

RECOMMANDATION UIT-R S.1325

**MÉTHODE DE SIMULATION POUR L'ÉVALUATION DU BROUILLAGE À COURT TERME
ENTRE DES RÉSEAUX À SATELLITES NON GÉOSTATIONNAIRES DU SERVICE
FIXE PAR SATELLITE (SFS NON OSG) UTILISANT LES MÊMES FRÉQUENCES
DANS LE MÊME SENS ET D'AUTRES RÉSEAUX SFS NON OSG OU OSG**

(Questions ITU-R 206/4 et UIT-R 231/4)

(1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les émissions des stations terriennes ainsi que de la station spatiale d'un réseau à satellite (SFS OSG; SFS non OSG; liaisons de connexion du service mobile par satellite (SMS) non OSG) du SFS peuvent causer des brouillages à un autre réseau de même type lorsque les deux réseaux exploitent les mêmes bandes;
- b) qu'il est souhaitable de disposer d'une méthode commune de simulation pour l'évaluation des brouillages entre des systèmes dont les liaisons de connexion utilisent les mêmes fréquences dans le même sens, lorsque l'un des systèmes est un système non OSG;
- c) qu'il est possible d'utiliser certaines hypothèses simplificatrices pour de tels systèmes;
- d) que la simplification visée au § b) ne doit pas se répercuter sur les résultats obtenus;
- e) qu'il serait souhaitable de disposer d'un ensemble de paramètres d'entrée communs pour chacun des deux systèmes de communication;
- f) qu'il est nécessaire, dans l'élaboration d'une telle méthode, de prendre en considération les divers types de compensation des évanouissements du signal, notamment des systèmes de commande adaptative de puissance;
- g) que la méthode doit permettre de calculer avec précision la dépendance temporelle d'un seul phénomène de brouillage, de telle sorte qu'il soit possible d'évaluer de façon plus précise son incidence sur le système brouillé;
- h) que la vaste majorité des réseaux SFS non OSG sont placés en orbites circulaires,

recommande

- 1** d'envisager d'utiliser la méthode exposée à l'Annexe 1 pour obtenir des statistiques de probabilité cumulative permettant d'évaluer les configurations de brouillage à court terme observable lorsque plusieurs systèmes sont dotés de liaisons utilisant les mêmes fréquences dans le même sens, lorsque, pour l'un des systèmes, on considère une liaison de connexion SMS non OSG ou un réseau SFS non OSG;
- 2** d'évaluer les résultats obtenus par référence à un ensemble convenu de statistiques communes;
- 3** de considérer que les Notes suivantes font partie de la présente Recommandation.

NOTE 1 – On entend par brouillage à court terme la distribution de probabilité cumulative de taux d'erreur binaire (ou de valeurs de rapport C/N) calculés pour 1% du temps ou moins.

NOTE 2 – La méthode exposée à l'Annexe 1 pourra également être utilisée pour évaluer le profil temporel du brouillage pendant une seule occurrence quasi en ligne.

NOTE 3 – On supposera que le bruit est de nature thermique et qu'il est rapporté à la puissance totale de bruit du système, y compris le bruit thermique de l'antenne à l'entrée du démodulateur.

NOTE 4 – Il est nécessaire d'établir une méthode permettant de caractériser et de calculer les brouillages à long terme entre réseaux SFS non OSG et réseaux SFS OSG.

NOTE 5 – L'Annexe 2 décrit et illustre la méthode de calcul.

NOTE 6 – On trouvera à l'Annexe 3 une liste de thèmes pour la poursuite des travaux relatifs à la présente Recommandation.

Méthode d'évaluation des brouillages à court terme entre réseaux SFS non OSG fonctionnant sur les mêmes fréquences et dans la même direction et autres réseaux SFS non OSG ou réseaux SFS OSG

1 Description de la méthode et du principe de simulation

La méthode exposée ci-après consiste à modéliser les systèmes à satellites sur orbite et à reconstituer l'activité de poursuite de chaque station spatiale et de chaque station terrienne tout en tenant compte de la rotation de la Terre. Pendant la simulation, on procède à un échantillonnage temporel de résolution relativement fine. On calcule le produit distance/gain pour chaque échantillon. Les données brutes donnent le profil chronologique du niveau de brouillage en fonction du temps. On montre que lorsqu'aucun système n'est doté d'une commande de puissance, le produit distance/gain (défini dans l'équation (2)) est directement lié au niveau de brouillage. A partir des données brutes, on peut aussi calculer le pourcentage de temps pendant lequel le produit distance/gain correspondant à l'ensemble des trajets de brouillage est supérieur à un certain niveau. La Fig. 1 illustre la configuration de brouillage, les trajets de brouillage considérés étant les suivants:

	Station spatiale (Constellation 1)	Station terrienne (Constellation 1)
Station spatiale (Constellation 2)	Aucune	Liaison montante ₁ → liaison montante ₂ Liaison descendante ₂ → liaison descendante ₁
Station terrienne (Constellation 2)	Liaison descendante ₁ → liaison descendante ₂ Liaison montante ₂ → liaison montante ₁	Aucune

Pour calculer le rapport brouillage-bruit I_0/N_0 , on peut utiliser l'équation suivante:

$$\begin{aligned} \frac{I_0}{N_0} &= \frac{P_t}{BW_{tx}} G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \\ &= \frac{P_t}{BW_{tx}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \frac{G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2)}{4\pi R^2} \end{aligned} \quad (1)$$

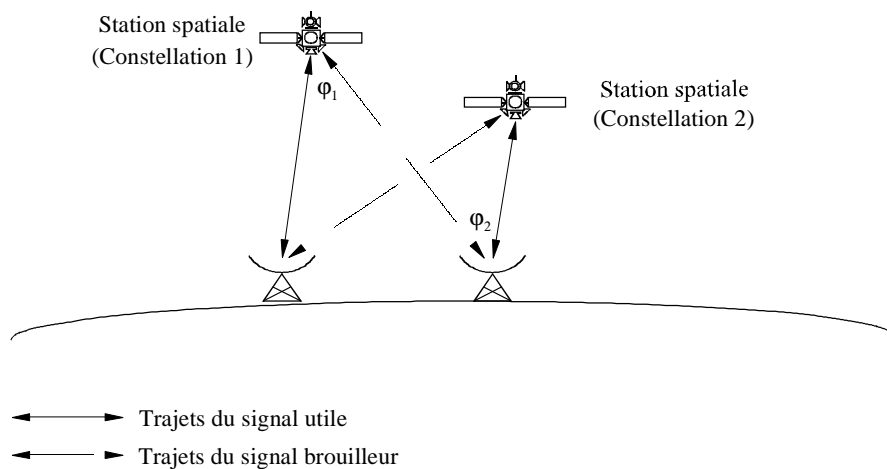
où:

- P_t : puissance d'émission disponible (W)
- BW_{tx} : largeur de bande à l'émission (Hz)
- $G_t(\varphi_1)$: gain à l'émission (intensité relative)
- $G_r(\varphi_2)$: gain à la réception (intensité relative)
- φ_1 : angle de visée hors axe de l'émetteur en direction du récepteur
- φ_2 : angle de visée hors axe du récepteur en direction de l'émetteur
- λ : longueur d'onde de l'émetteur (m)
- R : distance (m)
- k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
- T : température de bruit (K)
- L_p : facteur de découplage de polarisation

En l'absence d'une commande de puissance permettant de compenser les variations sur les liaisons établies entre la station spatiale et la station terrienne, les seuls éléments de l'équation (1) qui sont des variables dépendantes dans la simulation temporelle sont l'angle de gain à la réception, l'angle de gain à l'émission et la distance entre l'émetteur et le récepteur. Pour calculer I_0/N_0 , on peut multiplier le produit distance/gain par la constante:

$$\frac{P_t}{BW_{tx}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p}$$

FIGURE 1
Configuration de brouillage



1325-01

Par exemple, le produit distance/gain correspondant au couple liaison descendante de station spatiale 1/liaison descendante de station terrienne 2 (Fig. 1) correspond à:

$$\frac{G_t(\phi_1) G_r(\phi_2)}{4\pi R^2} \quad (2)$$

2 Hypothèses de simulation

2.1 Modèle d'orbite

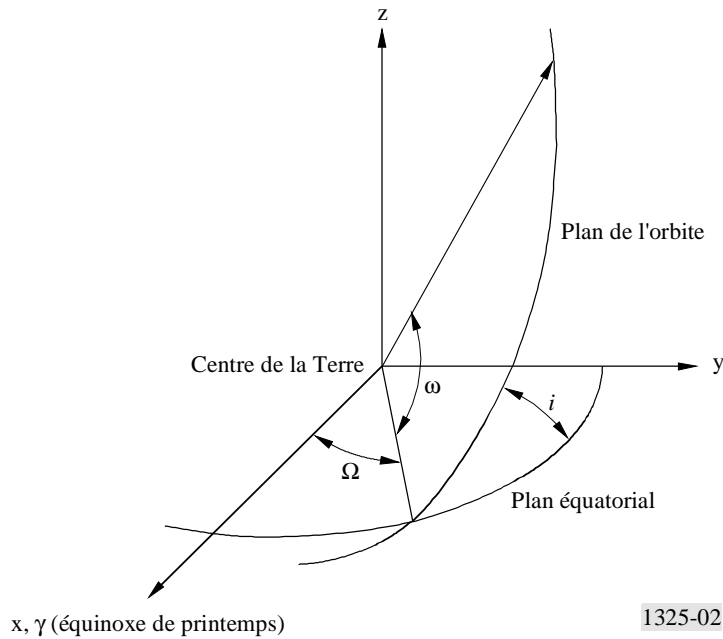
On utilise dans la simulation des stations spatiales un modèle d'orbite circulaire dans lequel on ne tient compte que de la précession de la ligne de nœuds, dans le plan équatorial, due à l'asphéricité de la Terre.

2.1.1 Discussion

Le modèle orbital représente le mouvement du satellite dans un système de coordonnées géocentrique inertiel (voir la Fig. 2). L'origine de ce système inertiel est le centre de la Terre. L'axe des x est orienté sur le premier point de la constellation Aries (γ , équinoxe de printemps), l'axe des z est l'axe de rotation moyen de la Terre, enfin l'axe des y est l'ensemble des produits croisés des vecteurs unité dans les directions z et x: $\vec{y} = \vec{z} \cdot \vec{x}$.

FIGURE 2

Représentation des éléments d'une orbite dans un système de Kepler



Le modèle d'orbite est fondé sur l'équation du mouvement de Newton, pour un satellite en orbite circulaire autour d'une Terre parfaitement sphérique. Deux caractéristiques de ce mouvement le rendent facile à modéliser: le rayon orbital et la vitesse du satellite sont constants. Ces paramètres sont reliés par la deuxième loi de Newton. L'équation du mouvement est:

$$\frac{m_{sv} v^2}{r} = \frac{G M_E m_{sv}}{r^2} \quad (3)$$

où:

m_{sv} : masse de la station spatiale

v : vitesse constante de la station spatiale

G : constante gravitationnelle de Newton ($6,673 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$)

r : rayon de l'orbite

M_E : masse de la Terre ($5,974 \times 10^{24} \text{ kg}$).

L'équation (3) peut être reformulée comme suit:

$$v^2 = \frac{G M_E}{r} = \frac{G M_E}{R_E^2} \frac{R_E^2}{r} \quad (4)$$

R_E étant le rayon d'une Terre parfaitement sphérique (6 378 km). Du fait qu'à la surface de la Terre on a:

$$m g = \frac{G M_E m}{R_E^2} \quad (5)$$

g étant l'accélération gravitationnelle à la surface de la Terre:

$$g = \frac{G M_E}{R_E^2} = 9,806 \text{ m/s}^2 \quad (6)$$

il apparaît que l'équation (4) peut être reformulée comme suit:

$$v^2 = g \frac{R_E^2}{r} \quad (7)$$

ou encore:

$$v = R_E \sqrt{\frac{g}{r}} \quad (8)$$

La période de l'orbite, T , est donnée par:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{R_E} \sqrt{\frac{r^3}{g}} \quad (9)$$

Ces équations décrivent intégralement la dynamique du mouvement sur une orbite circulaire autour d'une Terre parfaitement sphérique.

Dans la description de ce mouvement dans le système de coordonnées géocentrique de la Fig. 2, on spécifie la position du satellite à l'aide des paramètres orbitaux du système de Kepler. Ces variables sont définies comme suit:

Ω : ascension droite du nœud ascendant de l'orbite (RAAN). L'angle est mesuré dans le plan équatorial (plan x-y) à partir de l'axe des x

i : inclinaison de l'orbite. Cet angle est mesuré entre le plan équatorial et le plan orbital de la station spatiale

a : anomalie vraie. Il s'agit de l'angle entre la ligne de nœuds et le vecteur rayon à la position de l'engin spatial.

On notera que l'anomalie vraie est fonction de la position angulaire de la station spatiale à l'instant t_0 et de la vitesse angulaire de la station spatiale. Cette variable peut s'exprimer comme suit:

$$a = a_0 + at \quad (10)$$

où:

a_0 : position angulaire de la station spatiale à l'instant t_0

a : vitesse angulaire de la station spatiale (rad/s)

$$= v/r.$$

Pour tenir compte de la précession de l'orbite, le RAAN de l'orbite est également fonction du RAAN à l'instant t_0 et de la vitesse de précession orbitale. Selon l'expression suivante:

$$\Omega = \Omega_0 + bt \quad (11)$$

où:

Ω_0 : RAAN de la station spatiale à l'instant t_0 ,

b : vitesse de précession orbitale de la station spatiale (rad/s)

$$b = 2,018 e - 6 \left(\frac{r}{R_E} \right)^{-3,5} \cos i \quad (12)$$

La représentation de la position de la station spatiale dans le système de coordonnées inertiel géocentrique est de forme:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \Omega \cos \omega - \sin \Omega \cos i \sin \omega \\ \sin \Omega \cos \omega + \cos \Omega \cos i \sin \omega \\ \sin i \sin \omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.2 Paramètres d'antenne

2.2.1 Paramètres d'antenne de station terrienne et de station spatiale non OSG

Les diagrammes d'antenne de station terrienne sont des données de la simulation. Les diagrammes suivants sont suggérés (liste non limitative):

- Diagrammes d'antenne mesurés
- Appendice 29 [S8] du Règlement des radiocommunications (RR)
- Recommandation UIT-R S.465
- Recommandation UIT-R S.672.

2.2.2 Diagrammes d'antenne de station spatiale OSG

Alors que la station spatiale OSG peut être dotée d'une antenne à faisceau modelé, les diagrammes d'antenne de ce type de station ne sont pas requis pour la simulation. Les paramètres nécessaires sont le gain de réception et d'émission de la station spatiale OSG en direction de la station terrienne non OSG. En effet, la position de la station terrienne non OSG est constante par rapport à la station spatiale OSG, de sorte que le gain de réception et d'émission de cette dernière est constant en direction de la station terrienne non OSG.

2.3 Découplage de polarisation

Le facteur de découplage de polarisation, L_p , exprime la valeur du découplage de polarisation que l'on peut supposer entre l'émetteur et le récepteur (voir l'Annexe 3).

2.4 Hypothèses de travail

2.4.1 Sélection de la station spatiale non OSG

Le processus de sélection de la station spatiale dont traite le présent paragraphe consiste à établir une liaison avec le satellite qui est visible par la station terrienne pendant la période de temps la plus longue. En procédant de la sorte, on minimise le nombre de relais dans le flux de données. Lorsqu'un système à satellites est conçu pour offrir plusieurs satellites en vue de la station terrienne pendant une période de temps relativement longue, on peut imposer une contrainte additionnelle d'optimisation qui concernerait l'évitement des brouillages ou la diversité.

On suppose que la station terrienne, associée à une constellation, poursuit la station spatiale correspondante dès que la liaison de communication est établie. Lorsque cette station spatiale se trouve en dehors de l'angle d'élévation minimal, on suppose qu'il est possible d'atteindre la station spatiale suivante avant le prochain pas temporel de la simulation. Lorsque plusieurs stations spatiales peuvent être atteintes au pas temporel suivant, l'algorithme de sélection de la station spatiale suivante utilise le vecteur tracé entre la station terrienne et la station spatiale candidate, \vec{r} , et le vecteur unité orienté selon le mouvement des stations spatiales, \vec{v} . Le critère de sélection répond donc à l'expression suivante:

$$\min_{\substack{\text{Tous les satellites situés au-dessus} \\ \text{de l'angle d'élévation minimal}}} \vec{r} \cdot \vec{v} \quad (14)$$

Cette procédure est illustrée à la Fig. 3. La vue de haut montre le déplacement \vec{v}_1 de la station spatiale vers la station terrienne. Dans ce cas, le produit est négatif, et cette station est retenue de préférence à l'autre station spatiale. (Voir l'Annexe 3).

2.4.2 Commande de puissance en fonction de la distance

Le système de commande de puissance dont sont dotées certaines stations spatiales non OSG, permet de tenir compte des différences de distance (entre la station terrienne et la station spatiale). Le présent paragraphe décrit un algorithme de commande de puissance en fonction de la distance, qui repose sur le principe suivant: la station émettrice réduit ou accroît sa puissance d'émission selon que le récepteur se rapproche ou s'éloigne de l'émetteur – en d'autres termes, la puissance reçue est maintenue constante. Pour la simulation, le paramètre à connaître est la densité de puissance que l'on souhaite recevoir à l'entrée de l'antenne utile, P_r (dB(W/Hz)). Cette puissance à la réception peut être formulée comme suit:

$$P_r = \frac{P_t(R)}{BW_{tx}} G_t(0) \left(\frac{\lambda}{4\pi R_w} \right)^2 \quad (15)$$

R_w étant la longueur du trajet du signal utile (soit la distance entre la station terrienne et la station spatiale de la constellation 1), tandis que $P_t(R)$ est la puissance d'émission requise pour établir la liaison. P_r peut être lié au rapport porteuse/bruit au niveau du récepteur utile par l'expression:

$$C_0/N_0 = \frac{P_r(R) G_{rw}(0)}{k T_w} = \frac{P_t(R)}{BW_{tx}} \frac{G_t(0) G_{rw}(0)}{k T_w} \left(\frac{\lambda}{4\pi R_w} \right)^2 \quad (16)$$

où:

$G_{rw}(0)$: gain maximal à la réception du signal utile au niveau du satellite

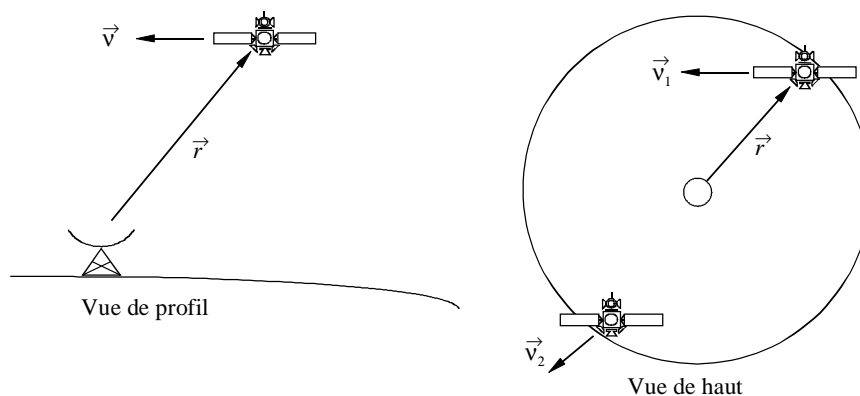
T_w : température de bruit du récepteur utile.

Avec une commande de puissance en fonction de la distance, l'équation de calcul du niveau de brouillage peut s'exprimer comme suit:

$$\begin{aligned} I_0/N_0 &= \frac{P_t(R)}{BW_{tx}} G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \\ &= P_r \frac{G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2)}{G_t(0)} \left(\frac{R_w}{R} \right)^2 \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \end{aligned} \quad (17)$$

FIGURE 3

Critère de sélection de la prochaine station spatiale devant assurer la liaison de communication avec la station terrienne



1325-03

2.5 Données

Les paramètres qui doivent être connus pour chacun des deux systèmes de communication sont les suivants:

2.5.1 Paramètres orbitaux

- Nombre de stations spatiales
- Nombre de plans
 - Altitude de l'orbite
 - Inclination des plans
 - Ascension droite du nœud ascendant
 - Anomalie de la première station spatiale dans chaque plan (toutes les autres stations spatiales du plan considéré étant également espacées).

2.5.2 Paramètres d'antenne

– Station spatiale

Dans le cas d'un système non OSG:

- diagramme d'antenne
- gain maximal à l'émission (dBi)
- gain maximal à la réception (dBi)

Dans le cas d'un système OSG:

- gain à l'émission (dBi) dans la direction de la station terrienne non OSG
- gain à la réception (dBi) dans la direction de la station terrienne non OSG

– Station terrienne

- Diagramme d'antenne
- Gain maximal à l'émission (dBi)
- Gain maximal à la réception (dBi)
- Position (latitude, longitude).

2.5.3 Paramètres d'exploitation et de calcul

- Angle de l'élévation minimal de communication
- Début de la période de simulation
- Fin de la période de simulation (voir le § 2.7)
- Pas temporel de simulation (voir le § 2.7)
- Précession (voir le § 2.7)
- Dans le cas d'un système non OSG avec commande de puissance en fonction de la distance: densité de puissance souhaitée à la réception à l'entrée de l'antenne utile (dB(W/Hz)).

2.6 Résultats

Les données brutes obtenues après simulation constituent un profil temporel du rapport brouillage/bruit (I_0/N_0). Après analyse, ces données permettent d'obtenir les informations suivantes:

- représentation graphique du rapport brouillage/bruit, I_0/N_0 (dB), en fonction du pourcentage de temps de dépassement de ce niveau (sur échelle logarithmique);
- profil chronologique des occurrences de brouillage maximal, I_0/N_0 en fonction du temps;
- nombre d'occurrences de dépassement d'un niveau prédéfini du rapport brouillage/bruit, et durée des phénomènes. Par exemple, si le niveau prédéfini est de -1 dB, le phénomène commence lorsque le niveau de brouillage dépasse -1 dB et se termine lorsqu'il retombe en dessous de cette valeur, l'intervalle de temps ainsi défini correspondant à la durée du phénomène. On obtient ainsi une indication de la durée de dépassement d'un niveau prédéterminé.

2.7 Calcul de la durée totale de la simulation, du pas temporel de simulation et de la précession

2.7.1 Introduction

La méthode de calcul décrite dans le présent paragraphe peut être utilisée pour simuler des brouillages causés par un satellite non OSG à une station terrienne du SFS OSG ou par une station terrienne non OSG à un satellite du SFS OSG. Les méthodes de calcul applicables à d'autres configurations de brouillage ou à des orbites elliptiques appellent un complément d'étude (voir l'Annexe 3).

2.7.2 Pas temporel de simulation

Pour obtenir des résultats précis, il convient d'adopter un pas temporel de simulation aussi court que possible, mais par ailleurs la durée totale de la simulation doit être raisonnable. Pour obtenir des précisions comparables d'une simulation à l'autre, on pourra lier la valeur de l'incrément à l'ouverture du faisceau d'antenne des systèmes qui subissent le brouillage.

Dans un système de coordonnées fixes par rapport à la Terre, la vitesse d'un satellite dépend de la latitude du point subsatellite, mais la variation peut être négligée en l'occurrence et l'on peut utiliser la vitesse la plus élevée à l'équateur dans le calcul. La vitesse angulaire du satellite vu d'un point quelconque de la Terre est la plus élevée lorsque le satellite se déplace directement de ce point, ou s'en éloigne directement. Les équations suivantes permettent de calculer la vitesse angulaire:

$$a = \sqrt{(a_s \cos I - a_e)^2 + (a_s \sin I)^2}$$

$$\theta_\varepsilon = \arccos \left(\frac{R}{R + h} \cos \varepsilon \right) - \varepsilon$$

$$\Delta t = \frac{\Phi_{3 \text{ dB}}}{N_{hits} a} \frac{\sin \theta_\varepsilon}{\cos \varepsilon}$$

avec:

- a : vitesse angulaire du satellite dans un système de coordonnées fixes par rapport à la Terre (système de coordonnées de référence géosynchrone géocentrique)
- a_e : vitesse angulaire de rotation de la Terre à l'équateur
- a_s : vitesse angulaire du satellite dans un système de coordonnées spatiales fixes (système de coordonnées de référence héliosynchrone géocentrique)
- I : inclinaison de l'orbite du satellite
- θ_ε : angle géocentrique entre la station terrienne qui subit le brouillage et le point subsatellite lorsque le satellite se trouve dans l'axe du faisceau principal de la station terrienne
- R : rayon de la Terre
- h : altitude du satellite
- ε : élévation de l'antenne de la station terrienne
- $\Phi_{3 \text{ dB}}$: ouverture du faisceau de la station terrienne à 3 dB
- N_{hits} : nombre d'occurrences observées dans le faisceau de la station brouillée à 3 dB ($N_{hits} = 5$)
- Δt : pas temporel de simulation.

2.7.3 Précession et durée totale de la simulation

Un satellite appartenant à une constellation non OSG sur orbite circulaire détermine un trajet sur la surface de la Terre. Au bout d'un certain temps, propre au système, le satellite, ou un autre satellite de la même constellation, passe à la verticale du même point ou d'un point quasi identique. La durée de cet intervalle de temps est la période de répétition de la constellation. La période de répétition d'une constellation est comprise entre quelques jours et plusieurs mois, selon la constellation.

La durée totale de la simulation et la précession doivent être telles que la distribution des trajets des satellites le long d'un parallèle soit équilibrée et qu'un nombre suffisant de traces traversent le faisceau de la station qui subit le brouillage. A titre de compromis entre la précision et la durée du programme de simulation, on pourra faire en sorte que le nombre de passages dans la zone considérée soit égal au nombre d'occurrences pendant un passage (se reporter à la notion de pas temporel de simulation).

Lorsque la période de répétition est très courte de sorte que le nombre de passages requis dans la zone n'est pas atteint, on fait tourner le programme sur plusieurs valeurs de l'ascension droite initiale du nœud. L'angle entre les ascensions initiales du nœud doit correspondre à l'espacement requis entre passages dans la zone considérée et le nombre de répétitions du programme doit être tel que les ascensions droites initiales d'un plan atteignent le point initial correspondant du plan suivant.

Lorsque la période de répétition est longue, de sorte que le nombre de passages dans la zone considérée est excessivement important, on pourra utiliser une précession artificielle donnant une période de répétition plus brève. Dans ce cas, la p.i.r.e. du satellite ne devrait pas dépendre du temps.

L'effet d'une relation fractionnaire entre une variation de la p.i.r.e. du satellite dépendant d'une phase cyclique et les passages du satellite dans la zone considérée appelle un complément d'étude.

Description de la méthode de calcul, avec exemple

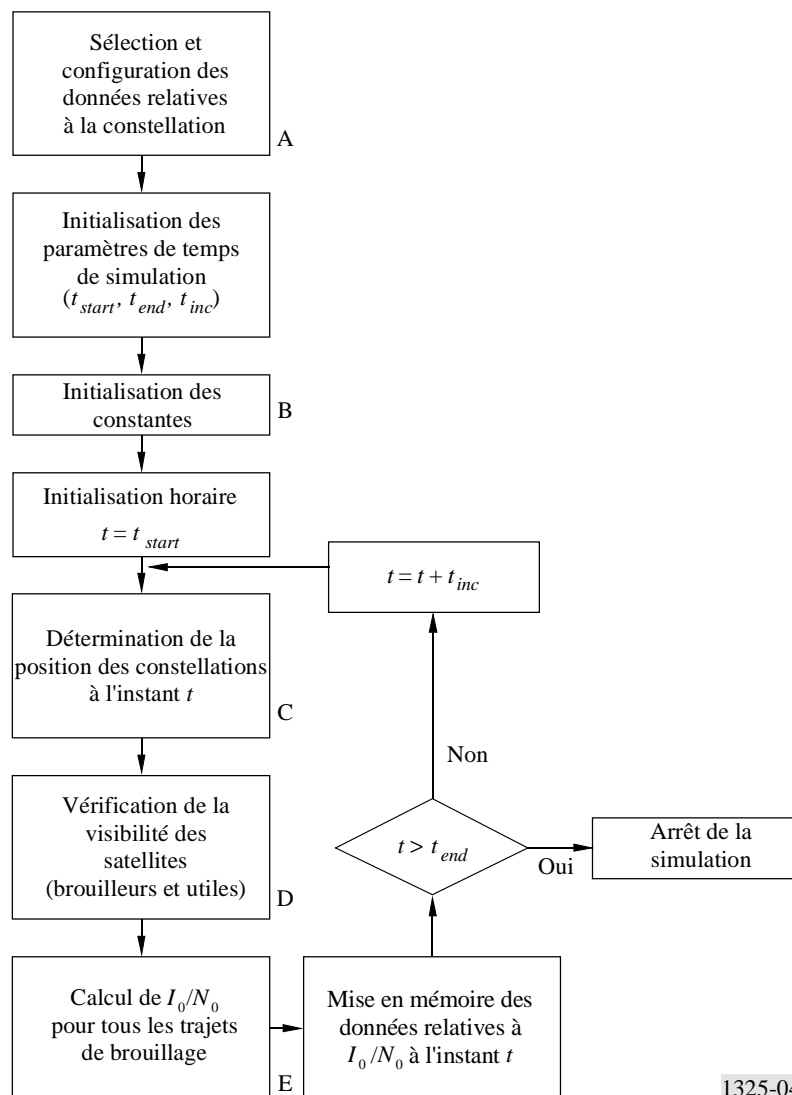
1 Introduction

La méthode décrite dans l'Annexe 1 s'applique à l'aide d'un programme informatique. La présente Annexe décrit une application, complétée par un exemple illustrant les résultats que l'on peut obtenir lorsque l'on utilise la méthode géométrique définie dans l'Annexe 1 pour analyser les brouillages entre un système non OSG et un système à satellite OSG.

2 Description de la méthode de calcul

La Fig. 4 schématise les différentes phases de l'application, structurées en une série de blocs A, B, C, D, E, qui seront décrits plus loin de façon plus détaillée. Pour une efficacité maximale, on calcule simultanément les brouillages observés dans les quatre scénarios de brouillage possible considérés (Annexe 1, § 1). Dans la phase d'évaluation, on compare ensuite les données relatives au rapport I_0/N_0 en fonction du temps obtenues pour chacun des quatre scénarios, mais cette phase d'évaluation n'est pas considérée dans la présente Annexe.

FIGURE 4
Application de la méthode



2.1 Bloc A – Sélection et configuration des constellations

Dans cette phase du programme (voir la Fig. 4, bloc A), on définit les informations relatives aux constellations qui doivent être simulées. Dans l'application considérée, les données nécessaires, définies au § 2.5 de l'Annexe 1, sont mises en mémoire dans une base de données et rappelées pendant la simulation pour chacune des deux constellations devant être simulées. A ce niveau du programme, on peut également envisager de s'écarter de l'ensemble de paramètres normalisés (diagrammes d'antenne différents, modification du lieu géographique de la station terrienne associée à chacune des constellations, ou des valeurs de gain de crête de chaque antenne). Aux fins de la présente illustration, les deux constellations à simuler seront dénommées Const_1 et Const_2.

Cette phase du programme consiste à attribuer et à initialiser la mémoire requise pour simuler la constellation. Cette mémoire est constituée de groupes de données contenant les informations de position de la constellation, de vitesse de la constellation et d'orientation des vecteurs de chaque satellite de la constellation (information d'axe de visée de l'antenne). Se reporter au § 2.1 de l'Annexe 1 qui définit les informations initiales à intégrer dans la configuration pour un modèle d'orbite simple.

Les données requises pour chaque station terrienne ont également un espace mémoire réservé, et sont initialisées pour chaque station associée aux constellations. Les groupes de données associés à chaque station terrienne permettent de connaître à tout moment le satellite de la constellation utile avec lequel la station terrienne communique à l'instant considéré, ainsi que les positions des éventuels satellites brouilleurs et l'angle d'élévation minimal requis pour que la station terrienne puisse communiquer (cet angle, qui est fonction de l'éloignement maximal permettant la communication avec un satellite, est également mis en mémoire avec le groupe de données considéré). Le premier satellite, avec lequel la station terrienne a établi la communication, est également initialisé à ce stade.

2.2 Bloc B – Initialisation des constantes du programme

Pour optimiser l'efficacité d'utilisation des ressources, on ne tient pas compte, dans l'équation de calcul de I_0/N_0 , des constantes de la simulation. Considérons, par exemple, l'équation (1): les variables de cette équation qui n'évoluent pas dans le temps (en supposant que le système ne comporte pas une commande de puissance en fonction de la distance, se reporter au § 2.4.2 de l'Annexe 1) sont:

- P_t : puissance d'émission disponible (W)
- BW_{tx} : largeur de bande à l'émission (Hz)
- λ : longueur d'onde de l'émetteur (m)
- k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
- T : température de bruit (K)
- L_p : facteur de découplage de dépolarisation.

En conséquence, pour chaque trajet de brouillage, on peut calculer les quatre constantes suivantes avant de lancer la simulation par incrémentation:

TABLEAU 1
Constantes de liaison pour la simulation

Trajet de brouillage	Constante
Const_1 liaison descendante → Const_2 liaison descendante	$C_{12d} = \frac{P_{t1d}}{BW_{tx1d}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T_{2d}} \frac{1}{L_{p12d}}$
Const_1 liaison montante → Const_2 liaison montante	$C_{12u} = \frac{P_{t1u}}{BW_{tx1u}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T_{2u}} \frac{1}{L_{p12u}}$
Const_2 liaison descendante → Const_1 liaison descendante	$C_{21d} = \frac{P_{t2d}}{BW_{tx2d}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T_{1d}} \frac{1}{L_{p21d}}$
Const_2 liaison montante → Const_1 liaison montante	$C_{21u} = \frac{P_{t2u}}{BW_{tx2u}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T_{1u}} \frac{1}{L_{p21u}}$

Dans ce Tableau, la notation indiciaire 1d correspond à une liaison descendante de la constellation 1, 2d à une liaison descendante de la constellation 2, 1u à une liaison montante de la constellation 1 et 2u à une liaison montante de la constellation 2. Le facteur de découplage de polarisation correspond à la combinaison émission/réception, de sorte que 12d indique par exemple le découplage de polarisation entre l'émetteur de liaison descendante de la constellation 1 et l'émetteur de liaison descendante de la constellation 2.

Lorsque ces facteurs constants sont calculés, pour des raisons d'efficacité dans le programme, on utilise alors les équations suivantes pour calculer le niveau du rapport I_0/N_0 pour chaque incrément de temps (bloc E).

TABLEAU 2
Calculs de I_0/N_0 sur la base des constantes de liaison

Trajet de brouillage	Niveau de brouillage
Const_1 liaison descendante → Const_2 liaison descendante	$I_0/N_0 = C_{12d} \frac{G_{t1d}(\varphi_1) G_{r2d}(\varphi_2)}{4\pi (R_{12d})^2}$
Const_1 liaison montante → Const_2 liaison montante	$I_0/N_0 = C_{12u} \frac{G_{t1u}(\varphi_1) G_{r2u}(\varphi_2)}{4\pi (R_{12u})^2}$
Const_2 liaison descendante → Const_1 liaison descendante	$I_0/N_0 = C_{21d} \frac{G_{t2d}(\varphi_1) G_{r1d}(\varphi_2)}{4\pi (R_{21d})^2}$
Const_2 liaison montante → Const_1 liaison montante	$I_0/N_0 = C_{21u} \frac{G_{t2u}(\varphi_1) G_{r1u}(\varphi_2)}{4\pi (R_{21u})^2}$

Dans ce Tableau, par exemple, sur le trajet liaison descendante Const_1 → liaison descendante Const_2, les variables sont les suivantes:

$G_{t1d}(\varphi_1)$: gain à l'émission de l'antenne d'émission de liaison descendante de Const_1 (intensité relative)

$G_{r2d}(\varphi_2)$: gain à la réception de l'antenne de réception de liaison descendante de Const_2 (intensité relative)

R_{12d} : distance entre l'émetteur de Const_1 (liaison descendante) et le récepteur de Const_2 (liaison descendante) (m).

Lorsqu'une commande de puissance en fonction de la distance est assurée sur l'une des constellations considérées, ou sur les deux constellations, il y a lieu de procéder aux modifications nécessaires.

2.3 Bloc C – Détermination des positions de la constellation à l'instant t

Pour chaque intervalle de temps, avant tout calcul des niveaux de brouillage, il faut calculer les positions de la constellation. Dans cet exemple, on utilise le modèle d'orbite décrit au § 2.1 de l'Annexe 1. On calcule le vecteur vitesse et le vecteur de position de chaque satellite et on met en mémoire ces données dans le groupe de données défini au titre du bloc A de la simulation. La distance entre la station terrienne et les satellites de la constellation avec lesquels cette station cherche à communiquer est également calculée dans cette phase.

2.4 Bloc D – Vérification de la visibilité des satellites (brouilleurs et utiles)

On repère maintenant le satellite qui communique avec la station terrienne. On considère tout d'abord le satellite avec lequel la station terrienne a communiqué pendant l'intervalle de temps précédent pour vérifier si la station peut poursuivre la communication (c'est-à-dire que l'on compare la distance entre la station terrienne et le satellite avec la distance maximale à laquelle un satellite peut se trouver tout en poursuivant la communication, et si cette distance dépasse la limite, il faut donc poursuivre la communication avec un nouveau satellite). Lorsqu'il faut établir une communication avec un nouveau satellite, on utilise l'algorithme dont il est question au § 2.4.1 de l'Annexe 1 pour choisir un nouveau satellite qui communiquera avec la station terrienne.

Lorsque l'on a calculé la position de chaque station terrienne avec laquelle le satellite communique, on peut calculer les paramètres associés aux brouillages observés entre les systèmes à satellites. Il faut pour cela calculer la longueur des quatre trajets de brouillage ainsi que les angles hors axe associés à ces trajets (voir l'Annexe 1, Fig. 1).

2.5 Bloc E – Calcul du rapport I_0/N_0 pour tous les trajets de brouillage

Il est maintenant possible de calculer les niveaux de brouillage puisque toutes les informations pertinentes ont été calculées précédemment. On détermine donc le niveau de brouillage correspondant aux quatre trajets de brouillage établis entre les deux constellations (Annexe 2, Tableau 2). Les niveaux de brouillage sont mis en mémoire pour analyse ultérieure.

3 Exemple d'application à une configuration de brouillage non OSG et OSG

Le présent paragraphe propose un exemple illustrant les résultats que l'on peut obtenir en utilisant la configuration géométrique définie avec la méthode pour procéder à une analyse des brouillages entre un système non OSG et un système à satellites OSG. L'exemple dont il est question dans la présente Annexe fait intervenir un système LEO-A et un système OSG. Les données associées aux constellations figurent au Tableau 3.

TABLEAU 3

Données de simulation non OSG et OSG

Donnée	Non OSG	OSG
Nombre de stations spatiales	66	1
Nombre de plans	6	1
Altitude de l'orbite (km)	780,6	35 785,4
Inclinaison (degrés)	84,6	0
Ascension droite du nœud ascendant (degrés)	0,0; 31,6; 63,2; 94,8; 126,4; 158,0	261
Anomalie de la première station spatiale dans chaque plan (degrés)	0,0; 16,35; 2,6; 18,95; 5,2; 21,55	0
Angle d'élévation minimal (degrés)	5	–
Diagramme d'antenne de station spatiale	Appendice 29 [S8] du RR	–
Gain maximal à l'émission de la station spatiale (dBi)	26,9	41,5 ¹
Gain maximal à la réception de la station spatiale (dBi)	30,1	41,5 ²
Latitude nord de la station terrienne (degrés:min:s)	33:26:54	
Longitude ouest de la station terrienne (degrés:min:s)	112:04:24	
Diagramme d'antenne de la station terrienne	Appendice 29 [S8] du RR	
Gain maximal à l'émission de la station terrienne (dBi)	56,3	44,5
Gain maximal à la réception de la station terrienne(dBi)	53,2	43,0

- (1) Gain à l'émission de la station spatiale en direction d'une station terrienne non OSG; la valeur de 41,5 dBi correspond au gain en limite de couverture d'un faisceau étroit.
- (2) Gain à la réception de la station spatiale en direction d'une station terrienne non OSG; la valeur de 41,5 dBi correspond au gain en limite de couverture d'un faisceau étroit.

Le Tableau 4 regroupe les paramètres radioélectriques correspondant aux liaisons non OSG et aux liaisons OSG. Dans ce Tableau, les parties laissées en blanc correspondent à des informations non requises pour la simulation. On utilise un système OSG sans commande de puissance en fonction de la distance, si bien que la rangée P_r n'est pas requise; de même, pour le système non OSG avec commande de puissance en fonction de la distance, les paramètres P_r , BW_{rx} et P_f/BW_{rx} ne sont pas requis.

Les résultats donnés aux Fig. 5 à 10 correspondent à une simulation sur 49 jours avec échantillonnage toutes les 2 s. On obtient ainsi plus de 2,1 millions de points d'échantillonnage.

TABLEAU 4

Paramètres radioélectriques des systèmes

Paramètre	Station spatiale non OSG	Station terrienne non OSG	Station spatiale OSG	Station terrienne OSG
P_t (dBW)	–	–	12,5	–5,2
BW_{tx} (MHz)	–	–	125	0,5
P_t/BW_{tx} (dB(W/Hz))	–	–	–68,5	–62,2
P_r (dB(W/Hz))	–216,1	–243,6	–	–
L_p	1	1	1	1
λ (m) à l'émission	0,0154	0,0103	0,0154	0,0103
T (K)	1 295,4	731,4	575	275

Les Fig. 5 et 6 permettent de connaître le rapport de brouillage en fonction du pourcentage de temps pendant lequel les valeurs correspondantes sont observées. La Fig. 5 donne ce rapport pour une configuration dans laquelle le réseau non OSG brouille le réseau OSG, tandis que la Fig. 6 correspond à la configuration inverse.

Les Fig. 7 et 8 indiquent le nombre d'événements (et leur durée) pendant lesquels le rapport de brouillage dépasse un niveau prédéterminé. La Fig. 7 permet de connaître l'incidence exercée par le réseau non OSG sur le réseau OSG (il y a occurrence lorsque I_0/N_0 dépasse –16 dB); la Fig. 8 illustre l'effet du réseau OSG sur le réseau non OSG (il y a occurrence lorsque I_0/N_0 dépasse –1 dB).

Les Fig. 9 et 10 retracent le profil chronologique du rapport de brouillage dans le sens liaison montante OSG vers liaison montante non OSG. Ces graphes sont établis pour la période de temps pendant laquelle le niveau de brouillage atteint son maximum. La Fig. 9 porte sur une période d'1 h graduée, avec graduation par intervalles de 15 min. La Fig. 10 donne le détail de l'événement de brouillage de crête représenté à la Fig. 9.

FIGURE 5

Brouillage causé par un réseau non OSG à un réseau OSG

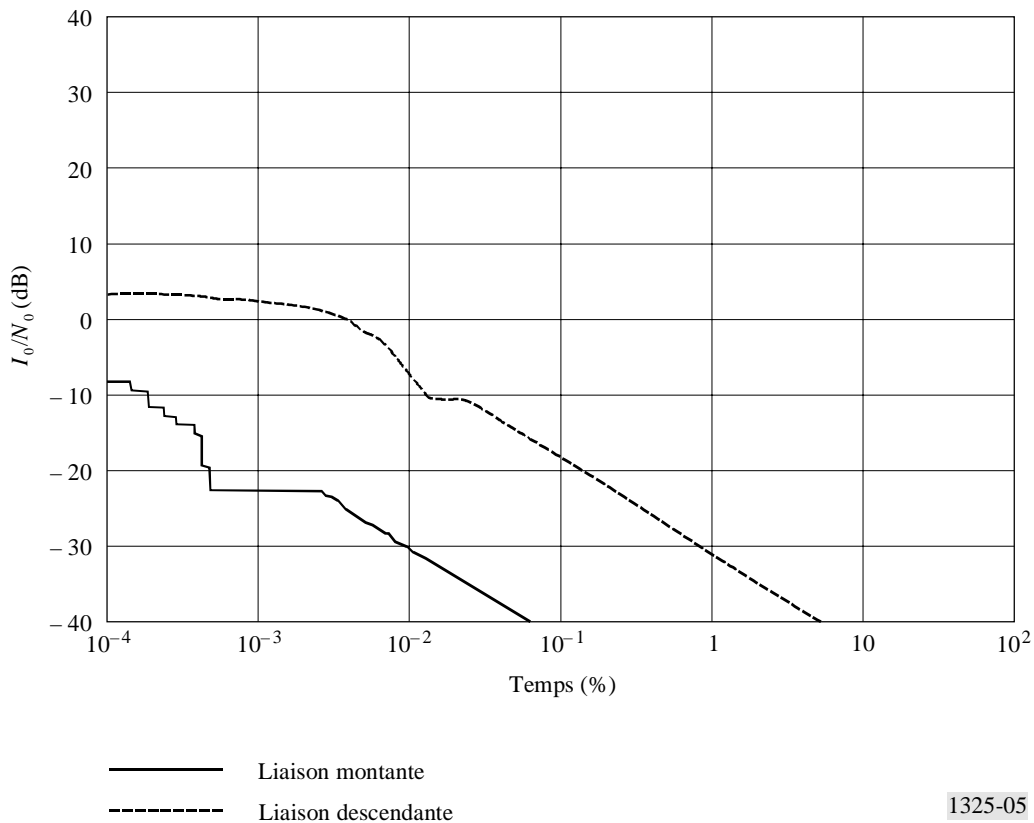
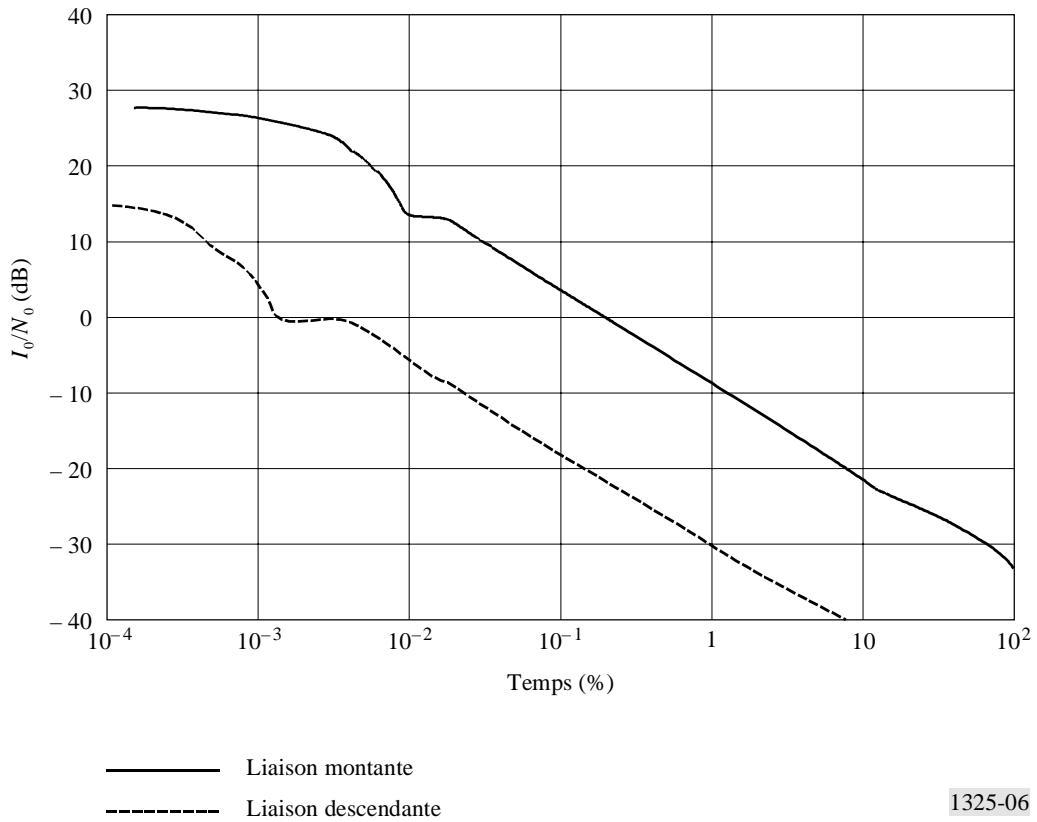
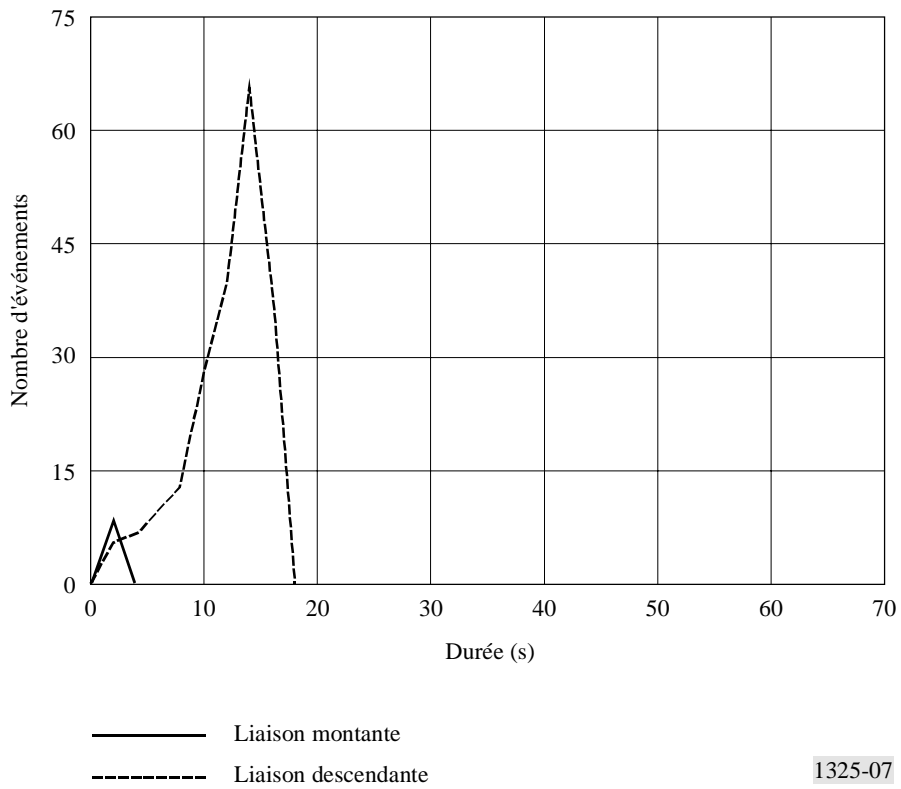


FIGURE 6
 Brouillage causé par un réseau OSG à un réseau non OSG



1325-06

FIGURE 7
 Durée des événements de brouillage causés par un réseau non OSG à un réseau OSG



1325-07

FIGURE 8

Durée des événements de brouillage causés par un réseau OSG à un réseau non OSG

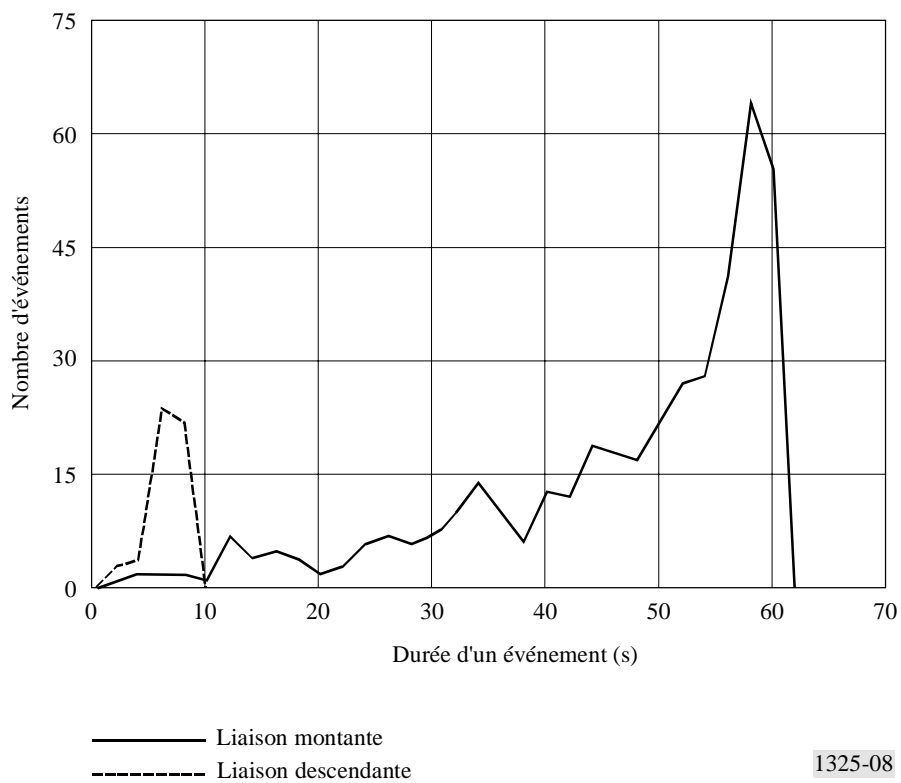


FIGURE 9

Profil chronologique du brouillage occasionné par un réseau OSG à la liaison montante d'un réseau non OSG

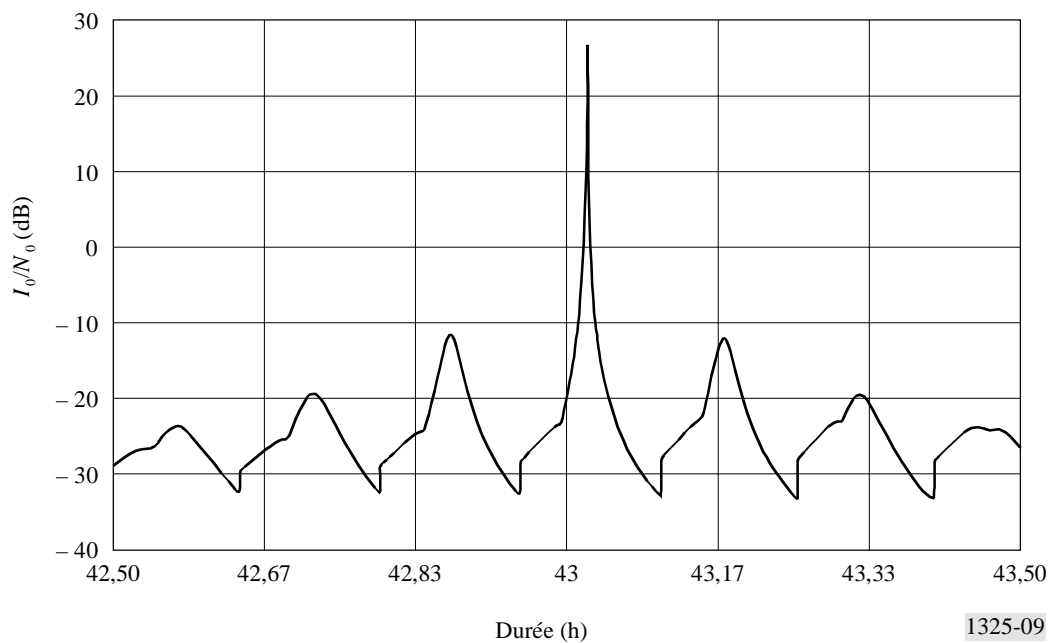
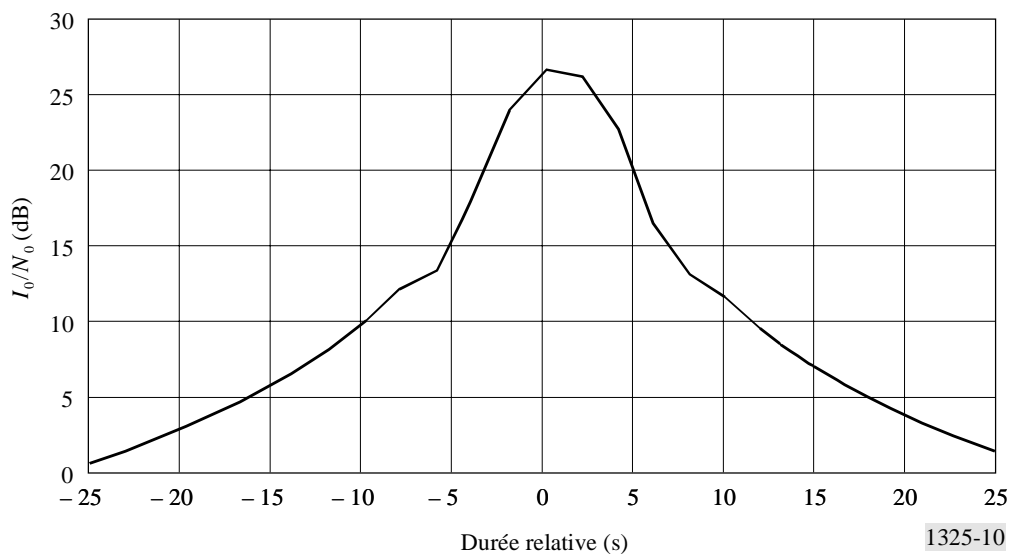


FIGURE 10

Détail d'un événement de brouillage de crête de la Fig. 9, centré sur l'instant $t = 43 \text{ h } 74 \text{ s}$



3.1 Validation des résultats de l'analyse de brouillage

Pour confirmer que les niveaux de brouillage calculés selon le § 3 s'inscrivent dans les limites de ce que l'on peut attendre, il est souhaitable de procéder à une comparaison avec une référence connue. A cette fin, il est par exemple commode de comparer les niveaux maximum de brouillage des Fig. 5 et 6 au niveau calculé lorsque le satellite non OSG est directement aligné sur le trajet tracé entre la station terrienne OSG et le satellite OSG. Le Tableau 5 indique les résultats des calculs de brouillage dans le cas d'un réseau non OSG brouilleur pour le réseau OSG considéré. Les valeurs de crête de la Fig. 5 et les valeurs de brouillage calculées et indiquées dans le Tableau 5 sont identiques.

TABLEAU 5

Calcul du niveau de brouillage sur un trajet direct entre un réseau OSG et un réseau non OSG

	Liaison montante non OSG sur liaison montante OSG	Liaison descendante non OSG sur liaison descendante OSG
P_r (dB(W/Hz))	-216,1	-243,6
Longueur du trajet utile (km)	998,7	998,7
Affaiblissement sur le trajet utile (dB)	-181,7	-178,4
Gain à l'émission du signal utile (dBi)	56,3	26,9
P_t/BW_{tx} (dB(W/Hz))	-90,7	-92,4
Gain à l'émission du signal utile (dBi)	56,3	26,9
Longueur du trajet du signal brouilleur (km)	37 165,8	998,7
Affaiblissement sur le trajet du signal brouilleur (dB)	-213,1	-178,4
L_p	1	1
Gain à la réception (dBi)	41,5	43,0
I_0 (dB(W/Hz))	-206,0	-200,6
Température de bruit à la réception, T (K)	575	275
N_0 (dB(W/Hz))	-201,0	-204,2
I_0/N_0 (dB)	-5,0	3,6

Le Tableau 6 indique les résultats des calculs de brouillage dans le cas d'un réseau OSG brouilleur pour le réseau non OSG. Les valeurs de crête de la Fig. 6 et les niveaux de brouillage calculés et indiqués dans le Tableau 6 sont identiques.

TABLEAU 6

Calcul du niveau de brouillage sur un trajet direct entre un réseau OSG et un réseau non OSG

	Liaison montante OSG sur liaison montante non OSG	Liaison descendante OSG sur liaison descendante non OSG
P_t/BW_{tx} (dB(W/Hz))	-62,2	-68,5
Gain à l'émission (dBi)	44,5	41,5
Longueur du trajet du signal brouilleur (km)	998,7	37 165,8
Affaiblissement sur le trajet du signal brouilleur (dB)	-181,7	-209,6
L_p	1	1
Gain à la réception (dBi)	30,1	53,2
I_0 (dB(W/Hz))	-169,3	-183,4
Température de bruit à la réception, T (K)	1 295,4	731,4
N_0 (dB(W/Hz))	-197,5	-200,0
I_0/N_0 (dB)	28,2	16,6

ANNEXE 3

Suite des études

Les lignes qui suivent esquissent l'orientation des futures études consacrées à la présente Recommandation.

- 1) Ajuster le temps de simulation de telle sorte qu'il corresponde à la première répétition de la trace au sol du satellite non OSG lorsque l'autre réseau est un réseau OSG et/ou prévoir une discussion des conditions initiales et des temps de simulation adaptés aux diverses constellations, afin d'obtenir une sortie statistique non biaisée.
- 2) Prévoir une discussion du choix du pas temporel de simulation pour les diverses constellations (en fonction, par exemple, des altitudes et des ouvertures des faisceaux d'antenne).
- 3) Un complément d'étude sera à prévoir pour définir la valeur du découplage de polarisation que l'on peut supposer entre l'émetteur et le récepteur. Dans ces études, il faudra tenir compte de divers éléments (effets atmosphériques, systèmes dotés d'antennes de poursuite par comparaison de phase, etc.).
- 4) Adoption de techniques de sélection de la station spatiale lorsque plusieurs satellites sont simultanément en vue d'une station terrienne. Prévoir une discussion des autres techniques envisagées par d'autres opérateurs et pouvant reposer par exemple sur des méthodes permettant d'éviter les brouillages ou sur des systèmes à diversité.