulte que si des brouillages sont visibles dans une antenne isotrope pour une intégration de quelques secondes, il est certain que leur niveau moyen sur une période de 2 000 s dépassera le seuil de brouillage préjudiciable, même si aucun brouillage supplémentaire n'intervient.

Dans la présente section, on suppose qu'aucune tentative n'a été faite pour essayer de synchroniser l'acquisition des données avec la période de l'impulsion. Cependant, dans le cas où l'on adopte cette approche, les signaux par impulsions régulières offrent une excellente méthode d'atténuation des brouillages. On sait en effet, grâce aux travaux sur la détection des pulsars, qu'une amélioration du rapport brouillage/bruit proportionnelle à la racine carrée du rapport de la durée à la période de l'impulsion, soit typiquement 10 dB à 20 dB pour les impulsions radar, est possible.

### 3.4.5 Equivalence entre impulsions rapides et émissions continues

Les impulsions rapides, telles que les impulsions radar, peuvent se traiter comme des brouillages continus dont le niveau correspond à la puissance moyenne de l'impulsion. En particulier, des brouillages par impulsions qui dépassent le seuil fixé dans la Recommandation UIT-R RA.769 pour une intégration de 2 000 s, peuvent se situer au-dessous du seuil de brouillage préjudiciable calculé pour une intégration plus courte. Considérons, par exemple, un signal par impulsions d'une période de 20 s dont le niveau se situe 15 dB au-dessous du bruit pour chaque intégration de 20 s. Le bruit après 2 000 s sera 10 fois plus faible. Par conséquent, ce signal, qui est sans incidences pour chaque intégration de 20 s, se situera 5 dB au-dessus du niveau préjudiciable après 2 000 s.

En d'autres termes, le signal par impulsions se comporte exactement de la même manière qu'un signal continu. Seules des impulsions dont la période est supérieure à la moyenne géométrique du temps d'intégration et de 2 000 s peuvent entraîner un excès de perte de données lors d'intégrations plus courtes sans pour autant dépasser le seuil de brouillage préjudiciable pour une période d'intégration de 2 000 s fixé dans la Recommandation UIT-R RA.769. Il s'agit d'un cas peu fréquent en pratique.

### 3.4.6 Résumé

Les calculs précédents, sous l'hypothèse que les brouillages par impulsions n'excèdent pas le seuil de brouillage préjudiciable défini dans la Recommandation UIT-R RA.769 pour une période de 2 000 s, permettent de tirer les conclusions suivantes:

- 1) Les rayonnements radar et autres rayonnements par impulsions dont la période est inférieure à 40 s et dont le niveau moyen sur une période de 2 000 s correspond au seuil de brouillage préjudiciable défini dans la Recommandation ITU-R RA.769 ne causeront pas d'excès de perte de données supérieur à 2%.
- 2) Dans le cas de mesures pour lesquelles la durée d'observation est de 40 s, la puissance d'impulsion qui représente le cas le plus défavorable en termes d'excès de perte de données est 1,5 dB au-dessous du bruit du système, mais seulement pour des impulsions extrêmement peu fréquentes (1 sur 2 000), et en l'absence de toute tentative d'atténuer les brouillages en synchronisant l'acquisition des données en anti-corrélation avec des impulsions régulières.
- 3) Des brouillages aperiodiques et/ou de niveau variable causeront au pire le même niveau de perte de données que des impulsions périodiques de puissance constante.

#### 4 Conclusions

Ainsi, 5% du temps de toutes les sources brouilleuses constituent un critère pratique permettant de caractériser la perte globale de données par brouillage du SRA. La superposition de plusieurs sources brouilleuses est un facteur dont il faut tenir compte dans la pratique. Il est nécessaire d'étudier plus avant la répartition de l'origine du brouillage total entre les différents réseaux sources.

La perte de données occasionnée par l'un quelconque des systèmes brouilleurs devrait être fortement inférieure à 5%. Satisfaire cette exigence signifie, dans la pratique, que chaque système brouilleur doit respecter une limite de 2%.

---