

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R S.2029
(12/2012)

Méthode statistique d'évaluation du brouillage variable dans le temps causé par les stations terriennes d'un réseau à satellite géostationnaire du service fixe par satellite fonctionnant en mode AMRT-MF à des réseaux à satellite géostationnaire du service fixe par satellite

Série S
Service fixe par satellite



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
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, 2014

© UIT 2014

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 S.2029

Méthode statistique d'évaluation du brouillage variable dans le temps causé par les stations terriennes d'un réseau à satellite géostationnaire du service fixe par satellite fonctionnant en mode AMRT-MF à des réseaux à satellite géostationnaire du service fixe par satellite

(Question UIT-R 208/4)

(2012)

Domaine d'application

La présente Recommandation propose une méthode statistique d'évaluation du brouillage variable dans le temps causé par les stations terriennes d'un réseau à satellite géostationnaire, fonctionnant en mode AMRF-MF (accès multiple par répartition dans le temps multifréquence), à un réseau à satellite géostationnaire du service fixe par satellite. Cette méthode, dans laquelle on considère le brouillage qui pourrait être causé à un autre réseau OSG du SFS, peut être utilisée pour ajuster les niveaux de puissance des terminaux brouilleurs afin que les objectifs de qualité de fonctionnement du réseau à satellite brouillé soient respectés.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les satellites géostationnaires du SFS conviennent bien pour la fourniture d'applications de communication large bande, en particulier de services Internet et de transmission de données;
- b) que les réseaux à satellite utilisent diverses topologies de réseau et différents modes d'accès multiple, dont le mode d'accès multiple par répartition dans le temps multifréquence (AMRF-MF);
- c) que grâce à des techniques efficaces de modulation et de codage, des niveaux de p.i.r.e. de satellite plus élevés, et d'autres techniques, certains réseaux peuvent prendre en charge un maillage complet (point à point) avec des terminaux à petite ouverture;
- d) qu'il est nécessaire de protéger les réseaux du SFS contre tout brouillage qui risque d'être causé par ces terminaux;
- e) qu'il serait utile de disposer de méthodes d'évaluation du brouillage variable dans le temps causé par un réseau OSG du SFS à un autre réseau OSG du SFS;
- f) qu'il serait utile de disposer de méthodes d'évaluation des niveaux de brouillage causé à des réseaux à satellite par des stations terriennes fonctionnant en mode AMRT-MF;
- g) qu'un grand nombre des caractéristiques techniques de ces réseaux qui ont une incidence sur la qualité de fonctionnement et l'utilisation des orbites et du spectre sont des caractéristiques variables dans le temps pour lesquelles des processus stochastiques constituent la meilleure modélisation,

notant

- a) que les niveaux maximaux admissibles de brouillage causé par des réseaux OSG à des réseaux OSG du SFS fonctionnant dans la même bande de fréquences figurent dans la Recommandation UIT-R S.1323;
- b) que les niveaux maximaux admissibles de brouillage causé par des systèmes non OSG à des réseaux OSG du SFS fonctionnant dans la même bande de fréquences et la méthode de détermination de ce brouillage figurent dans la Recommandation UIT-R S.1323;

- c) que le brouillage non variable dans le temps est généralement estimé à l'aide de la méthode $\Delta T/T$, décrite dans la Recommandation UIT-R S.738;
- d) que les méthodes d'estimation des niveaux de densité de p.i.r.e. hors axe et d'évaluation du brouillage variable dans le temps causé à des satellites adjacents du fait d'erreurs de pointage d'une station terrienne à bord d'un véhicule font l'objet de la Recommandation UIT-R S.1857,

recommande

- 1 d'utiliser la méthode donnée dans l'Annexe pour évaluer le brouillage variable dans le temps causé par plusieurs stations terriennes fonctionnant en mode AMRT-MF;
- 2 d'utiliser la méthode fournie pour déterminer les niveaux d'émission hors axe des stations terriennes brouilleuses à respecter afin de satisfaire aux objectifs de qualité de fonctionnement du réseau à satellite brouillé;
- 3 d'utiliser la méthode fournie afin que les réseaux AMRT-MF du type décrit dans la présente Recommandation ne causent pas de brouillage aux autres réseaux du SFS fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences au-delà du niveau accepté par les administrations;
- 4 de considérer les Notes suivantes comme faisant partie intégrante de la présente Recommandation.

NOTE 1 – L'Annexe présente une méthode statistique d'évaluation du brouillage qu'un réseau AMRT-MF pourrait causer à un réseau OSG du SFS cofréquence voisin.

NOTE 2 – Les paramètres et les exemples fournis dans l'Annexe correspondent à un système fictif fonctionnant dans la bande de fréquences des 20/30 GHz. Toutefois, la méthode peut aussi être utilisée pour d'autres bandes de fréquences moyennant des modifications appropriées de certains paramètres.

NOTE 3 – La méthode proposée dans la présente Recommandation ne s'applique pas aux réseaux fonctionnant en mode d'accès multiple par répartition en code (AMRC).

NOTE 4 – Pour vérifier que le modèle mathématique décrit dans la méthode correspond bien aux caractéristiques variables dans le temps d'un réseau AMRT-MF, il peut être utile d'obtenir les caractéristiques statistiques de réseaux opérationnels.

NOTE 5 – La répartition applicable au brouillage à court terme pour les réseaux OSG du SFS en mode AMRT-MF considérés dans la présente Recommandation peut être définie d'un commun accord dans le cadre d'une coordination.

NOTE 6 – La marge de temps et les critères de brouillage à court terme pour les réseaux OSG du SFS pourront faire l'objet d'un complément d'étude.

Annexe

Méthode statistique d'évaluation du brouillage variable dans le temps causé par les stations terriennes d'un réseau à satellite géostationnaire du service fixe par satellite fonctionnant en mode AMRT-MF à des réseaux à satellite géostationnaire du service fixe par satellite

1 Introduction

Ces dernières années, la demande de services Internet bidirectionnels par satellite a considérablement augmenté. Ces services sont assurés au moyen d'un réseau à satellite comportant des terminaux à petite ouverture, en particulier pour les particuliers et les petites entreprises. En règle générale, un réseau à satellite donné est constitué d'un grand nombre de terminaux à petite ouverture déployés sur une vaste zone géographique. En fonction de l'emplacement à l'intérieur de la zone de couverture du satellite, des conditions météorologiques et des débits de données des utilisateurs, il se peut que ces terminaux utilisent des ouvertures de diverses tailles et nécessitent différents niveaux de puissance d'émission. Dans un souci d'utilisation efficace de leurs ressources, ces réseaux peuvent employer des techniques d'accès multiple par répartition dans le temps ou en fréquence. Les terminaux à petite ouverture ont la particularité d'avoir des antennes à grande ouverture de faisceau et risquent donc de causer des brouillages sur la liaison montante à des satellites adjacents si les niveaux de puissance d'émission ne sont pas ajustés correctement. De plus, certains petits terminaux montés à bord d'aéronefs, de navires, de trains, ou de véhicules au sol de même que les terminaux fixes peuvent être à l'origine d'erreurs de pointage d'antenne susceptibles de causer des brouillages qu'il faut réduire. La conjugaison de ces effets se traduit par le fait que des brouillages variables dans le temps sont causés par le réseau de terminaux à un récepteur brouillé d'un autre réseau à satellite.

La présente Annexe propose une méthode statistique de détermination du brouillage causé à un réseau OSG par un autre réseau OSG comportant plusieurs terminaux qui fonctionnent en mode d'accès multiple par répartition dans le temps et avec des erreurs de pointage de l'antenne. Elle traite d'un critère à respecter pour le brouillage à long terme et de critères à respecter pour satisfaire aux objectifs de qualité de fonctionnement à court terme, donne des exemples pour illustrer les incidences sur un réseau à satellite voisin, et présente une méthode par étapes de calcul du brouillage résultant. La méthode présentée peut être utile pour déterminer les niveaux d'émission hors axe des terminaux brouilleurs à respecter afin de satisfaire aux objectifs de qualité de fonctionnement à court terme et à long terme du système à satellites brouillé.

2 Composantes à long terme et à court terme du brouillage

Le signal de brouillage au niveau du récepteur brouillé est constitué de signaux provenant d'un grand nombre de terminaux d'émission qui appartiennent à un même réseau brouilleur et qui fonctionnent en mode d'accès multiple par répartition dans le temps. Il se peut que les terminaux emploient des ouvertures d'antenne de tailles différentes et émettent à différents niveaux de puissance en fonction de leur emplacement à l'intérieur de la zone de couverture du faisceau de satellite. De plus, ces terminaux peuvent présenter de faibles erreurs de pointage d'antenne. Par conséquent, lorsque l'intervalle d'observation est suffisamment large pour contenir les émissions de plusieurs terminaux brouilleurs, le niveau de brouillage du récepteur brouillé varie dans le temps.

En pareils cas, le signal de brouillage au niveau du récepteur brouillé, I_{tot} , peut par exemple être exprimé comme étant la somme d'une composante de brouillage à long terme, I_{long} , et d'une composante de brouillage à court terme, I_{short} , à savoir $I_{tot} = I_{long} + I_{short}$. La composante de

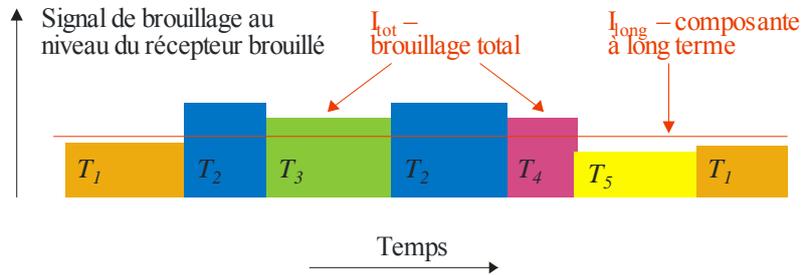
brouillage à long terme est constante sur des intervalles de temps courts mais elle peut présenter de faibles variations lorsqu'on l'observe sur des intervalles de temps longs (de l'ordre de plusieurs minutes). Ces variations, de nature statistique, résultent de la variation lente des caractéristiques des signaux d'émission. Quant à la composante de brouillage à court terme, elle est due aux émissions de différents types de terminaux et peut varier sur des intervalles de temps très courts, par exemple sur une fraction de seconde. Il est à noter que ces composantes de brouillage à court terme et de brouillage à long terme sont utilisées uniquement à titre d'illustration; l'analyse du brouillage est effectuée pour le brouillage total.

La Figure 1 montre les niveaux de brouillage du récepteur brouillé liés aux émissions des terminaux T_1 , T_2 , T_3 , T_4 et T_5 . D'une manière générale, comme indiqué sur cette figure, les niveaux de brouillage et les durées d'émission dépendent du terminal considéré. La composante à long terme indiquée ici représente le niveau moyen du brouillage et la composante de brouillage à court terme est donnée par la différence entre le brouillage total et cette composante de brouillage à long terme.

Pour quantifier et limiter les effets du brouillage, la présente Annexe donne des méthodes d'évaluation et de limitation du brouillage à long terme, du brouillage à court terme et du brouillage total. Plus précisément, elle donne un critère à respecter pour le brouillage à long terme et des critères à respecter pour satisfaire aux objectifs de qualité de fonctionnement à court terme afin de limiter les effets du brouillage au niveau du récepteur brouillé.

FIGURE 1

Brouillage observé au niveau du récepteur brouillé, dû aux émissions des terminaux T_1 , T_2 , T_3 , T_4 et T_5 fonctionnant en mode AMRT



S.2029-01

3 Critère à respecter pour le brouillage à long terme

L'évaluation du brouillage non variable dans le temps se fait généralement à l'aide de la méthode $\Delta T/T$, par exemple telle que décrite dans la Recommandation UIT-R S.738. Afin d'employer une méthode analogue, on considère la situation fictive dans laquelle le niveau de brouillage du récepteur brouillé ne varie pas dans le temps; autrement dit, les niveaux de densité de p.i.r.e. rayonnée par les terminaux sont ajustés de manière à ce que le niveau de brouillage vu du récepteur brouillé soit donné par le niveau de brouillage à long terme, I_{long} . Par ailleurs, dans ce cas, les terminaux ne présentent pas d'erreurs de pointage d'antenne. Le critère à respecter pour le brouillage à long terme est alors exprimé à l'aide du rapport $\Delta T/T$ comme suit:

$$\left(\frac{\Delta T}{T}\right)_{long} = \frac{\tilde{I}_{long} / k}{\Theta_v + \gamma_v \Theta_v^s} \quad (1)$$

où \tilde{I}_{long} est défini comme la moyenne d'ensemble de la densité spectrale de puissance de brouillage calculée dans une largeur de bande de W_{long} , k est la constante de Boltzmann, Θ_v est la température

de bruit du récepteur brouillé rapportée à la sortie de son antenne, Θ_v^s est la température de bruit du récepteur du satellite brouillé rapportée à la sortie de son antenne, et γ_v est le gain de transmission entre la sortie de l'antenne d'entrée du satellite brouillé et la sortie de l'antenne du récepteur brouillé.

A l'évidence, lorsque la moyenne d'ensemble de la puissance de brouillage est constante, le rapport puissance de brouillage sur bruit considéré dans ce cas fictif ne varie pas dans le temps.

Toutefois, dans la pratique, on dispose généralement, non pas de la valeur moyenne d'ensemble, mais de la valeur moyenne dans le temps de la composante de brouillage à long terme. Cette valeur moyenne dans le temps peut présenter de faibles variations lorsqu'on la calcule sur différents intervalles de temps. La valeur moyenne dans le temps \bar{I}_{long} , lorsqu'elle est calculée sur l'intervalle de temps à long terme de durée T_{long} , peut présenter des variations en raison du phénomène statistique du brouillage sous-jacent. De plus, les caractéristiques statistiques des terminaux peuvent varier pendant cet intervalle et donner lieu à de faibles variations autour de cette valeur moyenne. On peut limiter ces variations en imposant les contraintes suivantes à la fonction de distribution cumulative (CDF) de la variable $(\Delta T / T)_{long}$:

$$\Pr \left\{ \left(\frac{\Delta T}{T} \right)_{long} > X\% \right\} < p_{long} \% \quad (2)$$

où X , p_{long} et T_{long} sont des paramètres système.

A titre d'exemple, la Recommandation UIT-R S.523-4 spécifie un intervalle de 10 min pour calculer la moyenne du brouillage causé aux systèmes de téléphonie à codage MIC. Par ailleurs, l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R S.1432-1 spécifie les niveaux maximaux du rapport brouillage/bruit (I/N) qui peuvent être dépassés au cours d'un mois quelconque: (I/N) > 0 dB pendant 0,005% d'un mois quelconque; (I/N) > -2,4 dB pendant 0,03% d'un mois quelconque; (I/N) > -10 dB pendant 20% d'un mois quelconque; et (I/N) > -12 dB pendant 100% d'un mois quelconque.

4 Critères à respecter pour satisfaire aux objectifs de qualité de fonctionnement à court terme

Dans la section précédente, des limites ont été imposées au brouillage à long terme. La présente section définit un critère visant à limiter le brouillage total afin de satisfaire aux objectifs de qualité de fonctionnement à court terme du récepteur brouillé. Le brouillage total peut présenter des variations sur quelques millisecondes. Conformément à la Recommandation UIT-R S.1323-2, pour les liaisons brouillées, il convient de prévoir des marges de liaison suffisantes afin de faire face aux dégradations dues aux effets conjugués de la propagation et du brouillage variable dans le temps. Les dégradations liées à la propagation ne devraient pas représenter plus de 90% de la marge de temps associée aux objectifs de qualité de fonctionnement à court terme. De plus, il est indiqué dans cette Recommandation que les brouillages variables dans le temps «ne devraient pas être à l'origine de plus de 10% de la marge de temps applicable à la valeur de TEB (ou de C/N) spécifiée dans les objectifs de qualité de fonctionnement à court terme du réseau utile et correspondant au plus petit pourcentage de temps (plus petite valeur de C/N)». Dans la présente Annexe, un critère analogue à celui mentionné ci-dessus est défini afin de déterminer une limite acceptable pour le brouillage à court terme.

Les objectifs de qualité de fonctionnement à court terme sont généralement exprimés sous la forme de niveaux du taux d'erreurs sur les bits (TEB) ou de niveaux du rapport porteuse/bruit (C/N) qui doivent être respectés pendant une période donnée. Par exemple, pour un ensemble donné de paires rapport C/N et pourcentage de temps, $((C/N)_j, p_j\%), j = 1, 2, \dots, J$, le rapport C/N peut être inférieur à $(C/N)_j$ uniquement pendant $p_j\%$ du temps au cours d'un mois quelconque. De manière analogue au

point o) du *considérant* de la Recommandation UIT-R S.1323-2, on considère que les effets de propagation conduisent à une dégradation de la liaison pendant au plus $(1 - p_{short}/100) \times p_j\%$, $j = 1, 2, \dots, J$, du temps au cours d'un mois quelconque, où p_{short} représente la part de la marge de temps spécifiée dans l'objectif de qualité de fonctionnement à court terme attribuée au brouillage à court terme (par exemple, $p_{short} = 10$). Compte tenu de la limitation du brouillage à long terme proposée dans la section précédente, les critères qu'il est proposé d'utiliser pour limiter le brouillage à court terme et respecter les objectifs de qualité de fonctionnement à court terme s'expriment comme suit:

- a) En présence d'effets de propagation et de brouillage à long terme, le rapport C/N ne devrait pas être inférieur à $(C/N)_j$ pendant plus de $(1 - p_{short}/100) \times p_j\%$, $j = 1, 2, \dots, J$, (par exemple, $p_{short} = 10$) du temps au cours d'un mois quelconque.
- b) En présence de brouillage à court terme, le rapport C/N ne devrait pas être inférieur à $(C/N)_j$ pendant plus de $(p_{short}/100) \times p_j\%$ du temps au cours d'un mois quelconque, où j correspond à la plus petite valeur $(C/N)_j$.
- c) En présence d'effets de propagation et de brouillage total, le rapport C/N ne devrait pas être inférieur à $(C/N)_j$ pendant plus de $p_j\%$, $j = 1, 2, \dots, J$, du temps au cours d'un mois quelconque.

Il est à noter que, pour remplir les conditions ci-dessus, la marge de liaison associée à la liaison brouillée devrait être suffisante pour pouvoir satisfaire à la condition a) et le niveau de densité de p.i.r.e. du brouilleur devrait être limité pour pouvoir satisfaire aux conditions b) et c). Il est à noter également que d'après la condition c), l'incidence conjuguée de la dégradation de la propagation et du brouillage total est telle que le rapport C/N continue de respecter l'objectif de qualité de fonctionnement à court terme.

4.1 Expression des rapports C/N

Le rapport C/N par temps clair, compte tenu de la composante de brouillage à long terme, peut s'exprimer comme suit:

$$(C/N)_{CS} = \frac{C_{CS}}{N_{CS} + I_{long}}$$

où C_{CS} est la puissance de la porteuse par temps clair, N_{CS} la puissance de bruit au niveau du récepteur brouillé par temps clair et I_{long} la composante de puissance de brouillage à long terme par temps clair.

Considérons à présent le rapport C/N dans des conditions d'évanouissements dus à la pluie. Les facteurs d'affaiblissement dû à la pluie dans le sens montant et dans le sens descendant sur la liaison brouillée sont désignés respectivement par A_{\uparrow} et A_{\downarrow} . La puissance de la porteuse au niveau du récepteur brouillé dans ces conditions sera affaiblie d'un facteur $F(A_{\uparrow}, A_{\downarrow})$ et sera donc donnée par $C_{CS}F(A_{\uparrow}, A_{\downarrow})$. La puissance de bruit au niveau du récepteur est donnée par la fonction $N(N_{CS}, A_{\downarrow})$. Cette fonction inclut le bruit du ciel dû à la pluie et les composantes de bruit émanant du satellite utile et des satellites adjacents. Il est à noter que les facteurs d'affaiblissement dû à la pluie sur la liaison descendante depuis les satellites adjacents ne sont pas nécessairement égaux à A_{\downarrow} . En pareils cas, cette fonction de bruit devrait tenir compte de ces différents facteurs. Dans des conditions d'évanouissements dus à la pluie, la composante de brouillage à long terme est donnée par $I(I_{long}, A_{\downarrow}, A_{\uparrow, i})$, où $A_{\uparrow, i}$ est le facteur d'affaiblissement dû à la pluie sur la liaison montante entre le terminal brouilleur et le satellite utile. Il est à noter que lorsque les facteurs d'affaiblissement dû à la pluie sur la liaison montante sont différents d'un terminal brouilleur à l'autre, il convient de tenir compte de ces différents facteurs dans cette expression. De plus, lorsque les composantes d'affaiblissement dû à la pluie sur la liaison descendante depuis le satellite utile et les satellites adjacents sont différentes, il convient de tenir compte des différents facteurs d'affaiblissement dû à

la pluie sur la liaison descendante depuis les satellites adjacents. Cela étant, le rapport C/N dans des conditions d'évanouissements dus à la pluie et compte tenu de la composante de brouillage à long terme s'exprime comme suit:

$$(C/N)_s = \frac{C_{CS} F(A_{\uparrow}, A_{\downarrow})}{N(N_{CS}, A_{\downarrow}) + I(I_{long}, A_{\downarrow}, A_{\uparrow,i})} \quad (3)$$

Enfin, considérons l'affaiblissement dû à la pluie en présence du brouillage total, I_{tot} . Le rapport C/N peut s'exprimer comme suit:

$$(C/N)_t = \frac{C_{CS} F(A_{\uparrow}, A_{\downarrow})}{N(N_{CS}, A_{\downarrow}) + I(I_{tot}, A_{\downarrow}, A_{\uparrow,i})} \quad (4)$$

où $I(I_{tot}, A_{\downarrow}, A_{\uparrow,i})$ est le brouillage total en présence de pluie.

4.2 Expression du critère à respecter pour satisfaire aux objectifs de qualité de fonctionnement à court terme

Dans le présent paragraphe, les critères à respecter pour satisfaire aux objectifs de qualité de fonctionnement à court terme énoncés au § 4 sont exprimés en fonction des dégradations du rapport C/N . Le critère a) ci-dessus peut s'exprimer comme suit:

$$\Pr\{(C/N)_s < (C/N)_j\} \leq (1 - p_{short}/100) \times p_j \%, \quad j = 1, 2, \dots, J$$

Aux fins d'analyse, il est commode de considérer la dégradation du rapport C/N par rapport aux valeurs par temps clair. Désignons les dégradations en présence de la composante de brouillage à long terme et du brouillage total respectivement par $Z_s = \frac{(C/N)_{CS}}{(C/N)_s}$ et $Z_t = \frac{(C/N)_{CS}}{(C/N)_t}$, et définissons les variables $Z_j = \frac{(C/N)_{CS}}{(C/N)_j}, j = 1, 2, \dots, J$. Le critère ci-dessus peut s'exprimer de manière équivalente comme suit:

$$\Pr\{Z_s > Z_j\} \leq (1 - p_{short}/100) \times p_j \%, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (5)$$

De même, le critère c) peut s'exprimer comme suit:

$$\Pr\{Z_t > Z_j\} \leq p_j \%, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (6)$$

Enfin, le critère b) peut être satisfait lorsque la liaison brouillée est conçue de manière telle que les effets de propagation utilisent la marge de temps maximale pour le plus petit rapport C/N spécifié, désigné par $(C/N)_{jm}$. Par conséquent, le critère b) peut s'exprimer comme suit:

$$\Pr\{Z_s > Z_{jm}\} = (1 - p_{short}/100) \times p_{jm} \% \quad (7)$$

5 Liste des paramètres et notations

Cette section contient la liste des paramètres et notations employés dans la présente Annexe.

- λ_u, λ_d (m): longueurs d'onde sur la liaison montante et sur la liaison descendante respectivement.
- ϕ_r (degrés): erreur de pointage de l'antenne au niveau de T_r : angle entre la direction réelle et la direction souhaitée de l'axe de visée de l'antenne.

$\Phi_{r,\varepsilon}, \Phi_{r,a}$ (degrés):	erreur de pointage de l'antenne en élévation et en azimut au niveau de T_r : différence entre la valeur réelle et la valeur souhaitée des angles d'élévation et d'azimut.
ψ (degrés):	angle hors axe au niveau de T_i mesuré par rapport à son axe de visée.
$\Psi_{r,x}, x = i, v$ (degrés):	angle au niveau de T_r entre son axe de visée et la direction de S_x .
$\Psi_{v,i}$ (degrés):	angle au niveau de R_v entre son axe de visée et la direction de S_i .
$\delta_{v,x}, x = i, v$ (degrés):	angle au niveau de l'antenne de réception de S_v entre son axe de visée et la direction de T_x .
$\delta_{i,r}$ (degrés):	angle au niveau de l'antenne de réception de S_i entre son axe de visée et la direction de T_r .
$\eta_x, x = i, v$ (degrés):	angle au niveau de l'antenne d'émission de S_x entre son axe de visée et la direction de R_v .
$\gamma_x, x = i, v$:	gain de transmission sur la liaison descendante mesuré depuis la sortie de l'antenne de réception de S_x jusqu'à la sortie de l'antenne de réception de R_v .
θ_{space} (degrés):	espacement orbital entre les satellites S_v et S_i .
Θ_r (K):	température de bruit du ciel dû à la pluie au niveau de R_v rapportée à la sortie de son antenne de réception.
Θ_v (K):	température de bruit du système au niveau de R_v rapportée à la sortie de son antenne de réception.
$\Theta_x^s, x = i, v$ (K):	température de bruit du système au niveau de S_x rapportée à la sortie de son antenne de réception.
A_{\downarrow} :	facteur d'affaiblissement dû à la pluie sur la liaison descendante de S_v à R_v .
A_{\uparrow} :	facteur d'affaiblissement dû à la pluie sur la liaison montante de T_v à S_v .
$A_{\uparrow,i}$:	facteur d'affaiblissement dû à la pluie sur la liaison montante de T_r à S_v .
$B_x, x = r, v$ (W/Hz):	densité de p.i.r.e. dans l'axe de visée au niveau de T_x .
$B_x^s, x = r, v$ (W/Hz):	densité de p.i.r.e. dans l'axe de visée au niveau de S_x .
C (W/Hz):	densité spectrale de puissance de la porteuse par temps clair à la sortie de l'antenne de réception de R_v .
C_{cs} (W):	puissance de la porteuse par temps clair à la sortie de l'antenne de réception de R_v .
C_i, C_v :	centres des faisceaux de réception de S_i et de S_v sur la surface de la Terre.
$(C/N)_j$:	rapport (C/N) spécifié dans les objectifs à court terme. Le rapport C/N ne devrait pas lui être inférieur pendant $p_j\%$ du temps.
$(C/N)_{cs}$:	rapport (C/N) au niveau du récepteur brouillé par temps clair et en présence de brouillage à long terme.
$(C/N)_s$:	rapport (C/N) au niveau du récepteur brouillé dans des conditions d'évanouissements dus à la pluie et en présence de brouillage à long terme.

$(C/N)_t$:	rapport (C/N) au niveau du récepteur brouillé dans des conditions d'évanouissements dus à la pluie et en présence de brouillage total.
E (W/Hz):	diagramme de densité de p.i.r.e. hors axe au niveau de T_r .
$EIRP(\psi)$ (W/Hz):	densité de p.i.r.e. dans la direction hors axe ψ .
$G_{t,r}$:	gain d'antenne d'émission normalisé au niveau de T_r . ($G_{t,r}(0) = 1$).
$G_{r,v}$:	gain d'antenne de réception au niveau de R_v .
$G_{r,i}^S, G_{r,v}^S$:	diagrammes de gain d'antenne de réception au niveau de S_i et de S_v , respectivement.
$G_{t,i}^S, G_{t,v}^S$:	gain d'antenne d'émission normalisé au niveau de S_i et de S_v , respectivement. $(G_{t,i}^S(0) = G_{t,v}^S(0) = 1)$.
\tilde{I}_{avg} (W/Hz):	valeur moyenne d'ensemble de la densité spectrale de puissance de brouillage au niveau de R_v due à tous les terminaux T_v .
I_{long} (W):	puissance de brouillage à long terme au niveau de R_v due à tous les terminaux T_v .
\tilde{I}_{long} (W/Hz):	densité spectrale de puissance de brouillage à long terme au niveau de R_v due à tous les terminaux T_v .
I_{tot} (W):	puissance de brouillage total au niveau de R_v due à tous les terminaux T_v .
\tilde{I}_{tot} (W/Hz):	densité spectrale de puissance de brouillage total au niveau de R_v due à tous les terminaux T_v .
$\tilde{I}_{tot,0}$ (W/Hz):	densité spectrale de puissance de brouillage total en l'absence d'erreurs de pointage de l'antenne au niveau de R_v due à tous les terminaux T_v .
$I_x(r), x = i, v$ (W/Hz):	densité spectrale de puissance de brouillage au niveau de R_v due à T_r et reçue via S_x .
k :	constante de Boltzmann. $k = 1,38065 \times 10^{-23}$ W/K/Hz.
L_d :	affaiblissement sur la liaison descendante de S_i ou S_v à R_v . $L_d = (4\pi d_d/\lambda_d)^2 +$ autres affaiblissements, où d_d est la longueur de la liaison descendante.
$L_{u,x}, x = r, v$:	affaiblissement sur la liaison montante de T_x à S_v . $L_{u,x} = (4\pi d_{u,x}/\lambda_u)^2 +$ autres affaiblissements, où $d_{u,x}$ est la longueur de la liaison montante.
N_\uparrow (W/Hz):	densité spectrale de puissance de bruit au niveau de S_v à la sortie de l'antenne de réception de R_v .
N_\downarrow (W/Hz):	densité spectrale de puissance de bruit au niveau de R_v rapportée à la sortie de son antenne de réception.
$N_{\uparrow,i}$ (W/Hz):	densité spectrale de puissance de bruit au niveau de S_i à la sortie de l'antenne de réception de R_v .
N_{cs} (W):	puissance de bruit par temps clair à la sortie de l'antenne de réception de R_v .

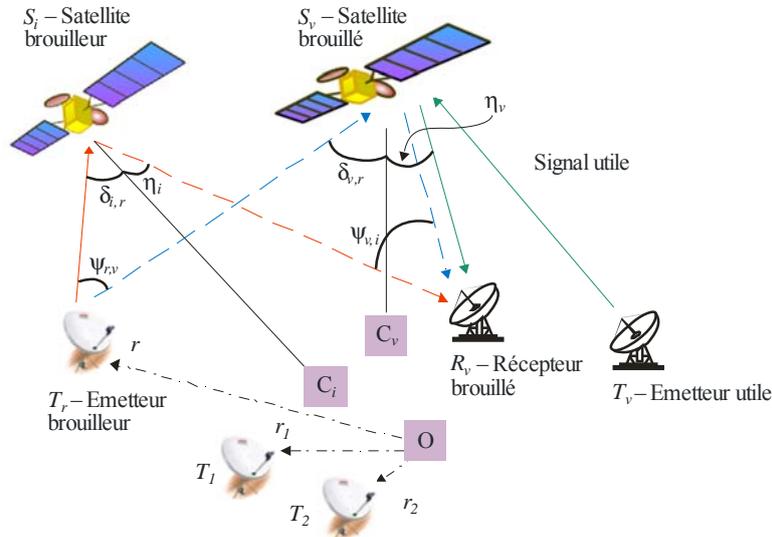
N_r (W/Hz):	densité spectrale de puissance de bruit du ciel dû à la pluie à la sortie de l'antenne de réception de R_v .
p_X :	fonction de densité de probabilité (PDF) de la variable X .
P_X :	fonction de distribution cumulative (CDF) de la variable X .
$q_\tau(t)$:	impulsion rectangulaire telle que $q_\tau(t) = 1$ pour t dans l'intervalle $(0, \tau)$, et zéro ailleurs.
R :	région dans laquelle les terminaux brouilleurs sont répartis.
r (m):	vecteur position au niveau de T_r mesuré depuis l'origine, O .
R_v :	terminal de réception brouillé.
S_i, S_v :	satellites du réseau brouilleur et de la liaison brouillée, respectivement.
T_{long} (s):	intervalle de moyennage du brouillage à long terme.
T_r, T_v :	terminal brouilleur situé en r et émetteur utile.
W_{long} (Hz):	largeur de bande pour la détermination de la densité spectrale de puissance de brouillage à long terme.
\bar{X} (dB):	valeur du paramètre X en dB, $10 \log_{10}(X)$.
Z_s :	$Z_s = \frac{(C/N)_{cs}}{(C/N)_s}$, dégradation du rapport C/N liée aux évanouissements dus à la pluie en présence de la composante de brouillage à long terme.
Z_t :	$Z_t = \frac{(C/N)_{cs}}{(C/N)_t}$, dégradation du rapport C/N liée aux évanouissements dus à la pluie en présence du brouillage total.

6 Modèle statistique utilisé pour l'analyse du brouillage

Les réseaux à satellite brouilleur et brouillé sont représentés à la Fig. 2. Sur cette figure, les émetteurs du réseau brouilleur sont désignés par T_1, T_2, \dots, T_r , les satellites brouillé et brouilleur par S_v et S_i , l'émetteur utile par T_v et le récepteur brouillé par R_v . L'analyse vise à quantifier le brouillage causé par le réseau des terminaux T_1, T_2, \dots, T_r au réseau à satellite brouillé. Les terminaux brouilleurs fonctionnent en mode d'accès multiple par répartition dans le temps, un seul terminal émettant à un instant donné dans une bande de fréquences étroite considérée. Il est à noter que les terminaux peuvent fonctionner dans une large bande de fréquences et en mode d'accès multiple en fréquence; le brouillage dans cette large bande de fréquences est calculé en faisant la somme du brouillage dans chaque bande de fréquences étroite. Sur la Fig. 2, on suppose que les satellites S_i et S_v emploient la même transposition de fréquence de la liaison montante à la liaison descendante.

FIGURE 2

Trajets de brouillage des terminaux T_1, T_2, \dots, T_r vers le récepteur brouillé R_r via les satellites S_i et S_v . C_i et C_v désignent les centres des faisceaux de S_i et de S_v , sur le sol et O est l'origine à partir de laquelle les distances aux emplacements des terminaux sont mesurées



S.2029-02

Si on suppose que les terminaux brouilleurs émettent de manière aléatoire, l'instant auquel un terminal brouilleur particulier émet peut être représenté par une variable aléatoire en fonction de la position. La fonction de densité de probabilité (PDF) de cette variable aléatoire est désignée par p_r . Lorsque tous les terminaux brouilleurs sont situés dans une région R , on a $\int_R p_r(r) dr = 1$.

Les terminaux brouilleurs peuvent être constitués de terminaux ayant des ouvertures d'antenne de tailles différentes. Le diagramme de densité de p.i.r.e. hors axe d'un terminal général situé en r est désigné par E . La fonction PDF des diagrammes de densité de p.i.r.e., lorsque tous les terminaux brouilleurs sont pris en considération, est désignée par p_E . Comme il s'agit d'une fonction PDF, on a $\int_E p_E(E) dE = 1$, l'intégration étant faite sur toutes les valeurs possibles de E .

L'erreur de pointage de l'antenne au niveau d'un terminal situé en r , qui correspond à l'angle entre la direction voulue et la direction réelle de l'axe de visée de l'antenne, est désignée par ϕ_r . Ces erreurs de pointage de l'antenne peuvent varier lentement et sont statistiquement indépendantes pour les différents terminaux. Dans la présente Annexe, on suppose que les composantes en élévation et en azimut de cette erreur de pointage de l'antenne, désignées par $\phi_{r,\epsilon}$ et $\phi_{r,a}$, sont disponibles. En outre, les fonctions PDF de ces composantes d'erreur de pointage de l'antenne, p_ϵ et p_a , sont supposées être connues.

En ce qui concerne le critère à respecter pour le brouillage à long terme, il est nécessaire de calculer la valeur du brouillage moyennée dans le temps. Pour faciliter ce calcul, il est utile de représenter le diagramme d'émission des terminaux brouilleurs en fonction du temps comme indiqué à la Fig. 1. On suppose que le terminal T_{r_n} , situé en r_n , émet pendant l'intervalle de temps (t_n, t_{n+1}) . La séquence d'émission de ces terminaux est $T_{r_0}, T_{r_1}, T_{r_2}, \dots$, et la séquence correspondante d'intervalles d'émission est: $(t_0, t_1), (t_1, t_2), (t_2, t_3), \dots$. Afin de représenter le diagramme d'émission, on désigne par $q_\tau(t)$ une impulsion unitaire de largeur τ telle que $q_\tau(t) = 1$ dans l'intervalle $(0, \tau)$, et zéro en dehors de cet intervalle. Le diagramme d'émission des terminaux en fonction du temps peut alors s'exprimer comme suit: $\sum_n T_{r_n} q_{\tau_n}(t - t_n)$, où $\tau_n = (t_{n+1} - t_n)$.

7 Détermination du brouillage à long terme

Le brouillage à long terme est la valeur du brouillage moyennée dans le temps, sur un intervalle de temps T_{long} , en l'absence d'erreurs de pointage de l'antenne. Les trajets des signaux des terminaux brouilleurs au récepteur brouillé via les satellites brouilleur et brouillé sont représentés à la Fig. 2. Comme indiqué ci-avant, on suppose dans cette analyse que la transposition entre les fréquences sur la liaison montante et sur la liaison descendante est la même au niveau des deux satellites. Les densités spectrales de puissance de brouillage causé au récepteur brouillé, via les satellites S_v et S_i , par le terminal brouilleur T_r peuvent s'exprimer en fonction des gains de transmission des satellites au récepteur brouillé, γ_v et γ_i , et des paramètres de liaison comme suit:

$$I_v(r) = \frac{B_r G_{t,r}(\psi_{r,v}) G_{r,v}^s(\delta_{v,r})}{L_{u,r}} \gamma_v$$

$$I_i(r) = \frac{B_r G_{t,r}(0) G_{r,i}^s(\delta_{i,r})}{L_{u,r}} \gamma_i$$
(8)

où les gains de transmission sur les liaisons par satellite γ_v et γ_i sont donnés par:

$$\gamma_v = \frac{B_v^s G_{t,v}^s(\eta_v) G_{r,v}(0) L_{u,v}}{B_v G_{r,v}^s(\delta_{v,v}) L_d}$$

$$\gamma_i = \frac{B_i^s G_{t,i}^s(\eta_i) G_{r,v}(\psi_{v,i}) L_{u,r}}{B_r G_{r,i}^s(\delta_{i,r}) L_d}$$
(9)

Il est à noter que le gain de transmission γ_i ne dépend pas de l'emplacement du terminal brouilleur car il s'agit du gain depuis la sortie de l'antenne de réception du satellite S_i jusqu'à la sortie de l'antenne de réception du terminal brouillé, R_v .

Les termes de brouillage $I_v(r)$ et $I_i(r)$ dépendent de l'emplacement particulier du terminal brouilleur, T_r , et sont rencontrés avec une faible probabilité $p_r(r) dr$. Etant donné que les terminaux brouilleurs peuvent émettre à différents niveaux de densité de p.i.r.e. hors axe et qu'ils sont situés à différents emplacements, le signal de brouillage composite dû à tous les terminaux varie dans le temps. La valeur moyenne d'ensemble de la densité spectrale de puissance de brouillage, lorsqu'on prend en considération tous les terminaux brouilleurs du réseau dans la région considérée R , s'exprime comme suit:

$$\tilde{I}_{avg} = \iint_{R,E} (I_v(r) + I_i(r)) p_E(E) p_r(r) dE dr$$
(10)

Il est à noter que dans la présente section et dans les sections qui suivent, on calcule la densité spectrale de puissance de brouillage; on peut obtenir la puissance de brouillage correspondante en multipliant cette densité par la largeur de bande considérée.

Dans la présente section, il est nécessaire de calculer la valeur du brouillage moyennée dans le temps. Il faut donc exprimer le signal de brouillage en fonction du temps, en l'absence d'erreurs de pointage de l'antenne. Si on utilise la fonction rectangulaire $q_\tau(t)$, on peut l'exprimer comme suit:

$$\tilde{I}_{tot,0}(t) = \sum_n (I_v(r_n) + I_i(r_n)) q_{\tau_n}(t - t_n)$$

où r_n est l'emplacement du terminal brouilleur émettant dans l'intervalle de temps (t_n, t_{n+1}) et $\tau_n = (t_{n+1} - t_n)$. La composante de brouillage à long terme correspond à la moyenne dans le temps de la valeur ci-dessus et s'exprime comme suit:

$$\tilde{I}_{long} = \frac{1}{T_{long}} \int \sum_n^{t+T_{long}} (I_v(r_n) + I_i(r_n)) q\tau_n(t-t_n) dt \quad (11)$$

Comme indiqué au § 3, étant donné que $\tilde{I}_{tot,0}$ est un phénomène statistique, la valeur ci-dessus, \tilde{I}_{long} , présente de faibles variations lorsqu'elle est calculée sur différents intervalles de temps. La fonction CDF du rapport brouillage à long terme/bruit présentée au § 3 impose des limites à ces variations.

8 Expression du critère à respecter pour satisfaire aux objectifs de qualité de fonctionnement à court terme

Le critère à respecter pour satisfaire aux objectifs de qualité de fonctionnement à court terme en fonction des variables de dégradation du rapport C/N a été exprimé au § 4.2. Dans la présente section, des expressions seront données pour déterminer ces dégradations du rapport C/N en fonction des variables de liaison du réseau à satellite faisant l'objet de la Fig. 2.

8.1 Dégradation du rapport C/N liée aux évanouissements dus à la pluie en présence de brouillage à long terme

La dégradation du rapport C/N liée aux évanouissements dus à la pluie en présence de la composante de brouillage à long terme a été exprimée sous la forme $Z_s = \frac{(C/N)_{cs}}{(C/N)_s}$ au § 4.1. Dans le présent paragraphe, cette dégradation sera calculée en fonction des variables de liaison spécifiques.

Le rapport C/N par temps clair peut s'exprimer comme suit:

$$(C/N)_{cs} = \frac{C}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + N_{\uparrow,i} + \tilde{I}_{long}} \quad (12)$$

où les variables $C, N_{\downarrow}, N_{\uparrow}$ et $N_{\uparrow,i}$ sont données par:

$$C = \frac{B_v G_{r,v}^s(\delta_{v,v})}{L_{u,v}} \gamma_v; N_{\downarrow} = k\Theta_v; N_{\uparrow} = k\gamma_v \Theta_v^s; N_{\uparrow,i} = k\gamma_i \Theta_i^s$$

Il est à noter que, dans la formule (12), et ci-après au § 8.2, le rapport C/N est exprimé en fonction des densités spectrales de puissance de la porteuse, du bruit et du brouillage. On obtient la puissance correspondante en multipliant la densité par la largeur de bande considérée.

Considérons à présent le rapport C/N en présence d'évanouissements dus à la pluie:

$$(C/N)_s = \frac{C / A_{\uparrow} A_{\downarrow}}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} / A_{\downarrow} + N_{\uparrow,i} / A_{\downarrow} + N_r (1 - 1 / A_{\downarrow}) + \tilde{I}_{long} / (A_{\uparrow,i} A_{\downarrow})} \quad (13)$$

On suppose ici que l'espacement orbital entre les satellites S_v et S_i est très faible, de sorte que les termes d'évanouissements sur la liaison descendante depuis ces satellites sont les mêmes. De même, on suppose que les termes d'évanouissements sur la liaison montante depuis les terminaux brouilleurs sont approximativement les mêmes et sont donnés par $A_{\uparrow,i}$. C'est une hypothèse raisonnable pour une zone de couverture de quelques centaines de kilomètres. Si ce n'est pas le cas, il convient de modifier le dernier terme du dénominateur afin de tenir compte du terme d'affaiblissement dû à la pluie en fonction de l'emplacement, $A_{\uparrow,i}(r)$.

La dégradation du rapport C/N dans le cas statique est définie par $Z_s = \frac{(C/N)_{cs}}{(C/N)_s}$. En remplaçant $(C/N)_{cs}$ et $(C/N)_s$ par les expressions données par les formules (12) et (13), on peut montrer que:

$$Z_s = A_{\uparrow} \times (A_{\downarrow} d_1 + d_2 + d_3 / A_{\uparrow,i}) \quad (14)$$

où les variables d_1, d_2 et d_3 sont définies comme suit:

$$d_1 = \frac{N_{\downarrow} + N_r}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + N_{\uparrow,i} + \tilde{I}_{long}}; d_2 = \frac{N_{\uparrow} + N_{\uparrow,i} - N_r}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + N_{\uparrow,i} + \tilde{I}_{long}}; d_3 = \frac{\tilde{I}_{long}}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + N_{\uparrow,i} + \tilde{I}_{long}}$$

Il est à noter que $(d_1 + d_2 + d_3) = 1$. Afin d'exprimer les paramètres d_1, d_2 et d_3 en fonction des variables de liaison par satellite, on introduit les variables suivantes:

$$c_1 = \frac{N_{\uparrow}}{N_{\downarrow}}; c_2 = \frac{N_{\uparrow,i}}{N_{\downarrow}}; c_3 = \frac{N_r}{N_{\downarrow}}; c_4 = \frac{\tilde{I}_{long}}{N_{\downarrow}}$$

En intégrant ces variables dans les formules ci-dessus de d_1, d_2 et d_3 , on obtient:

$$d_1 = \frac{1 + c_3}{1 + c_1 + c_2 + c_4}; d_2 = \frac{c_1 + c_2 - c_3}{1 + c_1 + c_2 + c_4}; d_3 = \frac{c_4}{1 + c_1 + c_2 + c_4}$$

Les variables c_1, c_2 et c_3 peuvent être exprimées en fonction des paramètres de liaison par satellite comme suit:

$$c_1 = \frac{\Theta_v^s}{\Theta_v} \gamma_v; c_2 = \frac{\Theta_i^s}{\Theta_v} \gamma_i; c_3 = \frac{\Theta_r}{\Theta_v}; c_4 = \frac{\tilde{I}_{long}}{k\Theta_v}$$

Etant donné que les évanouissements dus à la pluie sont généralement disponibles en dB, la variable Z_s de dégradation du rapport C/N donnée par la formule (14) peut être analysée aisément lorsqu'elle est exprimée en unité logarithmique. Si Z_s et les évanouissements dus à la pluie sont exprimés en dB, on a:

$$\bar{Z}_s = \bar{A}_{\uparrow} + 10 \log \left(10^{\bar{A}_{\downarrow}/10} d_1 + d_2 + 10^{-\bar{A}_{\uparrow,i}/10} d_3 \right) \quad (15)$$

La fonction CDF de $\bar{Z}_s, P_{\bar{Z}_s}(\bar{z}) = \Pr\{\bar{Z}_s \leq \bar{z}\}$, peut être déterminée analytiquement lorsque les fonctions PDF des facteurs d'affaiblissement dû à la pluie, $\bar{A}_{\uparrow}, \bar{A}_{\uparrow,i}$ et \bar{A}_{\downarrow} , sont connus. Dans le cas contraire, on peut utiliser une méthode de simulation de Monte-Carlo pour estimer la fonction CDF de \bar{Z}_s .

8.2 Dégradation du rapport C/N liée aux évanouissements dus à la pluie en présence de brouillage total

Dans le présent paragraphe, la dégradation du rapport C/N liée aux évanouissements dus à la pluie en présence de brouillage total, $Z_t = \frac{(C/N)_{cs}}{(C/N)_t}$, est déterminée en fonction des paramètres de liaison par satellite.

Au § 7, la composante de brouillage à long terme a été déterminée dans le cas où les terminaux brouilleurs émettent sans erreurs de pointage de l'antenne. Dans la présente section, on tient compte des erreurs de pointage de l'antenne. L'erreur de pointage de l'antenne au niveau de T_r est désignée par ϕ_r . En présence d'erreurs de pointage de l'antenne, les termes de brouillage de la formule (8) s'expriment comme suit:

$$\begin{aligned}
 I_v(r) &= \frac{B_r G_{t,r}(\psi_{r,v}(\phi_r)) G_{r,v}^s(\delta_{v,r})}{L_{u,r}} \gamma_v \\
 I_i(r) &= \frac{B_r G_{t,r}(\psi_{r,i}(\phi_r)) G_{r,i}^s(\delta_{i,r})}{L_{u,r}} \gamma_i
 \end{aligned} \tag{16}$$

où la dépendance des angles hors axe $\psi_{r,v}$ et $\psi_{r,i}$ vis-à-vis de ϕ_r est indiquée explicitement. Le brouillage total en présence d'erreurs de pointage de l'antenne est à présent donné par $\tilde{I}_{tot} = (I_v(r) + I_i(r))$. En ce qui concerne les erreurs de pointage de l'antenne, on dispose généralement des erreurs en azimut et en élévation, $\phi_{r,a}$ et $\phi_{r,\varepsilon}$. L'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R S.1857 donne une méthode permettant de déterminer les angles $\psi_{r,v}(\phi_r)$ et $\psi_{r,i}(\phi_r)$ à partir des angles d'erreur en azimut et en élévation disponibles.

Le rapport C/N au niveau du récepteur brouillé en présence d'évanouissements dus à la pluie et de brouillage total est donné par:

$$(C/N)_t = \frac{C / A_\uparrow A_\downarrow}{N_\downarrow + N_\uparrow / A_\downarrow + N_{\uparrow,i} / A_\downarrow + N_r(1 - 1/A_\downarrow) + \tilde{I}_{tot} / (A_\uparrow A_\downarrow)} \tag{17}$$

En procédant de manière analogue à la procédure suivie dans le paragraphe précédent, la dégradation du rapport C/N dans ce cas, $\bar{Z}_t = 10 \log((C/N)_{cs} / (C/N)_t)$, s'exprime comme suit:

$$\bar{Z}_t = \bar{A}_\uparrow + 10 \log\left(10^{\bar{A}_\downarrow/10} d_1 + d_2 + 10^{-\bar{A}_{\uparrow,i}/10} \tilde{I}_{tot} d_3\right) \tag{18}$$

où $\tilde{I}_{tot} = \tilde{I}_{tot} / \tilde{I}_{long}$ et les variables d_1 , d_2 et d_3 sont telles que données dans le paragraphe précédent. La fonction CDF de \bar{Z}_t , $P_{\bar{Z}_t}(\bar{z}) = \Pr\{\bar{Z}_t \leq \bar{z}\}$, peut être déterminée analytiquement lorsque les fonctions PDF des facteurs d'affaiblissement dû à la pluie et les fonctions PDF indiquées au § 6 sont disponibles. Dans le cas contraire, on peut utiliser une méthode de simulation de Monte-Carlo pour estimer la fonction CDF de \bar{Z}_t .

9 Augmentation de la dégradation de la liaison due au brouillage à court terme

Le critère à respecter pour satisfaire aux objectifs de qualité de fonctionnement à court terme donné au § 4.2 est exprimé au moyen des fonctions CDF complémentaires des variables de dégradation du rapport C/N sur la liaison, $(1 - P_{\bar{Z}_s}(\bar{z}))$ et $(1 - P_{\bar{Z}_t}(\bar{z}))$. Considérons un niveau de dégradation du rapport C/N de \bar{z}_j en cas d'évanouissements dus à la pluie et en présence de brouillage à long terme. Dans ce cas, la dégradation de la liaison, à savoir lorsque \bar{Z}_s dépasse \bar{z}_j , en fonction d'un pourcentage de temps est donnée par $(1 - P_{\bar{Z}_s}(\bar{z}_j)) \times 100\%$. Considérons à présent le brouillage total sur cette liaison.

La dégradation de la liaison, pour le même niveau \bar{z}_j de dégradation du rapport C/N , est donnée par $(1 - P_{\bar{Z}_t}(\bar{z}_j)) \times 100\%$. Par conséquent, l'augmentation relative de la dégradation de la liaison due à la présence du brouillage à court terme est donnée par:

$$R_s \% = \frac{(1 - P_{\bar{Z}_t}(\bar{z}_j)) - (1 - P_{\bar{Z}_s}(\bar{z}_j))}{(1 - P_{\bar{Z}_s}(\bar{z}_j))} \times 100\% \tag{19}$$

Par exemple, on suppose qu'une liaison par satellite est conçue pour fonctionner de manière telle que le rapport C/N sur la liaison est inférieur à $(C/N)_j$ pendant uniquement $p_j\%$ du temps.

Conformément au § 4.2, il convient de prévoir une marge de liaison afin que, dans des conditions d'évanouissements dus à la pluie et en présence de brouillage à long terme, les dégradations durent au plus $p_i\% \times (1 - p_{short}/100)$ du temps. La marge de liaison nécessaire, \bar{z}_j , pour satisfaire cette condition peut être calculée au moyen de la fonction CDF de la variable de dégradation, à savoir $(1 - P_{\bar{z}_s}(\bar{z}_j)) = p_j \times (1 - p_{short}/100)$. Il convient ensuite de limiter le brouillage à court terme de manière telle que $(1 - P_{\bar{z}_t}(\bar{z}_j)) \leq p_j$. D'après la formule (19), on constate que, pour ces valeurs, $R_S\% \leq p_{short}\%$.

10 Augmentation du brouillage moyen due aux erreurs de pointage d'antenne

On remarquera que la composante de brouillage à long terme, \tilde{I}_{long} , est calculée en l'absence d'erreurs de pointage de l'antenne et que le terme de brouillage total, tel qu'il est calculé au § 8.2, tient compte des erreurs de pointage de l'antenne. Les variations à court terme du brouillage sont dues aux erreurs de pointage de l'antenne et au fonctionnement des terminaux en mode d'accès multiple par répartition dans le temps. Les variations dues à ce mode de fonctionnement peuvent être négligées si on considère la valeur moyenne de \tilde{I}_{long} , désignée par $\langle \tilde{I}_{long} \rangle$ et donnée par \tilde{I}_{avg} dans la formule (10). Cette valeur est vérifiée lorsque T_{long} est très grand par rapport à la durée moyenne d'émission de chaque terminal. On peut utiliser la mesure suivante pour déterminer l'incidence des erreurs de pointage de l'antenne sur le brouillage moyen:

$$R_L\% = \frac{\langle \tilde{I}_{tot} \rangle - \langle \tilde{I}_{long} \rangle}{\langle \tilde{I}_{long} \rangle} \times 100\% \quad (20)$$

où $\langle \tilde{I}_{tot} \rangle$ est la valeur moyenne du brouillage total. On observe qu'en l'absence d'erreurs de pointage de l'antenne, $\langle \tilde{I}_{tot} \rangle \approx \langle \tilde{I}_{long} \rangle$, de sorte que R_L est négligeable.

11 Exemples de simulation

La présente section donne un exemple de résultats de simulation informatique obtenus à l'aide de la méthode décrite dans la présente Annexe. La Figure 3 montre les emplacements du récepteur brouillé et des terminaux brouilleurs par rapport aux centres des faisceaux des antennes de réception de S_i et de S_v . Comme représenté ici, dans cette simulation informatique, les centres des faisceaux des satellites coïncident en un même point et le récepteur brouillé est positionné en ce point. La région R , dans laquelle les terminaux brouilleurs sont répartis, est obtenue en répartissant uniformément les terminaux d'émission dans une zone circulaire de centre C_v (ou C_i) et de rayon égal à 100 km. Les diamètres d'ouverture des terminaux brouilleurs sont choisis aléatoirement dans l'ensemble $\{0,2, 0,25, 0,3, 0,35, 0,4\}$ m et leur diagramme de densité de p.i.r.e. est limité comme suit:

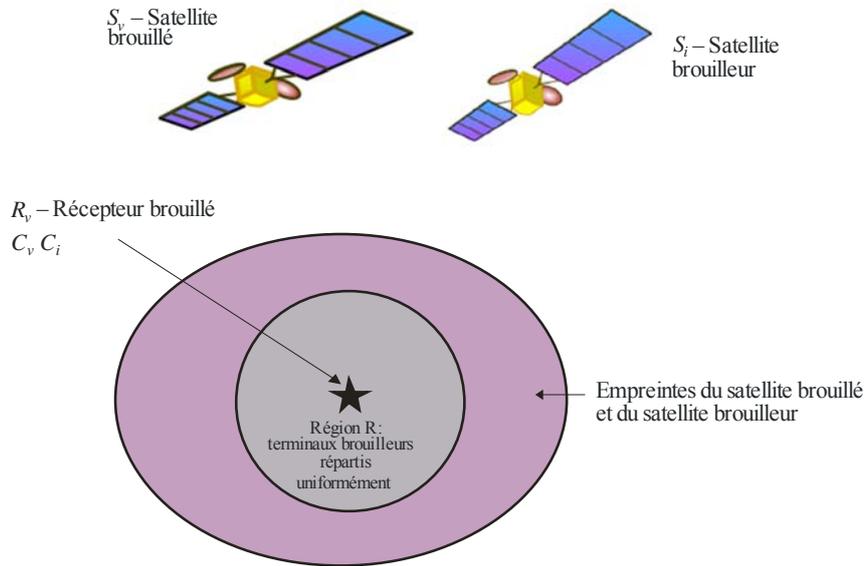
$$\text{EIRP}(\psi) \text{ dB(W/40kHz)} = \begin{cases} 19 - 25 \log \psi + \tilde{E} \text{ dB} & 2^\circ \leq \psi \leq 7^\circ \\ -2 + \tilde{E} \text{ dB} & 7^\circ < \psi \leq 9.2^\circ \\ 22 - 25 \log \psi + \tilde{E} \text{ dB} & 9.2^\circ < \psi \leq 48^\circ \\ -10 + \tilde{E} \text{ dB} & 48^\circ < \psi \leq 180^\circ \end{cases} \quad (21)$$

où ψ est l'angle hors axe et \tilde{E} est un paramètre qui peut être utilisé pour augmenter ou diminuer les niveaux d'émission hors axe des terminaux. Il est à noter que lorsque $\tilde{E} = 0$, le niveau d'émission hors axe correspond au niveau spécifié au point 4 du *recommande* de la Recommandation UIT-R S.524-9 pour les stations terriennes fonctionnant dans des réseaux OSG du SFS et émettant dans la bande de fréquences 27,5-30 GHz. Les résultats de simulation qui suivent sont donnés pour

$(\Delta T/T)_{long}$, R_S et R_L en fonction de \tilde{E} . Les paramètres des liaisons par satellite et les paramètres statistiques utilisés dans les simulations informatiques sont donnés respectivement dans les Tableaux 1 et 2.

FIGURE 3

Empreintes du satellite brouillé et du satellite brouilleur et répartition des terminaux brouilleurs pour cette simulation. Ici, C_v et C_i coïncident et R_v est également supposé coïncider avec ce point



S.2029-03

TABLEAU 1

Paramètres des liaisons par satellite utilisés dans la simulation informatique

Fréquence sur la liaison montante	28,75 GHz
Affaiblissement sur la liaison montante	213,09 dB
Terminal d'émission brouillé, T_v , (T_r , latitude, longitude)	(40 °N, 102,8 °E)
Altitudes du site au niveau de T_v , T_r	200 m au-dessus du niveau moyen de la mer
Intensité de pluie et hauteur de pluie au niveau de T_v , T_r	Obtenues conformément aux Recommandations UIT-R P.837 et UIT-R P.839
Longitudes des satellites S_v , S_i	102,8° E et (102,8° + θ_{space}) E
Centres des faisceaux des satellites, C_v et C_i , (latitude, longitude)	(40 °N, 102,8 °E), (40°N, 102,8 °E)
Gains des antennes de réception au niveau des satellites, $G_{r,v}^s$ et $G_{r,i}^s$	51,83 dBi
Températures de bruit au niveau des satellites, T_v^s et T_i^s	1 000 K
Antennes de réception au niveau des satellites	Ouverture circulaire de 1,75 m avec illumination parabolique
Densité de p.i.r.e. du satellite S_v	30 dBW/40 kHz
Fréquence sur la liaison descendante	18,95 GHz
Affaiblissement sur la liaison descendante	209,47 dB
Gain d'antenne du récepteur brouillé, $G_{r,v}$	50,96 dBi (2,4 m), 44,96 dBi (1,2 m)
Altitude du site au niveau de R_v	200 m au-dessus du niveau moyen de la mer
Intensité de pluie et hauteur de pluie au niveau de R_v	Obtenues conformément aux Recommandations UIT-R P.837 et UIT-R P.839
Gains de transmission sur les liaisons par satellite, (γ_v , γ_i)	(-7,25 dB, -76,62 dB) pour un diamètre d'ouverture de R_v de 2,4 m (-13,27 dB, -64,49 dB) pour un diamètre d'ouverture de R_v de 1,2 m

TABLEAU 2

Paramètres statistiques utilisés dans la simulation

Région R	Zone circulaire de centre C_v , C_i et de rayon égal à 100 km
p_r	Répartition uniforme dans la région R
p_E	Terminaux ayant des ouvertures de diamètres {0,2, 0,25, 0,3, 0,35, 0,4} m répartis uniformément et dont la densité de p.i.r.e. est limitée par la formule (21)
$\phi_{r,\varepsilon}$ et $\phi_{r,a}$	Variables aléatoires gaussiennes de moyenne nulle et d'écart type σ

Les Figures 4 et 5 représentent les valeurs de $(\Delta T/T)_{long}$ et R_s données respectivement par les formules (1) et (19). La valeur de \tilde{I}_{long} au numérateur de $(\Delta T/T)_{long}$ est déterminée dans l'hypothèse d'une très grande valeur de T_{long} . Par conséquent, les variations statistiques de \tilde{I}_{long} peuvent être négligées. On constate que, pour les exemples de paramètres donnés dans les Tableaux 1 et 2, et lorsque l'espacement orbital des satellites est de 4°, un niveau de densité de p.i.r.e. correspondant à $\tilde{E} = 7,3$ dB se traduit par $(\Delta T/T)_{long} = 5\%$, pour un récepteur brouillé dont le diamètre de l'ouverture

est de 2,4 m. Si l'espacement orbital est de 3° , pour conserver le même niveau de $(\Delta T/T)_{long}$, il faut ramener la valeur de \tilde{E} à $-1,3$ dB. Ces figures montrent que $(\Delta T/T)_{long}$ est moins élevé si le diamètre de l'ouverture du récepteur brouillé est de 1,2 m. Les Figures 4 et 5 représentent aussi la valeur de R_S utilisée dans le critère à court terme. Dans ce cas, $p_j\%$ et $p_{short}\%$ ont été pris égaux, respectivement, à 2% et à 10%. Compte tenu des paramètres considérés dans cet exemple, la valeur de R_S est inférieure à 4%, ce qui, d'après la formule (19), correspond à un niveau de dégradation de la liaison inférieur à 1,88%.

FIGURE 4

Variations de $(\Delta T/T)_{long}$ et de R_S en fonction du paramètre \tilde{E} de la formule (21) pour $\theta_{space} = 4^\circ$ et $\sigma = 0,5^\circ$

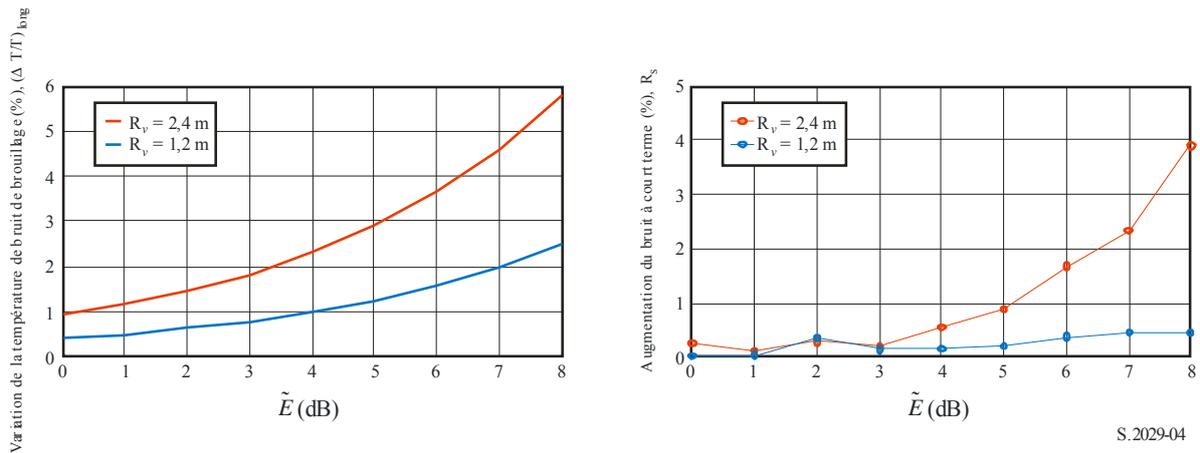
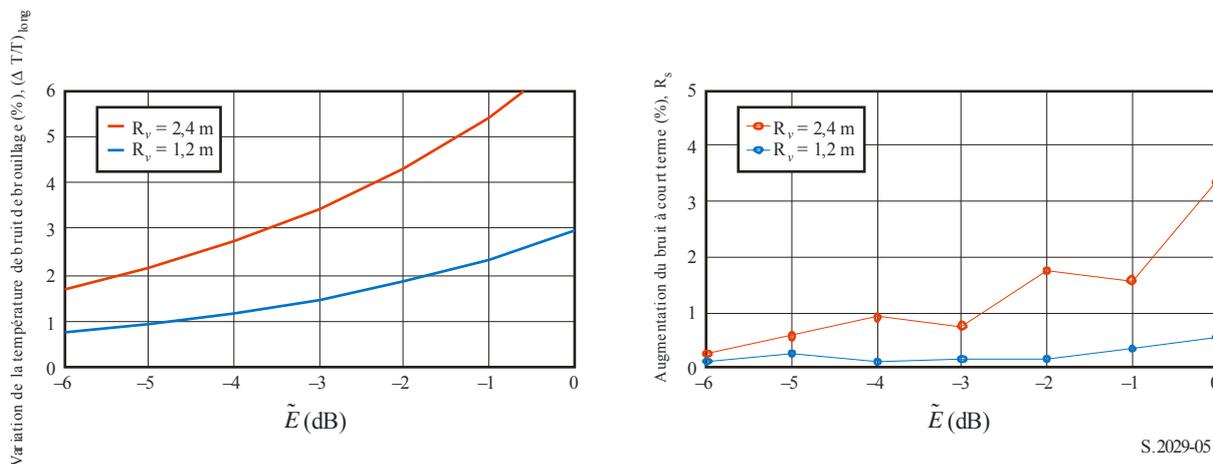


FIGURE 5

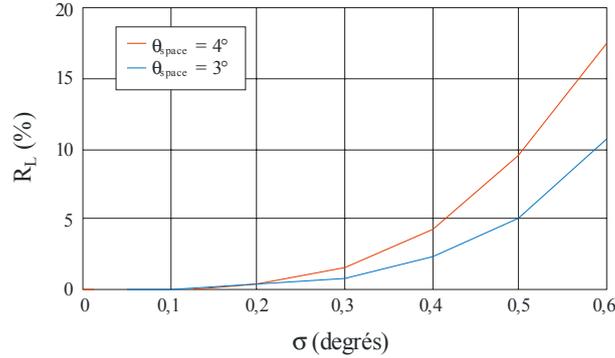
Variations de $(\Delta T/T)_{long}$ et de R_S en fonction du paramètre \tilde{E} de la formule (21) pour $\theta_{space} = 3^\circ$ et $\sigma = 0,5^\circ$



La valeur de R_L utilisé dans la formule (20) est représentée sur la Fig. 6 pour différentes valeurs de σ . Comme indiqué auparavant, pour des valeurs de T_{long} suffisamment grandes, les variations de R_L sont négligeables en l'absence d'erreurs de pointage de l'antenne. Il ressort de cette figure que R_L augmente progressivement lorsque σ augmente.

FIGURE 6

Variation de R_L en fonction de l'écart type des erreurs de pointage de l'antenne pour des espacements orbitaux de 3° et de 4°



S.2029-06

12 Conclusions

Une nouvelle approche statistique d'évaluation du brouillage d'un système variable dans le temps constitué d'un réseau de stations terriennes fonctionnant en mode d'accès multiple par répartition dans le temps a été décrite dans la présente Annexe. Les résultats donnent une idée de la dégradation potentielle pour un réseau à satellite brouillé et montrent que les niveaux d'émission des terminaux du réseau brouilleur peuvent être ajustés pour respecter le niveau de brouillage admissible et les objectifs de qualité de fonctionnement du système à satellites brouillé. L'Appendice à la présente Annexe donne un exemple de méthode par étapes d'estimation de la fonction CDF de $(\Delta T/T)_{long}$ et de R_S .

Appendice

Exemple de méthode par étapes d'estimation de la fonction CDF

de $(\Delta T/T)_{long}$ et de R_S

Le présent Appendice donne un exemple de méthode par étapes d'estimation de la fonction CDF de $(\Delta T/T)_{long}$ dont l'expression est donnée au § 3 et de l'augmentation relative de la dégradation due au brouillage à court terme, R_S , d'après la formule (19) de l'Annexe. Les valeurs sont estimées pour un niveau donné de densité de p.i.r.e. hors axe. La méthode présentée ici est basée sur des simulations de Monte-Carlo.

1 Entrées de la méthode d'estimation

Entrée 1. Paramètres des liaisons par satellite

Longueurs d'onde sur la liaison montante et sur la liaison descendante λ_u, λ_d ; longitudes de S_v, S_i ; paire latitude et longitude au niveau de C_i, C_v ; diagrammes de gain d'antenne de réception $G_{r,i}^s, G_{r,v}^s$; températures de bruit Θ_i^s, Θ_v^s ; gains de transmission γ_i, γ_v .

Température de bruit Θ_v .

Entrée 2. Terminaux brouilleurs

Fonction PDF de la distribution spatiale des terminaux p_r ; fonction PDF de la distribution de densité de p.i.r.e. p_E . Il est à noter que la densité de p.i.r.e. dépend de la taille de l'ouverture du terminal et de la limite de densité de p.i.r.e. hors axe considérée.

Erreurs de pointage de l'antenne: fonctions PDF des composantes d'azimut et d'élévation de l'erreur de pointage de l'antenne, p_{ϕ_a} , p_{ϕ_e} . Sinon, ces composantes peuvent être disponibles sous la forme de vecteurs de longueur N_{mc} (définie dans l'entrée 5), $\{\phi_{r,a}\}$, $\{\phi_{r,e}\}$.

Diagramme d'émission des terminaux: fonction PDF de la durée d'émission des terminaux, p_τ , où τ est la durée d'émission d'un terminal comme indiqué au § 6.

Entrée 3. Paramètres relatifs à la pluie

Intensité de pluie, altitude au-dessus du niveau moyen de la mer et hauteur de pluie aux emplacements de T_v , R_v , et au centre représentatif de la Région R défini par p_r . Ces paramètres peuvent être calculés à l'aide des Recommandations UIT-R P.837 et UIT-R P.839.

Température de bruit du ciel dû à la pluie Θ_r .

Entrée 4. Paramètres nécessaires pour calculer les niveaux de brouillage à court terme et à long terme

Intervalle d'observation pour le brouillage à long terme, T_{long} ; pourcentage de temps pour les dégradations de liaison dans les objectifs de qualité de fonctionnement à court terme, $p_i\%$; et pourcentage de temps maximal pour le brouillage à court terme, $p_{short}\%$.

Entrée 5. Paramètre de simulation de Monte-Carlo: taille d'échantillon du vecteur aléatoire N_{mc}

2 Estimation de la fonction CDF de $(\Delta T/T)_{long}$

Etape 1. Générer les durées d'émission des terminaux brouilleurs

Générer N_{long} durées d'émission, $\{\tau_n\}$, d'après la fonction PDF, p_τ , de sorte que la somme de toutes les durées d'émission satisfasse $\sum_{n=1}^{N_{long}-1} \tau_n < T_{long} \leq \sum_{n=1}^{N_{long}} \tau_n$.

Etape 2. Générer les terminaux d'émission brouilleurs

- Générer le vecteur d'emplacement à N_{long} dimensions $\{r\}$ d'après la fonction PDF p_r .
- Choisir la densité de p.i.r.e. du terminal à chaque emplacement r d'après la fonction PDF p_E .

Etape 3. Calculer les termes de brouillage $I_i(r)$ et $I_v(r)$

- Angle $\psi_{r,v}$. Celui-ci est calculé en utilisant les latitudes et longitudes en r , S_i et S_v .
- Angles $\delta_{i,r}$ et $\delta_{v,r}$. Ceux-ci sont calculés en utilisant les latitudes et les longitudes en r , S_i , S_v , C_i et C_v .
- Calculer l'affaiblissement sur la liaison montante $L_{u,r}$.
- Calculer le signal de brouillage $(I_i(r) + I_v(r))$ à l'aide de la formule (8). Il est à noter que $B_r G_{t,r}(\psi_{r,v})$ est la densité de p.i.r.e. dans la direction de S_v et $B_r G_{t,r}(0)$ est la densité de p.i.r.e. dans la direction de S_i .

Le vecteur à N_{long} dimensions obtenu en calculant $\{I_i(r) + I_v(r)\}$ à tous les emplacements $\{r\}$ donne les valeurs instantanées du brouillage en l'absence d'erreurs de pointage de l'antenne.

Etape 4. Calculer le brouillage à long terme \tilde{I}_{long}

a) Construire le signal de brouillage, $\tilde{I}_{tot,0}(t)$, en fonction du temps comme décrit au § 7.

$\tilde{I}_{tot,0}(t) = \sum_{n=1}^{N_{long}} (I_i(r_n) + I_v(r_n)) q_{\tau_n}(t - t_n)$, où r_n est la $n^{ième}$ composante de $\{r\}$, $t_1 = 0$ et $t_n = \sum_{i=1}^{n-1} \tau_i$.

b) Calculer $\tilde{I}_{long} = \frac{1}{T_{long}} \int_{t=0}^{T_{long}} \tilde{I}_{tot,0}(t) dt$.

Etape 5. Estimer la fonction CDF de $(\Delta T/T)_{long}$

a) Construire un vecteur à N_{mc} dimensions $\{\tilde{I}_{long}\}$ en répétant N_{mc} fois les étapes 1 à 4 ci-dessus.

b) Construire le vecteur à N_{mc} dimensions $\{(\Delta T/T)_{long}\}$ en utilisant (1) et le vecteur $\{\tilde{I}_{long}\}$.

c) Estimer la fonction CDF du vecteur $\{(\Delta T/T)_{long}\}$.

3 Estimation de R_s

Etape 1. Générer les terminaux d'émission brouilleurs

a) Générer le vecteur d'emplacement à N_{mc} dimensions $\{r\}$ d'après la fonction PDF p_r .

b) Choisir la densité de p.i.r.e. du terminal à chaque emplacement r d'après la fonction PDF p_E .

Etape 2. Calculer le vecteur de brouillage à N_{mc} dimensions $\{I_i(r) + I_v(r)\}$

Suivre l'étape 3 du § 2 ci-dessus.

Etape 3. Fonction CDF de \bar{Z}_s

a) Déterminer les variables c_1, c_2 et c_3 données au § 8.1 en utilisant les paramètres de liaison par satellite et le vecteur à N_{mc} dimensions $\{\tilde{I}_{long}\}$ estimé à l'étape 5 du § 2 ci-dessus.

b) Déterminer les variables d_1, d_2 et d_3 en utilisant c_1, c_2 et c_3 comme indiqué au § 8.1. Il est à noter que d_1, d_2 et d_3 sont des vecteurs à N_{mc} dimensions.

c) Générer les vecteurs d'affaiblissement dû à la pluie à N_{mc} dimensions $\{\bar{A}_\uparrow\}, \{\bar{A}_{\uparrow,i}\}$ et $\{\bar{A}_\downarrow\}$ en utilisant la Recommandation UIT-R P.618-8. Ici, $\{\bar{A}_{\uparrow,i}\}$ correspond à un emplacement unique représentatif de la Région R comme défini par la fonction PDF p_r .

d) Pour chaque réalisation de $(\bar{A}_\uparrow, \bar{A}_{\uparrow,i}, \bar{A}_\downarrow)$ et (d_1, d_2, d_3) , calculer \bar{Z}_s d'après la formule (15), ce qui donne un vecteur à N_{mc} dimensions pour \bar{Z}_s .

e) Estimer la fonction CDF de $\bar{Z}_s, P_{\bar{Z}_s}(\bar{z})$, en utilisant ce vecteur.

Etape 4. Fonction CDF de \bar{Z}_t

a) Générer le vecteur d'erreur de pointage de l'antenne à N_{mc} dimensions $\{\phi_r\}$

Générer les vecteurs à N_{mc} dimensions $\{\phi_{r,a}\}$ et $\{\phi_{r,\epsilon}\}$ en utilisant les fonctions PDF respectives, $p_{\phi_a}, p_{\phi_\epsilon}$. Pour chaque réalisation de $(\phi_{r,a}, \phi_{r,\epsilon})$, calculer ϕ_r en utilisant la procédure décrite dans l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R S.1857.

b) Générer le vecteur de brouillage à N_{mc} dimensions $\{I_i(r) + I_v(r)\}$ d'après la formule (16)

Pour chaque réalisation de r et ϕ_r , calculer $I_i(r)$ et $I_v(r)$ d'après la formule (16). Construire le vecteur de brouillage à N_{mc} dimensions à partir des résultats de ce calcul.

- c) Calculer le vecteur à N_{mc} dimensions \bar{Z}_t d'après la formule (18).
- d) Estimer la fonction CDF de \bar{Z}_t , $P_{\bar{Z}_t}(\bar{z})$, en utilisant ce vecteur.

Etape 5. Estimer R_s .

- a) Calculer la marge de liaison nécessaire dans des conditions d'évanouissements dus à la pluie et en présence de brouillage à long terme, \bar{z}_j , de sorte que la durée maximale autorisée pour les dégradations soit de $p_j\% \times (1 - p_{short}/100)$ du temps

$$(1 - P_{\bar{z}_s}(\bar{z}_j)) = p_j \times (1 - p_{short} / 100).$$

- b) Calculer la durée de dégradation de la liaison en présence de brouillage total pour cette marge de liaison, $(1 - P_{\bar{z}_i}(\bar{z}_j))$.
 - c) Calculer R_s en utilisant la formule (19).
-