

RECOMMANDATION UIT-R RA.1513-1

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

(Question UIT-R 227/7)

(2001-2003)

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 inconvénients pourrait s'avérer nécessaire pour faciliter l'utilisation efficace du spectre radioélectrique;
- e) que des techniques de réduction des brouillages pourraient être utilisées 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 2000 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;
- 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) sont actuellement en cours d'élaboration pour déterminer la distance de séparation appropriée entre sites de radioastronomie et groupes de stations terrestres 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;

j) 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 défini comme le pourcentage des périodes d'intégration de 2000 s durant lesquelles la valeur moyenne de la densité spectrale de puissance surfacique détectée par le radiotélescope est supérieure aux valeurs définies (en supposant un gain d'antenne de 0 dBi) dans la Recommandation UIT-R RA.769. L'effet des brouillages périodiques sur des échelles de temps ne dépassant pas les quelques secondes (cas des impulsions radar) nécessite des études complémentaires;

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

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)	
– Explorations atmosphériques en 3-D	0,01
– Tous les autres détecteurs passifs	1,0-5,0
Service d'exploration de la Terre par satellite, engins spatiaux au voisinage de la Terre (%) (Recommandation UIT-R SA.514)	0,1
Service de météorologie par satellite (%) (Recommandation UIT-R SA.1161)	0,1
Systèmes d'exploitation spatiale $S/N > 20$ dB pendant plus de 99% du temps (%) (Recommandation UIT-R SA.363)	1,0
Service d'exploration de la Terre par satellite (capteurs actifs) (%) (Recommandation UIT-R SA.1166)	1,0-5,0

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 10% 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 2π 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 Cas des partages 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. Les courbes indiquent, pour différents angles de pointage de l'antenne de radioastronomie, la valeur pour laquelle le brouillage atteignant le récepteur de radioastronomie est supérieur au seuil critique. Notons que les observations de radioastronomie sont généralement effectuées à des angles d'élévation de plus de 5°

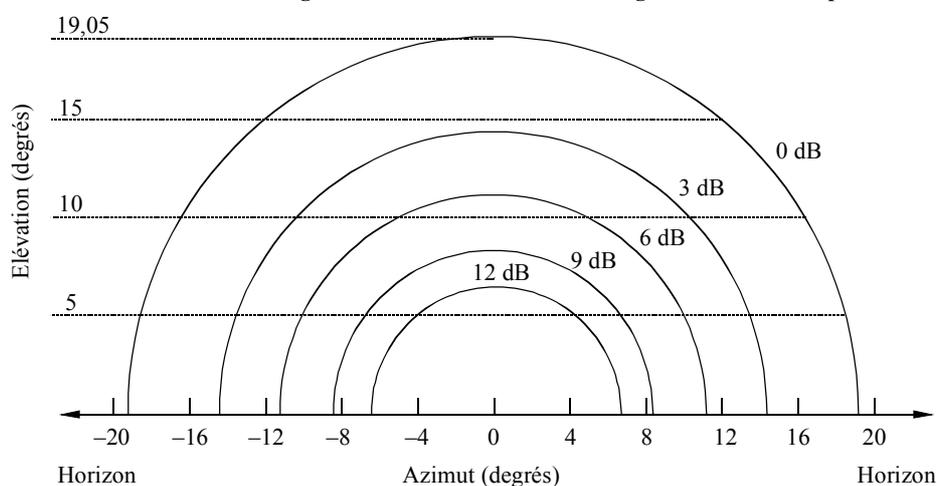


TABLEAU 2

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 10%, ce qui ne signifie pas pour autant qu'une perte de données de 10% 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° 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°) peut générer, dans le cas d'un télescope pointant à moins de 5° 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° 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° et 10° .

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.

Deux Recommandations ont été élaborées par l'UIT-R: 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 et 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, pour traiter la compatibilité entre les constellations à satellites non OSG et les sites SRA. Ces Recommandations UIT-R proposent une méthode pour évaluer le niveau des rayonnements non désirés produits par une constellation à satellites non OSG dans les sites SRA. La première étape de cette méthode 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:

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

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

θ_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

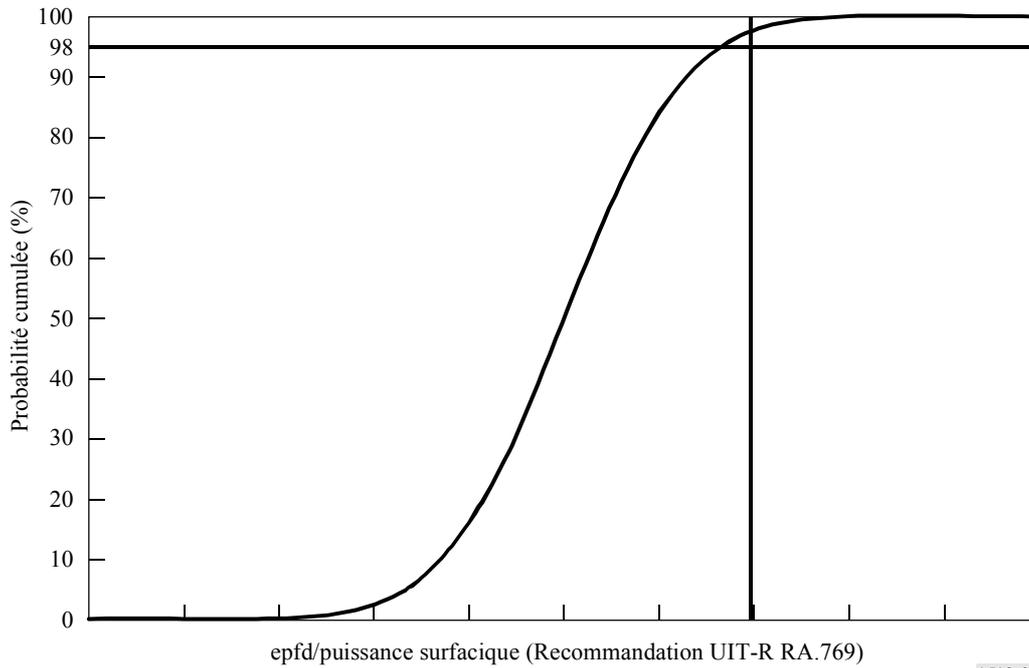
φ_i : angle par rapport à l'axe principal entre la direction de pointage du télescope et la direction de la station spatiale d'émission considérée dans le système à satellites non OSG

$G_r(\varphi_i)$: 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 2000 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



1513-02

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.

4 Conclusion

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%.