

RECOMMANDATION UIT-R S.1325-1

**MÉTHODES DE SIMULATION POUR LA DÉTERMINATION DES STATISTIQUES RELATIVES
AU BROUILLAGE À COURT TERME ENTRE DES RÉSEAUX À SATELLITE NON
GÉOSTATIONNAIRE 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 UIT-R 206/4 et UIT-R 231/4)

(1997-2000)

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 point c) du *considérant* 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;
- j) qu'aux étapes de notification et d'enregistrement des réseaux à satellite à l'UIT, les données relatives au nombre et à la position précise de leurs stations terriennes ne sont généralement pas disponibles,

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** d'envisager d'utiliser la méthode exposée à l'Annexe 2 pour calculer le brouillage cumulatif total produit par un réseau non OSG dans un réseau OSG et pour calculer la fonction de densité cumulative de la puissance surfacique équivalente (epfd) pour un diamètre d'antenne donné de la station terrienne OSG ou de la puissance epfd du réseau non OSG sur la liaison montante;
- 4** 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 – L'Annexe 2 indique une méthode de calcul de la puissance $epfd_{\uparrow}$ et de la puissance $epfd_{\downarrow}$ d'un réseau non OSG. L'Annexe 3 décrit différentes approches permettant d'associer la méthode indiquée à l'Annexe 1 au calcul de la puissance $epfd_{\uparrow}$ et de la puissance $epfd_{\downarrow}$ d'un réseau non OSG.

NOTE 4 – 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 5 – 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 6 – L'Annexe 3 décrit et illustre la méthode de calcul.

NOTE 7 – On trouvera à l'Annexe 4 une liste de thèmes pour la poursuite des travaux relatifs à la présente Recommandation.

ANNEXE 1

Méthode de détermination des statistiques relatives aux brouillages à court terme entre réseaux SFS non OSG fonctionnant aux mêmes fréquences et dans le même sens et autres réseaux SFS non OSG ou réseaux SFS OSG

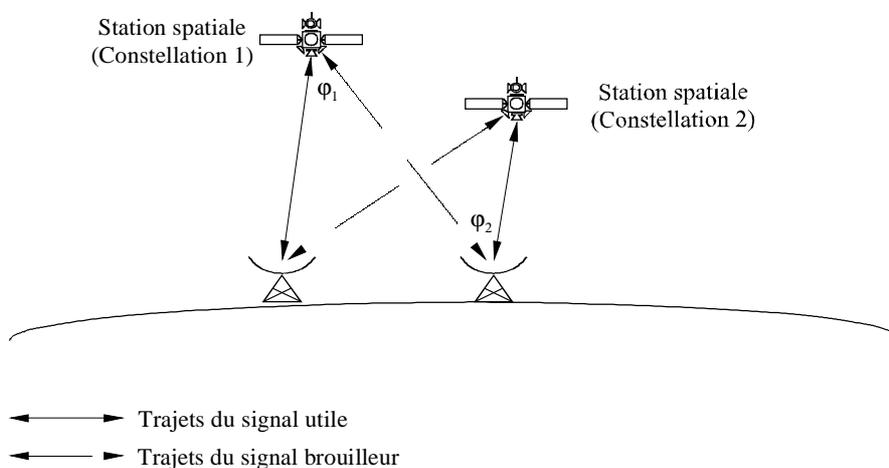
1 Description de la méthode et du principe de simulation

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

FIGURE 1

Configuration de brouillage



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 entre l'axe de visée de l'émetteur et la direction du récepteur
- φ_2 : angle entre l'axe de visée du récepteur et la 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:

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

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

$$\frac{G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2)}{4\pi R^2} \quad (2)$$

Pour évaluer les brouillages causés par des réseaux à satellite comportant plusieurs stations au sol, il faut combiner les brouillages causés par toutes les stations au sol pour déterminer le brouillage total. On peut soit combiner les données de brouillage pour chaque pas temporel de la simulation soit combiner les données provenant d'un ensemble de simulations individuelles. Dans l'un ou l'autre cas, il faut tenir compte de la discrimination d'antenne du satellite OSG en direction de chaque station terrienne pour calculer le brouillage total sur la liaison montante, $epfd_{\uparrow}$.

Pour le calcul du brouillage, il faut tenir compte de la discrimination d'antenne de réception du satellite géostationnaire pour représenter de façon plus précise le brouillage tel qu'il est vu par le récepteur du satellite. La puissance $epfd_{\uparrow}$ sera définie comme suit:

$$epfd_{\uparrow} = 10 \log \left(\sum_i 10^{P_i/10} \frac{G_t(\varphi_{1i}) G_r(\varphi_{2i})}{4\pi R_i} \frac{1}{G_{r_{max}}} \right) \quad (2a)$$

où:

- $G_t(\varphi_{1i})$: gain de l'antenne d'émission de la station terrienne en direction du satellite brouillé;
- $G_r(\varphi_{2i})$: gain de l'antenne de réception du satellite en direction de la source de brouillage;
- $G_{r_{max}}$: gain maximal de l'antenne de réception du satellite.

En fonction de I_0/N_0 , la puissance $epfd_{\uparrow}$ peut être exprimée comme suit:

$$10^{epfd_{\uparrow}/10} = \sum_i P_i \frac{G_t(\varphi_{1i})}{4\pi R_i^2} \frac{G_r(\varphi_{2i})}{G_{r_{max}}} \quad epfd_{\uparrow}(\text{dB(W/(m}^2 \cdot \text{MHz)})), \quad P_i (\text{W/MHz}) \quad (2b)$$

$$10^{epfd_{\uparrow}/10} = \sum_i \frac{P_{t_i}}{BW_{tx}} \frac{G_t(\varphi_{1i})}{4\pi R_i^2} \frac{G_r(\varphi_{2i})}{G_{r_{max}}} \quad epfd_{\uparrow}(\text{dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz)})), \quad P_{t_i} (\text{W}) \quad (2c)$$

$$= \sum_i \frac{P_{t_i}}{BW_{tx}} \frac{G_t(\varphi_{1i})}{4\pi R_i^2} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{kT} \frac{1}{L_p} \right) \frac{G_r(\varphi_{2i})}{G_{r_{max}}} \left/ \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{kT} \frac{1}{L_p} \right) \right. \quad (2d)$$

où $epfd_{\uparrow}$ est exprimé en $\text{dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz))}$, P_{t_i} est en W et BW_{tx} est la largeur de bande à l'émission en Hz.

En introduisant I_0/N_0 (équation (1)), on obtient:

$$10^{epfd_{\uparrow}/10} = \sum_i \frac{I_{0i}}{N_0} \left/ \left(G_{r_{max}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{kT} \frac{1}{L_p} \right) \right. \quad (2e)$$

soit:

$$epfd_{\uparrow} = 10 \log \left[\sum_i \frac{I_{0i}}{N_0} \left/ \left(G_{r_{max}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{kT} \frac{1}{L_p} \right) \right. \right] \quad (2f)$$

$$epfd_{\uparrow} = 10 \log \left(\sum_i \frac{I_{0i}}{N_0} \right) - \frac{G_{r_{max}}}{T} - 10 \log \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) - 228,6 + 10 \log (L_p) \quad \text{dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz))} \quad (2g)$$

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 (c'est-à-dire l'équinoxe de printemps), l'axe des z est l'axe de rotation moyen de la Terre, enfin l'axe des y est déterminé par le produit vectoriel des vecteurs unité dans les directions z et x: $\vec{y} = \vec{z} \times \vec{x}$.

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

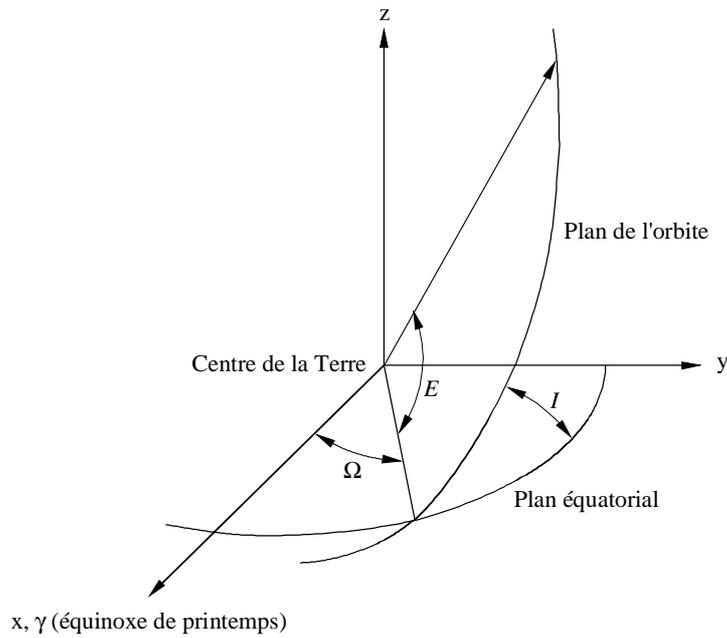
v : vitesse constante de la station spatiale

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 ($5,974 \times 10^{24} \text{ kg}$).

FIGURE 2
Représentation des éléments d'une orbite dans un système de Kepler



1325-02

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:

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

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, *right ascension of the ascending mode*). 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
- E : argument de latitude (anomalie vraie). Il s'agit de l'angle entre la ligne de nœuds et le rayon vecteur 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:

$$E = E_0 + \omega t \quad (10)$$

où:

- E_0 : position angulaire de la station spatiale à l'instant t_0 (rad)
- ω : 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:

$$\Omega = \Omega_0 + \Omega_r t \quad (11)$$

où:

- Ω_0 : RAAN de la station spatiale à l'instant t_0 (rad),
- Ω_r : vitesse de précession orbitale de la station spatiale (rad/s)

$$\Omega_r = -\frac{3}{2} J_2 \cos(I) R_E^2 \frac{\sqrt{r\mu}}{r^4} \quad (12)$$

où:

- μ : constante de l'attraction terrestre ($3,986 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$)
- J_2 : constante du second harmonique du potentiel terrestre ($1\,082,6 \times 10^{-6}$).

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

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

La représentation de la vitesse de la station spatiale dans le système de coordonnées inertiel géocentrique, sans tenir compte de la variation en Ω à relativement long terme, est de la forme:

$$\begin{bmatrix} dx/dt \\ dy/dt \\ dz/dt \end{bmatrix} = r\omega \begin{bmatrix} \cos \Omega \sin E - \sin \Omega \cos I \cos E \\ \sin \Omega \sin E + \cos \Omega \cos I \cos E \\ \sin I \cos E \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.2 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 4).

2.3 Hypothèses de travail

2.3.1 Position des stations terriennes non OSG

Pour la simulation, il faut tenir compte du nombre de stations terriennes non OSG, de leur position géographique sur la surface de la Terre et du nombre de stations terriennes qui peuvent fonctionner aux mêmes fréquences qu'une station spatiale du réseau non OSG. Dans certains cas, il se peut qu'on ne connaisse ni le nombre ni la position exacte des stations terriennes non OSG. La simulation est donc effectuée en fonction de ce qui suit:

- le nombre et les coordonnées des stations terriennes non OSG sont inconnus (stations types);
- le nombre et les coordonnées des stations terriennes non OSG sont connus.

Dans le cas a), on peut évaluer les statistiques de brouillage en se fondant sur l'hypothèse qu'à long terme, le trafic moyen (la charge moyenne) est le même pour toutes les stations terriennes d'un réseau non OSG. Pour chaque pas de simulation, on peut spécifier la position des stations terriennes non OSG sur la base d'un nombre prévu de stations terriennes situées dans une zone unitaire de la Terre dans une région géographique donnée, avec une ressource maximale d'un faisceau d'antenne à bord et avec une ressource d'une station spatiale dans sa totalité. Pour faire des estimations valables, il faut supposer que pour chaque pas de simulation, une station spatiale non OSG quelconque établit un canal avec le plus grand nombre possible de stations terriennes et que l'un des faisceaux d'antenne à bord fonctionne avec un trafic maximal dans la direction d'émission la plus défavorable en termes de production de brouillage.

Dans le cas b), la simulation doit être effectuée sur la base d'un algorithme d'établissement de canal radioélectrique entre une station spatiale et une station terrienne du réseau non OSG.

2.3.2 Sélection de la station spatiale non OSG

Il existe plusieurs stratégies de sélection de satellite différentes que les exploitants de systèmes non OSG peuvent employer. Des études ont montré que le choix des stratégies de sélection a une incidence sur les niveaux de brouillage à moyen terme et à long terme. Les exploitants de systèmes non OSG peuvent utiliser différentes stratégies pour réduire le brouillage causé aux autres systèmes. Certaines d'entre elles sont indiquées ci-dessous dans les paragraphes qui suivent.

2.3.2.1 Sélection de la station spatiale fondée sur la durée de présence la plus longue

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 non OSG pendant la période de temps la plus longue. En procédant de la sorte, on minimise le nombre de transferts du flux de données. Lorsqu'un système à satellites est conçu pour offrir plusieurs satellites visibles par 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 parallèle au vecteur-vitesse des stations spatiales, \vec{v} . Le critère de sélection vise à minimiser le produit scalaire de \vec{r} et de \vec{v} :

$$\min_{\text{Tous les satellites situés au-dessus de l'angle d'élévation minimal}} \vec{r} \cdot \vec{v} \quad (15)$$

Cette procédure est illustrée à la Fig. 3. La vue de haut montre le vecteur-vitesse \vec{v}_1 de la station spatiale en direction de la station terrienne. Le produit scalaire est négatif, la station spatiale numéro 1 est donc retenue de préférence à l'autre station spatiale (voir l'Annexe 4).

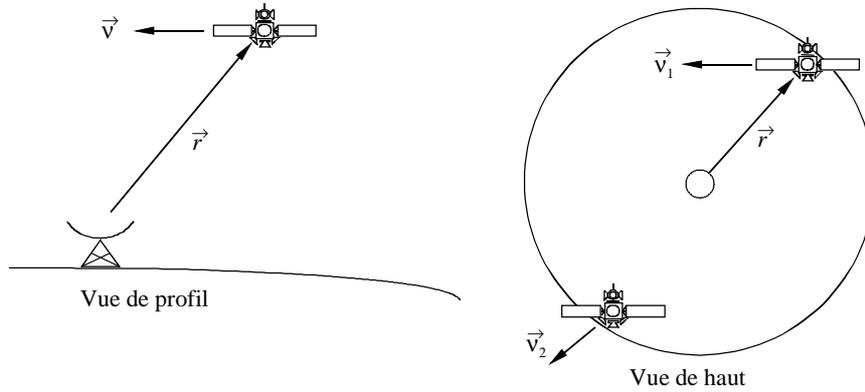
2.3.2.2 Sélection de la station spatiale fondée sur l'angle d'élévation le plus élevé

Cette stratégie de sélection nécessite un plus grand nombre de transferts que celle qui est fondée sur la durée de présence la plus longue mais elle peut servir à améliorer la qualité de fonctionnement des liaisons du système non OSG. Le satellite actif est choisi parmi ceux qui possèdent un répéteur disponible et c'est celui qui correspond à l'angle d'élévation le plus élevé vu depuis une station terrienne non OSG qui est choisi. Il existe deux techniques possibles de transfert en ce qui concerne l'angle d'élévation le plus élevé:

- le satellite correspondant à l'angle d'élévation le plus élevé est toujours choisi comme satellite actif;
- le satellite correspondant à l'angle d'élévation le plus élevé est choisi une fois que l'angle d'élévation associé au satellite actif passe au-dessous d'une valeur minimale.

FIGURE 3

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



1325-03

2.3.2.3 Sélection de la station spatiale fondée sur l'angle de séparation le plus grand par rapport à l'arc OSG

Les systèmes non OSG peuvent choisir les satellites sur la base de l'angle de séparation le plus grand par rapport à la direction de l'arc OSG. Ce processus permet de réduire le niveau de brouillage causé par les satellites non géostationnaires à une station terrienne OSG mais présente quelques inconvénients. Il peut conduire à une qualité de fonctionnement des liaisons non optimale et peut aussi nécessiter un plus grand nombre de transferts.

2.3.3 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:

$$P_r = \frac{P_t(R)}{BW_{tx}} G_t(0) \left(\frac{\lambda}{4\pi R_w} \right)^2 \quad (16)$$

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:

$$C_0/N_0 = \frac{P_r(R) G_{rw}(0)}{k T_w} = \frac{P_t(R)}{BW_{tx}} \frac{G_t(0) G_{rw}(0)}{k T_w} \left(\frac{\lambda}{4\pi R_w} \right)^2 \quad (17)$$

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:

$$\begin{aligned} I_0/N_0 &= \frac{P_t(R)}{BW_{tx}} G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \\ &= P_r \frac{G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2)}{G_t(0)} \left(\frac{R_w}{R} \right)^2 \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \end{aligned} \quad (18)$$

2.4 Paramètres d'antenne

2.4.1 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 S8 du RR
- Recommandation UIT-R S.465
- Recommandation UIT-R S.672
- Recommandation UIT-R S.1428.

2.4.2 Diagrammes d'antenne de station spatiale OSG

Les paramètres requis sont les gains à la réception et à l'émission de la station spatiale OSG en direction de la station terrienne non OSG. En effet, la position de la station terrienne non OSG étant constante par rapport à la station spatiale OSG, ces gains sont constants.

Lorsque la position des stations terriennes non OSG est inconnue, le diagramme d'antenne de la station spatiale OSG doit être montré sous la forme du gain en fonction de l'angle par rapport à l'axe de l'antenne.

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
- Pour chaque plan orbital:
 - altitude de l'orbite
 - inclinaison du plan
 - RAAN
 - argument de latitude pour chaque station spatiale du plan orbital.

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)
- nombre maximal de faisceaux d'antenne utilisant la même fréquence et leur orientation spatiale.

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
- diagramme d'antenne.

- 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 d'élévation minimal pour la 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)).
- Densité prévue de stations terriennes non OSG situées dans différentes régions géographiques de la zone de service du réseau non OSG.
- Nombre maximal de stations terriennes non OSG qui peuvent fonctionner avec une station spatiale non OSG à la même fréquence.

2.5.4 Fréquence à utiliser pour l'évaluation du brouillage

Le brouillage causé au réseau utile doit être évalué à la fréquence la plus basse utilisée en partage par les réseaux brouilleur et utile, dans les cas où les diagrammes d'antenne sont définis par une enveloppe.

2.6 Résultats

Les données brutes obtenues après simulation constituent un profil temporel du rapport brouillage/bruit, I_0/N_0 , en fonction du temps. 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 4).

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 le pas à l'ouverture du faisceau d'antenne des systèmes brouillés.

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:

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

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

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

avec:

- a : vitesse angulaire du satellite dans un système de coordonnées fixes par rapport à la Terre (système de coordonnées de référence géosynchrone géocentrique)
- Ω_e : vitesse angulaire de rotation de la Terre à l'équateur, $\cong 7,29 \times 10^{-5}$ rad/s
- ω : 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 brouillée et le point subsatellite lorsque le satellite se trouve dans l'axe du faisceau principal de la station terrienne
- R_e : rayon de la Terre (6 378 km)
- h : altitude du satellite
- ε : angle d'élévation de l'antenne de la station terrienne
- $\varphi_{3\text{ dB}}$: ouverture du faisceau d'antenne 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 Précision 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.

Avec des orbites semblables dans le réseau non OSG, on peut déterminer la période de répétition de la constellation orbitale en appliquant la méthode suivante:

Etape 1: Définir un espacement angulaire entre les points subsatellite à $t = t_0$ et $t = t_0 + T$, sans tenir compte de l'écart en latitude du nœud ascendant, où T est la période orbitale du satellite.

$$\Delta\lambda_0 = 2\pi - 2\pi \frac{T}{T_E}$$

où T_E est la période de rotation de la Terre.

Etape 2: Définir un espacement angulaire entre les points subsatellite à $t = t_0$ et $t = t_0 + T_j$, où j est le nombre d'orbites autour de la Terre.

$$\Delta\lambda_j = j\Delta\lambda_0 + jT \Omega_r$$

Etape 3: Définir le plus petit entier j pour lequel la condition suivante est remplie:

$$(\Delta\lambda_j) \bmod(2\pi) \leq \Delta\lambda_{T_p}$$

où $\Delta\lambda_{T_p}$ est la précision requise concernant la période de répétition de la constellation orbitale (rad).

Etape 4: Définir la période de répétition de la constellation orbitale:

$$T_{NOB} = j_{min} T$$

où j_{min} est le plus petit entier j pour lequel la condition de l'Etape 3 est satisfaite.

La durée totale de la simulation et la précession doivent être telles que la distribution des trajets de satellite le long d'un parallèle soit uniforme et qu'un nombre suffisant de traces traversent le faisceau de la station brouillée. A titre de compromis entre la précision et la durée d'exécution 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 exécute le programme pour 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 d'exécutions 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 de la 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.

2.7.4 Pas temporels doubles

Il peut être souhaitable d'utiliser des pas temporels doubles pour augmenter la vitesse d'exécution de la simulation. Le § 2.7.2 porte sur le calcul du pas temporel de simulation. Ce pas, qui peut varier de plusieurs ordres de grandeur entre des antennes de station terrienne de petites et de grandes dimensions, devient très faible pour des ouvertures de faisceau étroites en raison du nombre d'occurrences requis dans le faisceau principal ($N_{hits} = 5$). Cette valeur requise est nécessaire mais entraîne une forte augmentation de la durée d'exécution. Pour résoudre ce problème, on peut utiliser un pas temporel double afin de réduire la variance de la durée totale d'exécution de la simulation ainsi que cette durée pour toutes les dimensions d'antennes de station terrienne, notamment pour les stations terriennes possédant des ouvertures de faisceau étroites.

Pour cet algorithme à pas double, le pas temporel dont il est question au § 2.7.2 doit être utilisé pour toutes les simulations et il est appelé ici pas fin. Ce pas dépend de l'ouverture de faisceau de l'antenne et ne doit être utilisé que pour les parties de la simulation où le satellite non OSG est proche des régions de puissance epfd maximale, proche du faisceau principal ou en limite de la zone d'exclusion. Le pourcentage de temps pendant lequel les satellites sont dans des régions très éloignées de l'axe du faisceau principal, au-delà du premier lobe secondaire, est beaucoup plus élevé que le pourcentage de temps pendant lequel les satellites sont visibles dans le faisceau principal. Compte tenu de cela et du fait qu'au-delà du premier lobe secondaire, les valeurs de puissance epfd varient moins rapidement en fonction de la position de l'engin spatial, on peut utiliser un pas grossier constant dans les régions éloignées du faisceau principal. Ce pas grossier est défini sous la forme d'un angle topocentrique:

$$\varphi_{coarse} = 1,5^\circ$$

On peut l'utiliser pour toutes les dimensions d'antenne.

Il existe deux régions possibles pour le pas fin en raison des deux positions possibles les plus défavorables d'un satellite non géostationnaire:

- Lorsqu'un satellite non géostationnaire est proche du faisceau principal, la région où est utilisé le pas fin (FSR, *fine step region*) est définie sous la forme d'un angle topocentrique fixe par rapport à l'axe du faisceau de la station terrienne OSG.
 - Si $D/\lambda > 100$, positionner la limite de la région du premier lobe secondaire sur l'angle φ_r du diagramme d'antenne de la station terrienne OSG:

$$\varphi_1 = \varphi_r = 15,85(D/\lambda)^{-0,6}$$

- Si $D/\lambda < 100$, positionner la limite de la région du premier lobe secondaire sur celle définie dans le diagramme d'antenne de la station terrienne OSG:

$$\varphi_1 = 95 \lambda/D$$

L'angle par rapport à l'axe de visée pour la région où est utilisé le pas fin est défini comme valant $3,5^\circ$ ou φ_1 , si cette dernière valeur est supérieure:

$$\varphi_{FSR_1} = \max(3,5^\circ, \varphi_1)$$

- Lorsqu'un satellite non géostationnaire est proche de la zone d'exclusion, la région où est utilisé le pas fin mesurée depuis la frontière de la zone d'exclusion est définie par:

$$\varphi_{FSR_2} = \varphi_{coarse}$$

Le pas grossier doit être un multiple entier du pas fin pour des raisons statistiques. Etant donné que le pas grossier est constant, le rapport entre le pas grossier et le pas fin n'est fonction que de l'ouverture de faisceau d'antenne de la station terrienne OSG (φ_3 dB). Il est défini par:

$$N_{coarse} = \text{floor} ((N_{hits} \times \varphi_{coarse}) / \varphi_3 \text{ dB})$$

où *floor* est une fonction qui tronque la partie décimale du rapport et renvoie la partie entière de ce rapport. Cette fonction donne donc un rapport permettant de garantir que le pas grossier n'est jamais plus grand que la valeur topocentrique cible de $1,5^\circ$. Etant donné que ce rapport ne dépend que de l'ouverture de faisceau d'antenne de la station terrienne OSG, φ_3 dB, plus l'ouverture de faisceau est étroite, plus on économise du temps. Cela est utile car la durée d'exécution des simulations avec des ouvertures de faisceau étroites est très longue.

Si un satellite non OSG est à moins de φ_{FSR_1} du faisceau principal ou à moins de φ_{FSR_2} de la zone d'exclusion, on doit utiliser le pas fin pour la simulation. Pour toutes les autres régions de l'espace où un satellite non géostationnaire n'est pas proche des régions susmentionnées, on calcule alors le pas grossier en multipliant N_{coarse} par le pas fin.

ANNEXE 2

Méthode de détermination des statistiques relatives aux niveaux de brouillage aux mêmes fréquences et dans le même sens entre des réseaux SFS non OSG et des réseaux SFS OSG fonctionnant dans des bandes inférieures à 30 GHz

1 Introduction

La présente Annexe décrit les algorithmes permettant de calculer le brouillage cumulatif total produit par un réseau non OSG dans un réseau OSG.

Ces algorithmes peuvent être utilisés pour calculer la fonction de densité cumulative de la puissance $epfd$ pour un diamètre d'antenne donné de la station terrienne OSG ou de la puissance $epfd$ du réseau non OSG. Les cas de brouillage suivants sont étudiés:

- brouillage de la liaison montante causé par les stations terriennes émettrices d'un réseau non OSG à une station spatiale de réseau OSG;
- brouillage de la liaison descendante causé par les stations spatiales émettrices d'un réseau non OSG à une station terrienne réceptrice de réseau OSG.

Cette méthode permet également de calculer la fonction de densité de probabilité et fonction de densité cumulative du rapport C/I en fonction des caractéristiques des deux réseaux.

Pour déterminer le cas de brouillage le plus défavorable, il est proposé une approche à deux étapes. La première étape permet de localiser le cas le plus défavorable. La deuxième consiste au calcul de la puissance $epfd$ et de la puissance $epfd$ à l'emplacement du cas le plus défavorable localisé.

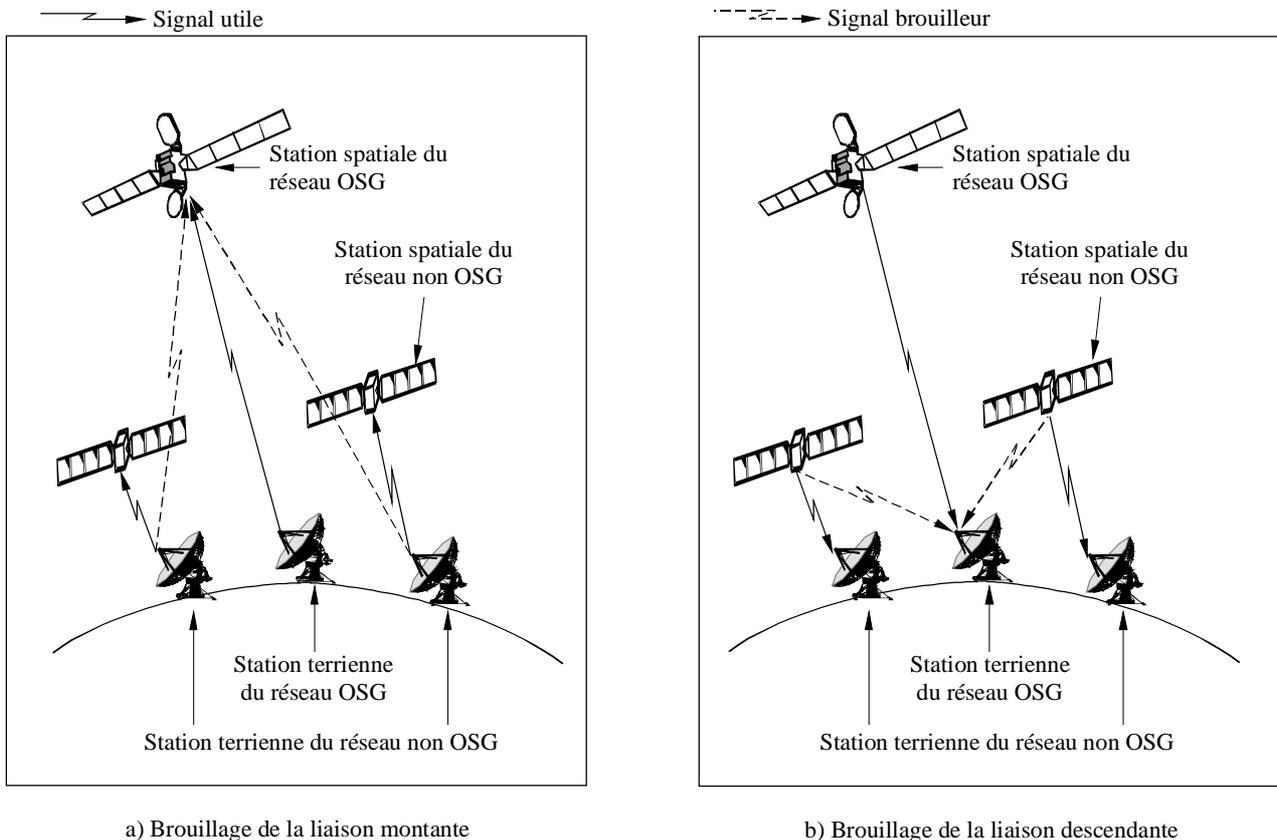
2 Scénario de brouillage

Le réseau non OSG est le réseau brouilleur. Le scénario de brouillage est représenté sur la Fig. 4:

FIGURE 4

Scénario de brouillage

Brouillage causé par un réseau non OSG à un réseau OSG



1325-04

3 Terminologie

3.1 Constantes relatives à la Terre

Les constantes générales relatives à la Terre sont:

R_e : rayon de la Terre (6 378 km)

O: centre de la Terre

μ : constante de l'attraction terrestre ($3,986 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$)

J_2 : constante du second harmonique du potentiel terrestre ($1\,082,6 \times 10^{-6}$)

T_e : période de rotation de la Terre (23 h 56' 04" = 86 164 s)

Ω_e : vitesse angulaire de la Terre;

$$= 2\pi/T_e \cong 7,29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

t : temps écoulé (s)

3.2 Constantes relatives aux stations spatiales du réseau non OSG

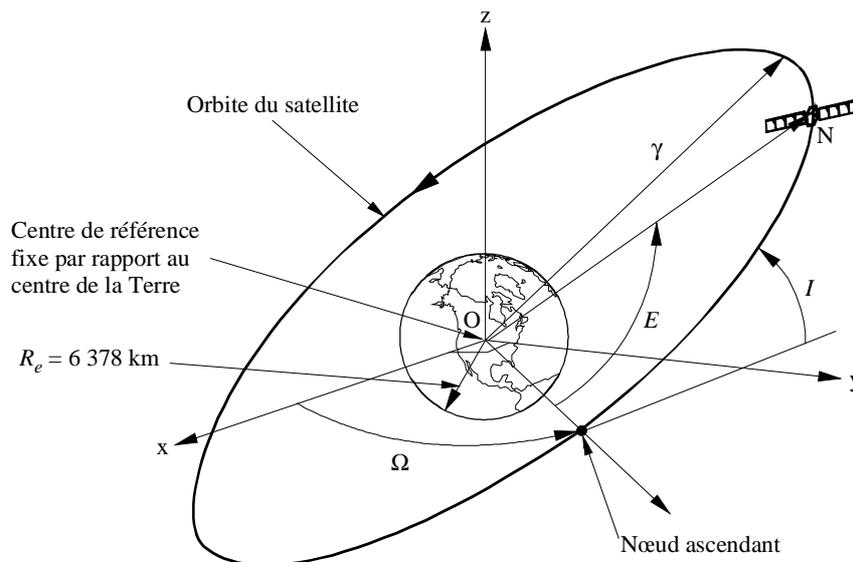
Pour les stations spatiales du réseau non OSG (voir la Fig. 5), les constantes sont les suivantes:

N : nombre de stations spatiales du réseau non OSG

i : indice de chaque satellite non géostationnaire ($0 \leq i < N$)

- h : altitude du satellite au-dessus de la Terre (km)
- r : demi-grand axe de l'orbite du satellite (km)
- = $h + R_e$
- I : angle d'inclinaison du plan orbital au-dessus de l'Equateur (rad)
- $\Omega_{i,0}$: RAAN de chaque satellite non OSG à l'instant initial (rad)
- $E_{i,0}$: argument de latitude de chaque satellite non OSG à l'instant initial (rad)
- T : période orbitale du satellite (s)
- = $2\pi (r^3/\mu)^{1/2}$
- ω : mouvement moyen du satellite (rad/s)
- = $2\pi/T$
- $E_{i,t}$: argument de latitude du satellite au moment du calcul (rad)
- = $E_{i,0} + \omega_i t$
- Ω_{ri} : rotation de la ligne des nœuds (nœud ascendant) (rad/s)
- = $-\frac{3}{2} J_2 \cos(I) R_E^2 \frac{\sqrt{r\mu}}{r^4}$
- $\Omega_{i,t}$: RAAN du satellite au moment du calcul (rad)
- = $\Omega_{i,0} + \Omega_{ri} t$
- \rightarrow
- ON_i : vecteur des coordonnées d'un satellite non OSG dans la référence fixe par rapport au centre de la Terre:
- $$= \begin{cases} x_i = a (\cos E_{i,t} \cos \Omega_{i,t} - \cos I \sin E_{i,t} \sin \Omega_{i,t}) \\ y_i = a (\cos E_{i,t} \sin \Omega_{i,t} + \cos I \sin E_{i,t} \cos \Omega_{i,t}) \\ z_i = a \sin E_{i,t} \sin I \end{cases}$$

FIGURE 5
Configuration géométrique du satellite



γ : demi-grand axe
 E : argument de latitude
 I : angle d'inclinaison
 Ω : RAAN

3.3 Constantes relatives aux stations spatiales du réseau OSG

Pour les satellites géostationnaires, les paramètres sont les suivants:

h : altitude du satellite au-dessus de la Terre (35 786 km)

r : demi-grand axe de l'orbite du satellite

$$= h + R_e = 42\,164 \text{ km}$$

I : angle d'inclinaison du plan orbital au-dessus de l'Equateur (généralement de 0° , mais peut varier entre $+5^\circ$ et -5°)

Ω_0 : RAAN de chacun des satellites non OSG à l'instant initial (rad). Elle peut aussi être considérée comme sa longitude si tel est le cas à l'instant initial

T : période orbitale du satellite

$$= 2\pi (r^3/\mu)^{1/2} \cong 86\,164 \text{ s}$$

ω : mouvement moyen du satellite

$$= 2\pi/T \cong 7,29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

E_0 : argument de latitude à l'instant initial (rad)

E_t : argument de latitude du satellite au moment du calcul (rad)

$$= E_0 + \omega t$$

Ω_{ri} : rotation de la ligne des nœuds de la RAAN

$$= -\frac{3}{2} J_2 \cos(I) R_E^2 \frac{\sqrt{r\mu}}{r^4} = -2,71 \times 10^{-9} \text{ rad/s } (I = 0)$$

Ω_t : RAAN du satellite au moment du calcul (rad)

$$= \Omega_0 + \Omega_{ri}t$$

\rightarrow

OG : vecteur des coordonnées du satellite géostationnaire dans le centre de référence fixe par rapport au centre de la Terre

$$= \begin{cases} x = a (\cos E_t \cos \Omega_t - \cos I \sin E_t \sin \Omega_t) \\ y = a (\cos E_t \sin \Omega_t + \cos I \sin E_t \sin \Omega_t) \\ z = a \sin E_t \sin I \end{cases}$$

3.4 Constantes relatives aux stations terriennes

a) Lorsque la position des stations terriennes dans le réseau non OSG est connue: une station terrienne est définie par:

Lat: latitude de la station terrienne (rad)

Lon: longitude de la station terrienne (rad)

\rightarrow

OM : coordonnées de la station terrienne dans le centre de référence fixe par rapport au centre de la Terre:

$$= \begin{cases} X = R_e \cos \text{Lat} \cos(\text{Lon} + \Omega_e t) \\ Y = R_e \cos \text{Lat} \sin(\text{Lon} + \Omega_e t) \\ Z = R_e \sin \text{Lat} \end{cases}$$

b) Lorsque la position des stations terriennes dans le réseau non OSG est inconnue:

δ_i : densité prévue de stations terriennes non OSG situées dans la $i^{\text{ème}}$ région géographique de la zone de service non OSG.

4 Calcul du brouillage

4.1 Etape 1: identification du cas le plus défavorable

Il est nécessaire d'identifier le cas le plus défavorable. Dans la méthode proposée, cette recherche repose sur une analyse géométrique. D'après les études menées par le Groupe de travail 4A, lorsque l'on examine les situations de brouillage entre des réseaux non OSG et OSG, le cas le plus défavorable correspond à une occurrence en ligne ou quasi en ligne.

Les statistiques concernant les occurrences en ligne et les données temporelles dépendent uniquement de la configuration géométrique du système non OSG et du système OSG.

Pour évaluer la configuration géométrique la plus défavorable, cause du cas de brouillage le plus défavorable, les interactions entre les systèmes non OSG et OSG seront calculées pour les stations terriennes OSG dans une zone de couverture OSG représentative. On propose d'utiliser des stations terriennes situées à chaque degré compris entre 0° et 70° de latitude. Les satellites géostationnaires sont répartis à chaque degré le long d'un arc de 180° de longitude. La Fig. 5 décrit la configuration géométrique.

Pour chaque couple (station terrienne OSG et satellite OSG), la constellation non OSG doit être parcourue pendant une période de la constellation. Les statistiques relatives aux caractéristiques angulaires sont calculées pour les occurrences en ligne ou quasi en ligne: le laps de temps total pendant lequel un satellite non géostationnaire pénètre dans un cône de 2° de largeur en direction du satellite OSG est calculé pour chaque couple.

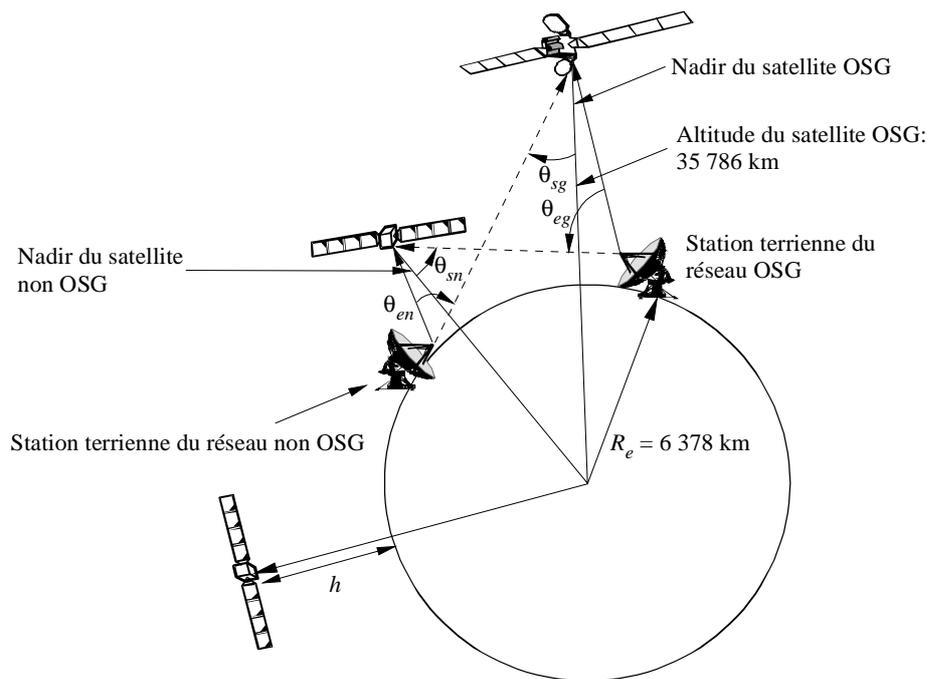
Pour calculer les statistiques relatives aux caractéristiques angulaires pour les occurrences en ligne ou quasi en ligne, on peut utiliser la Recommandation UIT-R S.1257.

Le couple le plus défavorable (celui qui présente le brouillage total le plus important selon les statistiques) est choisi comme étant le point de mesure le plus défavorable et sera utilisé pour l'Etape 2 du programme de simulation.

4.2 Etape 2: calcul du brouillage dans le cas le plus défavorable

La Fig. 6 suivante décrit les scénarios susmentionnés dans une configuration de référence:

FIGURE 6
Configuration de référence



h : altitude du satellite non OSG

1325-06

4.2.1 Calcul du brouillage sur la liaison montante

La notation ci-après est utilisée pour calculer le brouillage causé à la porteuse utile de la liaison montante du réseau OSG:

- θ_{en} : angle mesuré depuis la station terrienne du réseau non OSG, et entre la direction de la station spatiale du réseau OSG et la direction de la station spatiale du réseau à satellite non OSG vers laquelle pointe la station terrienne du réseau non OSG (rad)
- θ_{sg} : angle mesuré depuis la station spatiale du réseau OSG, et entre l'axe de visée de l'antenne réceptrice de la station spatiale du réseau OSG et la direction de la station terrienne brouilleuse du réseau non OSG (rad)

$d_{en,sg}$:	distance entre la station terrienne brouilleuse du réseau non OSG et la station spatiale du réseau OSG (km)
$G_{rx,sg}(\theta_{sg})$:	gain de l'antenne réceptrice du satellite OSG en direction de la station terrienne brouilleuse du réseau non OSG (dBi)
$G_{tx,en}(\theta_{en})$:	gain de l'antenne émettrice de la station terrienne brouilleuse du réseau non OSG en direction de la station spatiale du réseau OSG (dBi)
$P_{tx,en}$:	densité de puissance à l'antenne émettrice de la station terrienne du réseau non OSG (dB(W/Hz))
Δf :	largeur de bande de référence (Hz)
f :	fréquence de la porteuse faisant l'objet du calcul (GHz)
c :	vitesse de la lumière (0,3 m/ns)
λ :	longueur d'onde de la porteuse (m)
=	c/f

La puissance surfacique brouilleuse (dB(W/m² · Hz)), dans la largeur de bande de référence produite sur la liaison montante par une seule station terrienne du réseau non OSG dans la porteuse utile d'un réseau OSG reçue par la station spatiale géostationnaire est:

$$pfd_{i,\uparrow} = P_{tx,en} + 10 \log(\Delta f) + G_{tx,en}(\theta_{en}) - 10 \log(4\pi d_{en,sg}^2) - 60 \quad (\text{voir la Note 1})$$

La puissance surfacique brouilleuse totale, appelée $epfd_{\uparrow}$ est la somme des puissances surfaciques de toutes les stations terriennes non OSG visibles dans la zone de couverture de la station spatiale OSG, pondérées par la discrimination de l'antenne de réception du satellite géostationnaire. La formule résultante est la suivante:

$$epfd_{\uparrow} = 10 \log_{10} \left(\sum 10^{pfd_{i,\uparrow}/10} G_{rx,sg}(\theta_{sg}) / G_{max} \right)$$

où:

$G_{rx,sg}(\theta_{sg})/G_{max}$ est le gain linéaire normalisé de l'antenne de réception du satellite géostationnaire.

NOTE 1 – Une autre manière de procéder est de totaliser la densité de puissance de bruit brouilleur à la sortie de l'antenne réceptrice de la station spatiale du réseau OSG.

Pour une seule station terrienne brouilleuse du réseau non OSG, la densité de puissance de bruit brouilleuse peut être exprimée comme suit:

$$I_{0\uparrow} = pfd_{i,\uparrow} - 10 \log(4\pi/\lambda^2) + G_{rx,sg}(\theta_{sg})$$

La densité de puissance de bruit brouilleuse totale affectant la porteuse utile du réseau OSG sur la liaison montante peut donc être exprimée comme suit:

$$I_{0\uparrow,T} = 10 \log \left(\sum_k 10^{\frac{I_{0\uparrow,k}}{10}} \right)$$

k étant l'indice de chaque station terrienne brouilleuse du réseau non OSG visible depuis la station spatiale du réseau OSG et dont la porteuse cause un brouillage à la porteuse utile.

La puissance de bruit brouilleuse totale peut être calculée en intégrant la densité de puissance bruit brouilleuse à la largeur de bande de réception de la porteuse utile.

4.2.2 Calcul du brouillage sur la liaison descendante

La notation ci-après est utilisée pour calculer le brouillage causé à la porteuse utile de la liaison descendante du réseau OSG:

θ_{sn} :	angle mesuré depuis la station spatiale du réseau non OSG, et entre la direction de la station terrienne du réseau non OSG vers laquelle pointe la station spatiale du réseau non OSG et la direction de la station terrienne du réseau OSG (rad)
θ_{eg} :	angle mesuré depuis la station terrienne du réseau OSG, et entre la direction de la station spatiale du réseau OSG vers laquelle pointe la station terrienne du réseau OSG et la station spatiale brouilleuse du réseau à satellite non OSG (rad)
$G_{rx,sg}(\theta_{eg})$:	gain de l'antenne réceptrice de la station terrienne du réseau OSG en direction de la station spatiale brouilleuse du réseau non OSG (dBi)

$G_{tx,sn}(\theta_{sn})$:	gain de l'antenne émettrice de la station spatiale du réseau non OSG en direction de la station terrienne du réseau OSG (dBi)
$P_{tx,sn}$:	densité de puissance à l'antenne émettrice de la station spatiale du réseau non OSG (dB(W/Hz))
Δf :	largeur de bande de référence (Hz)
$d_{eg,sn}$:	distance entre la station spatiale du réseau OSG et la station terrienne brouilleuse du réseau non OSG (km).

La puissance surfacique brouilleuse (dB(W/(m² · Hz))) dans la largeur de bande de référence produite sur la liaison descendante par une seule station spatiale du réseau non OSG et affectant la porteuse utile reçue par la station terrienne du réseau OSG est:

$$dfp_{i,\downarrow} = P_{tx,sn} + 10 \log(\Delta f) + G_{tx,sn}(\theta_{sn}) - 10 \log(4\pi d_{eg,sn}^2) - 60$$

La puissance peut être calculée en faisant la somme de toutes les puissances surfaciques individuelles. L'équation obtenue est la suivante:

$$epfd_{\downarrow} = 10 \log_{10} \left(\sum 10^{pfd_i/10} \cdot G_{rx,eg}(\theta_{eg_i}) / G_{max} \right) \quad (\text{voir la Note 2})$$

NOTE 2 – Pour une seule station spatiale brouilleuse du réseau non OSG, la densité de puissance de bruit brouilleuse peut être exprimée comme suit:

$$I_{0\downarrow} = pfd_{i,\downarrow} - 10 \log(4\pi/\lambda^2) + G_{rx,eg}(\theta_{eg})$$

La densité de puissance de bruit brouilleuse totale affectant la porteuse utile du réseau non OSG sur la liaison descendante peut donc être exprimée comme suit:

$$I_{0\downarrow,T} = 10 \log \left(\sum_{\ell} 10^{\frac{I_{0\downarrow,\ell}}{10}} \right)$$

ℓ étant l'indice de chaque station spatiale brouilleuse du réseau non OSG visible depuis la station terrienne du réseau OSG et dont la porteuse cause un brouillage à la porteuse utile.

5 Méthode de calcul de la puissance de bruit brouilleuse totale

Le réseau non OSG présente, de manière inhérente, des paramètres géométriques et de transmission non stationnaires et il est donc nécessaire d'identifier la distribution de la puissance de brouillage dans les différentes configurations possibles. Pour ce faire, il est nécessaire de procéder à des simulations. Le présent paragraphe décrit les différentes étapes à suivre chaque fois pour calculer la puissance epfd ou la puissance pfd et la puissance de bruit brouilleuse dans le cas le plus défavorable identifié à l'Etape 1.

5.1 Méthode de calcul du brouillage sur la liaison montante

Pour chaque pas temporel considéré, les étapes suivantes sont appliquées:

Etape 1: Calcul de la position des stations spatiales du réseau non OSG.

Etape 2: Calcul de la position de la station spatiale du réseau OSG.

Etape 3: Lorsque la position des stations terriennes du réseau non OSG est connue: calcul de la position des stations terriennes du réseau non OSG visibles depuis la station spatiale du réseau OSG et fonctionnant à la fréquence attribuée à la porteuse utile.

Lorsque la position des stations terriennes du réseau non OSG est inconnue: sélection de stations spatiales non OSG dont les zones de service chevauchent partiellement ou complètement une zone de visibilité depuis la station spatiale OSG.

Etape 4: Lorsque la position des stations terriennes du réseau non OSG est connue: identification des faisceaux et des satellites utilisés dans le réseau non OSG pour chacune des stations terriennes brouilleuses du réseau non OSG.

Lorsque la position des stations terriennes du réseau non OSG est inconnue: assignation de positions de stations terriennes non OSG sur la base de la règle de probabilité de leur disposition dans les zones de service des stations spatiales non OSG choisies à l'Etape 3 et sélection des stations terriennes non OSG se trouvant dans une zone de visibilité depuis la station spatiale OSG.

Etape 5: Calcul de la densité de puissance à l'émission de chaque station terrienne du réseau non OSG;

Etape 6: Calcul, pour chacune des stations terriennes du réseau non OSG, de l'angle entre la direction de la station spatiale du réseau non OSG qui lui est affectée et la direction de la station spatiale du réseau OSG.

Etape 7: Calcul du gain à l'émission de chacune des stations terriennes du réseau non OSG en direction de la station spatiale du réseau OSG.

Etape 8: Calcul de la distance entre chacune des stations terriennes du réseau non OSG et la station spatiale du réseau OSG.

Etape 9: Calcul du gain de l'antenne réceptrice de la station spatiale du réseau OSG en direction de chacune des stations terriennes du réseau non OSG. (Voir la Note 1).

NOTE 1 – Dans cette méthode, le gain de l'antenne réceptrice du satellite OSG est examiné, pour que la méthode puisse être d'application générale. S'il est appliqué à la puissance $epfd_{\uparrow}$ décrite dans le RR et la Résolution 130 (CMR-97), ce gain doit être mis à 1 partout, étant donné que la définition réelle ne prend pas en compte le gain à la réception du satellite.

Etape 10: Calcul de la puissance surfacique brouilleuse en provenance de chacune des stations terriennes du réseau non OSG reçue par la station du réseau OSG.

Etape 11: Calcul de la puissance surfacique cumulative.

Etape 12: Cumul, si nécessaire, de la puissance de bruit brouilleuse reçue.

5.2 Méthode de calcul du brouillage sur la liaison descendante

La méthode est similaire à celle qui est proposée au § 5.1 précédent et dépend du diamètre d'antenne OSG à étudier. L'étude doit être recommencée pour chaque dimension d'antenne analysée:

Pour chaque pas temporel considéré, les étapes suivantes sont appliquées:

Etape 1: Calcul de la position des stations spatiales du réseau non OSG.

Etape 2: Calcul de la position de la station terrienne du réseau OSG.

Etape 3: Sélection des stations spatiales du réseau non OSG visibles depuis la station terrienne du réseau OSG et fonctionnant à la fréquence attribuée à la porteuse utile.

Etape 4: *Lorsque la position des stations terriennes du réseau non OSG est connue:* identification des faisceaux et des satellites utilisés dans le réseau non OSG pour chacune des stations terriennes brouilleuses du réseau non OSG.

Lorsque la position des stations terriennes du réseau non OSG est inconnue: assignation de positions de stations terriennes non OSG sur la base de la règle de probabilité de leur disposition dans les zones de service des stations spatiales non OSG choisies à l'Etape 3.

Etape 5: Calcul de la densité de puissance à l'émission de chaque station spatiale du réseau non OSG.

Etape 6: Calcul, pour chacune des stations spatiales du réseau non OSG, de l'angle entre la direction de la station terrienne du réseau non OSG qui lui est affectée et la direction de la station terrienne du réseau OSG.

Etape 7: Calcul du gain à l'émission de chacune des stations spatiales du réseau non OSG en direction de la station terrienne du réseau OSG.

Etape 8: Calcul de la distance entre chacune des stations spatiales du réseau non OSG et la station terrienne du réseau OSG.

Etape 9: Calcul du gain de l'antenne réceptrice de la station terrienne du réseau OSG en direction de chacune des stations spatiales du réseau non OSG pour l'antenne choisie.

Etape 10: Calcul de la puissance surfacique brouilleuse reçue par la station terrienne du réseau OSG en provenance de chacune des stations spatiales du réseau non OSG.

Etape 11: Calcul de la puissance surfacique équivalente pour le diamètre d'antenne choisi.

Etape 12: Cumul, si nécessaire, de la puissance de bruit brouilleuse reçue.

ANNEXE 3

Description de la méthode de calcul indiquée à l'Annexe 1, avec exemple

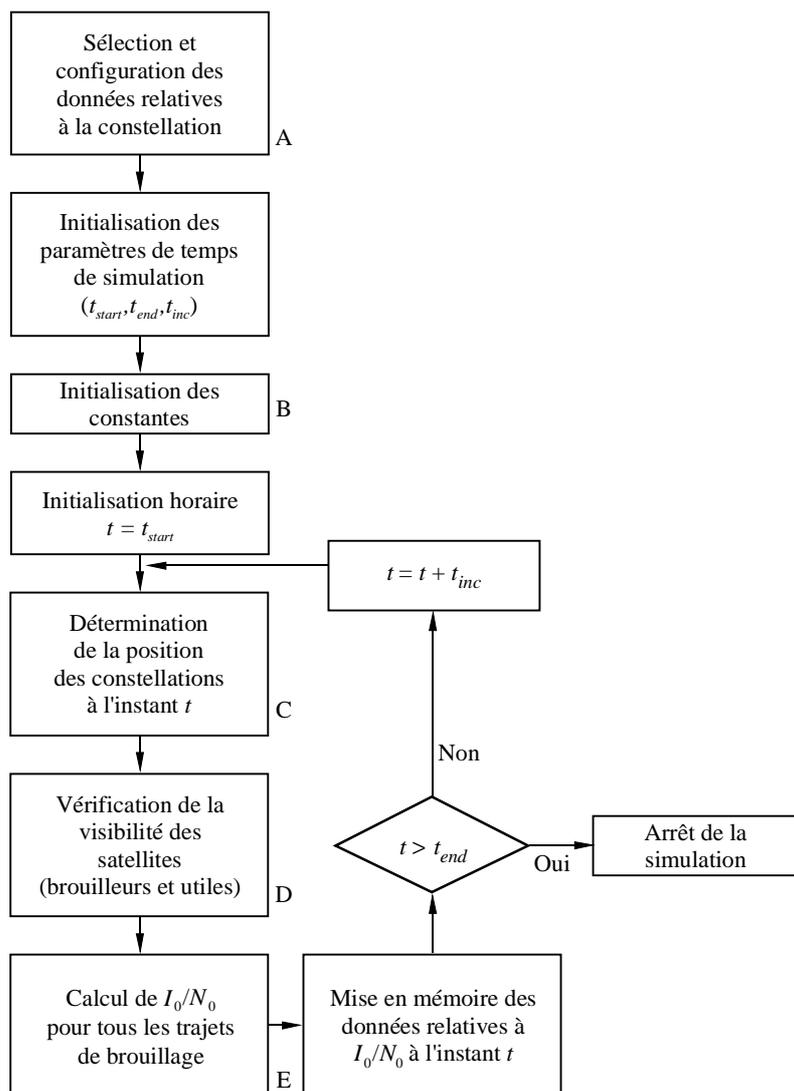
1 Introduction

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 satellites OSG.

2 Description de la méthode de calcul

La Fig. 7 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 7
Application de la méthode



2.1 Bloc A – Sélection et configuration des constellations

Dans cette phase du programme (voir la Fig. 7, 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	$C_{12\downarrow} = \frac{P_{t1\downarrow}}{BW_{tx1\downarrow}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k} \frac{1}{T_{2\downarrow}} \frac{1}{L_{p12\downarrow}}$
Const_1 liaison montante → Const_2 liaison montante	$C_{12\uparrow} = \frac{P_{t1\uparrow}}{BW_{tx1\uparrow}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k} \frac{1}{T_{2\uparrow}} \frac{1}{L_{p12\uparrow}}$
Const_2 liaison descendante → Const_1 liaison descendante	$C_{21\downarrow} = \frac{P_{t2\downarrow}}{BW_{tx2\downarrow}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k} \frac{1}{T_{1\downarrow}} \frac{1}{L_{p21\downarrow}}$
Const_2 liaison montante → Const_1 liaison montante	$C_{21\uparrow} = \frac{P_{t2\uparrow}}{BW_{tx2\uparrow}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k} \frac{1}{T_{1\uparrow}} \frac{1}{L_{p21\uparrow}}$

Dans ce Tableau 1, la notation indiciaire $1\downarrow$ correspond à une liaison descendante de la constellation 1, $2\downarrow$ à une liaison descendante de la constellation 2, $1\uparrow$ à une liaison montante de la constellation 1 et $2\uparrow$ à une liaison montante de la constellation 2. Le facteur de découplage de polarisation correspond à la combinaison émission/réception, de sorte que $12\downarrow$ 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 pas temporel (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	$I_0/N_0 = C_{12\downarrow} \frac{G_{t1\downarrow}(\varphi_1) G_{r2\downarrow}(\varphi_2)}{4\pi (R_{12\downarrow})^2}$
Const_1 liaison montante → Const_2 liaison montante	$I_0/N_0 = C_{12\uparrow} \frac{G_{t1\uparrow}(\varphi_1) G_{r2\uparrow}(\varphi_2)}{4\pi (R_{12\uparrow})^2}$
Const_2 liaison descendante → Const_1 liaison descendante	$I_0/N_0 = C_{21\downarrow} \frac{G_{t2\downarrow}(\varphi_1) G_{r1\downarrow}(\varphi_2)}{4\pi (R_{21\downarrow})^2}$
Const_2 liaison montante → Const_1 liaison montante	$I_0/N_0 = C_{21\uparrow} \frac{G_{t2\uparrow}(\varphi_1) G_{r1\uparrow}(\varphi_2)}{4\pi (R_{21\uparrow})^2}$

Dans ce Tableau 2, par exemple, sur le trajet liaison descendante Const_1 → liaison descendante Const_2, les variables sont les suivantes:

$G_{t1\downarrow}(\varphi_1)$: gain à l'émission de l'antenne d'émission de liaison descendante de Const_1 (intensité relative)

$G_{r2\downarrow}(\varphi_2)$: gain à la réception de l'antenne de réception de liaison descendante de Const_2 (intensité relative)

$R_{12\downarrow}$: 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 de la position de la constellation à l'instant t

Pour chaque intervalle de temps, avant tout calcul des niveaux de brouillage, il faut calculer la position 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 associés à ces trajets (voir la 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 (voir le Tableau 2). Les niveaux de brouillage sont mis en mémoire pour analyse ultérieure.

2.6 Calcul de l'incidence cumulée de plusieurs stations terriennes/satellites sur les niveaux de brouillage

Le brouillage total causé par plusieurs stations terriennes/satellites peut être calculé de l'une des deux manières suivantes:

Cas 1: En effectuant plusieurs simulations pour chaque station terrienne.

Cas 2: En effectuant une simulation de toutes les liaisons possibles.

Ces deux méthodes diffèrent principalement au niveau du moment où s'effectue le cumul des brouillages causés par l'ensemble des stations terriennes/satellites: dans le Cas 1, le cumul s'effectue lorsque la simulation est achevée et dans le Cas 2, pendant la simulation.

2.6.1 Cumul au moyen de plusieurs simulations

Cette méthode de calcul du brouillage total causé par plusieurs sources présente un avantage en ce sens qu'elle permet d'évaluer et de déterminer la contribution de chaque source de brouillage pour définir quelle source influe le plus sur le brouillage. L'inconvénient de cette méthode est que la simulation doit être effectuée plusieurs fois pour chaque source de brouillage éventuelle, ce qui peut prendre du temps. La quantité de données à mémoriser est relativement importante étant donné que les simulations contiennent de nombreux points de données et des erreurs de manipulation peuvent se produire au niveau des résultats totaux.

Pour calculer le brouillage total au moyen de plusieurs simulations, il est nécessaire de configurer la ou les constellations non OSG de manière à avoir les mêmes instants de départ et de fin, le niveau de brouillage I_0/N_0 étant sauvegardé pour analyse ultérieure. Après le calcul de toutes les sources de brouillage, les niveaux de brouillage peuvent être additionnés pour obtenir le niveau de brouillage total.

Comme exemple de cumul effectué avec plusieurs simulations, examinons l'exemple indiqué au § 3 de l'Annexe 3 et supposons que nous souhaitions évaluer l'incidence cumulée de deux stations terriennes OSG sur la liaison montante et la liaison descendante d'un système non OSG. Les deux stations terriennes OSG sont décrites par les paramètres figurant aux Tableaux 3 et 4; l'une des stations terriennes OSG (ET1 OSG) est située comme indiqué au Tableau 2, à 33:26:54 N, 112:04:24 O; la seconde station terrienne OSG (ET2 OSG) est située à 40:26:54 N, 112:04:24 O et est censée être desservie par un faisceau de satellite autre que celui de la station ET1 OSG. Les deux stations terriennes OSG sont censées utiliser les mêmes fréquences que la station non OSG.

L'étape suivante consiste à lancer la simulation deux fois, une fois pour chaque station terrienne OSG, et à mémoriser les résultats pour chaque pas temporel. Supposons, par exemple, que les ensembles de données suivants soient définis:

$I_0/N_0 1(t)$: série temporelle du rapport I_0/N_0 sur la liaison montante au récepteur non OSG pour les deux stations terriennes copositionnées (non OSG et ET1 OSG).

$I_0/N_0 2(t)$: série temporelle du rapport I_0/N_0 sur la liaison montante au récepteur non OSG pour les deux stations terriennes séparées (non OSG et ET2 OSG).

$I_0/N_0 A(t)$: série temporelle du rapport total I_0/N_0 au récepteur non OSG pour toutes les stations terriennes OSG.

Après la création des deux ensembles de données, le cumul peut être calculé en additionnant les résultats. Le brouillage total sur la liaison montante causé au satellite non OSG, $I_0/N_0 A(t)$, est donné par la formule suivante:

$$I_0/N_0 A(t_i) = I_0/N_0 1(t_i) + I_0/N_0 2(t_i)$$

t_i étant le pas temporel auquel le brouillage est calculé. Il convient de noter que cette méthode est assujettie à la condition que la constellation non OSG soit initialisée en même temps et ait le même pas temporel lors des deux simulations; autrement dit, la position de départ et toutes les positions ultérieures de la constellation dans l'espace doivent être identiques lors des deux simulations, faute de quoi les résultats seront incorrects.

2.6.2 Cumul au moyen d'une seule simulation

Cette méthode de calcul du brouillage total causé par plusieurs sources présente des avantages en ce sens qu'elle permet d'effectuer une seule simulation pour toutes les sources de brouillage éventuelles, d'où une économie de temps. L'inconvénient de cette méthode est qu'il n'est pas possible de procéder à un examen détaillé des données pour évaluer quelle source de brouillage contribue éventuellement le plus au brouillage total. Il est possible de remédier à cet inconvénient en donnant à l'utilisateur la possibilité de mémoriser la contribution de chaque source en fonction du temps.

Comme pour l'exemple de cumul effectué au moyen de plusieurs simulations, examinons l'exemple décrit au § 2.6.1 pour le calcul du brouillage causé par deux stations terriennes OSG. Dans ce cas, le programme d'analyse configure les deux stations terriennes et calcule le brouillage total pour chaque pas temporel.

2.7 Expressions du brouillage en termes d'epfd_↑ et d'epfd_↓

La Résolution 130 (CMR-97) définit les limites provisoires de la puissance epfd_↑ et de la puissance epfd_↓ afin de protéger le fonctionnement des systèmes OSG du brouillage causé par des systèmes non OSG utilisant les mêmes canaux. Le présent paragraphe décrit comment associer le niveau de brouillage calculé du rapport I_0/N_0 aux valeurs de la puissance epfd_↑ et aux valeurs de la puissance epfd sur la liaison descendante.

2.7.1 Puissance epfd sur la liaison descendante

La puissance epfd sur la liaison descendante ($W/(m^2 \cdot MHz)$) est calculée comme suit:

$$epfd_{\downarrow} = \sum_i 10^{pfd_i/10} \frac{G_r(\theta_i)}{G_{max}} \quad (19)$$

où:

i : indice de la source de brouillage

pfd_i : puissance surfacique produite par la i -ème source de brouillage ($dB(W/(m^2 \cdot MHz))$)

$G_r(\theta_i)$: gain de l'antenne réceptrice du récepteur qui subit le brouillage dans la direction de la i -ème source de brouillage (dBi)

G_{max} : gain maximal à la réception du récepteur qui subit le brouillage (dBi).

Le rapport de brouillage I_0/N_0 est calculé comme suit:

$$\begin{aligned} \frac{I_0}{N_0} &= \frac{P_t}{BW_{tx}} G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \\ &= \frac{P_t}{BW_{tx}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{G_t(\varphi_1)}{4\pi R^2} \frac{1}{L_p} \frac{1}{k T} G_r(\varphi_2) \end{aligned} \quad (20)$$

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 entre l'axe de visée de l'émetteur et la direction du récepteur

φ_2 : angle entre l'axe de visée du récepteur et la 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

La puissance epfd (W/(m² · Hz)) provenant de la *i*-ème source, compte tenu de la discrimination de l'antenne réceptrice et de la normalisation en fonction du gain maximal de l'antenne réceptrice, peut s'exprimer comme suit:

$$epfd_i = \frac{P_{t_i}}{BW_{tx_i}} \frac{G_{t_i}(\varphi_1)}{4\pi R_i^2} \frac{1}{L_p} \frac{G_r(\varphi_2)}{G_{max}} \quad (21)$$

Par conséquent, compte tenu des équations (20) et (21), la puissance epfd (W/(m² · Hz)) provenant de la *i*-ème source peut être exprimée en termes de rapport I_{0i}/N_0 issu de la *i*-ème source comme suit:

$$epfd_i = \frac{I_{0i}}{N_0} \frac{4\pi \times 10^6}{\lambda^2} \frac{k T}{G_{max}} \quad (22)$$

Il convient de noter que le facteur $\frac{4\pi \times 10^6}{\lambda^2} \frac{k T}{G_{max}}$ est une constante utilisée pour la simulation et peut être appliqué aux résultats de la simulation. Par ailleurs, si le rapport I_0/N_0 utilisé est un cumul sur plusieurs sources, le facteur de conversion peut toujours être appliqué au rapport I_0/N_0 cumulatif pour obtenir la puissance epfd totale figurant dans l'équation (19).

2.7.2 Puissance epfd sur la liaison montante

La puissance epfd sur la liaison montante (W/(m² · MHz)) est calculée comme suit:

$$epfd_{\uparrow} = \sum_i 10^{p_i/10} \frac{G_t(\varphi_i)}{4\pi R^2} \frac{G_r(\theta_i)}{G_{max}} \quad (23)$$

où:

$G_r(\theta_i)$: gain de l'antenne réceptrice du récepteur qui subit le brouillage en direction de la *i*-ème source de brouillage.

Si l'on remanie l'équation (23), la puissance epfd sur la liaison montante (W/(m² · Hz)) provenant de la *i*-ème source peut être exprimée comme suit:

$$epfd_{\uparrow_i} = \frac{P_{t_i}}{BW_{tx_i}} \frac{G_{t_i}(\varphi_1)}{4\pi R_i^2} \frac{1}{L_p} \frac{G_r(\varphi_2)}{G_{max}} \quad (24)$$

où il est supposé que $p_i = 10 \log\left(\frac{P_{t_i}}{BW_{tx_i}}\right)$.

Par conséquent, compte tenu des équations (20) et (24), la puissance epfd_↑ (W/(m² · Hz)) provenant de la *i*-ème source peut être exprimée en fonction du rapport I_{0i}/N_0 de la *i*-ème source comme suit:

$$epfd_{\uparrow_i} = \frac{I_{0i}}{N_0} \frac{4\pi \times 10^6}{\lambda^2} \frac{k T}{G_{max}} \quad (25)$$

Il convient de noter que le facteur $\frac{4\pi \times 10^6}{\lambda^2} \frac{k T}{G_{max}}$ est une constante utilisée pour la simulation et peut être appliqué aux résultats de la simulation. Par ailleurs, si le rapport I_0/N_0 utilisé est un cumul sur plusieurs sources, le facteur de conversion peut toujours être appliqué au rapport I_0/N_0 cumulatif pour obtenir la puissance epfd sur la liaison montante figurant dans l'équation (23).

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 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 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. Dans le système OSG, on n'utilise aucune 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_t , BW_{tx} et P_t/BW_{tx} ne sont pas requis.

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 résultats donnés aux Fig. 8 à 13 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.

Les Fig. 8 et 9 permettent de connaître le rapport I_0/N_0 en fonction du pourcentage de temps pendant lequel les valeurs correspondantes sont observées. La Fig. 8 donne ce rapport pour une configuration dans laquelle le réseau non OSG brouille le réseau OSG, tandis que la Fig. 9 correspond à la configuration inverse.

FIGURE 8

Brouillage causé par un réseau non OSG à un réseau OSG

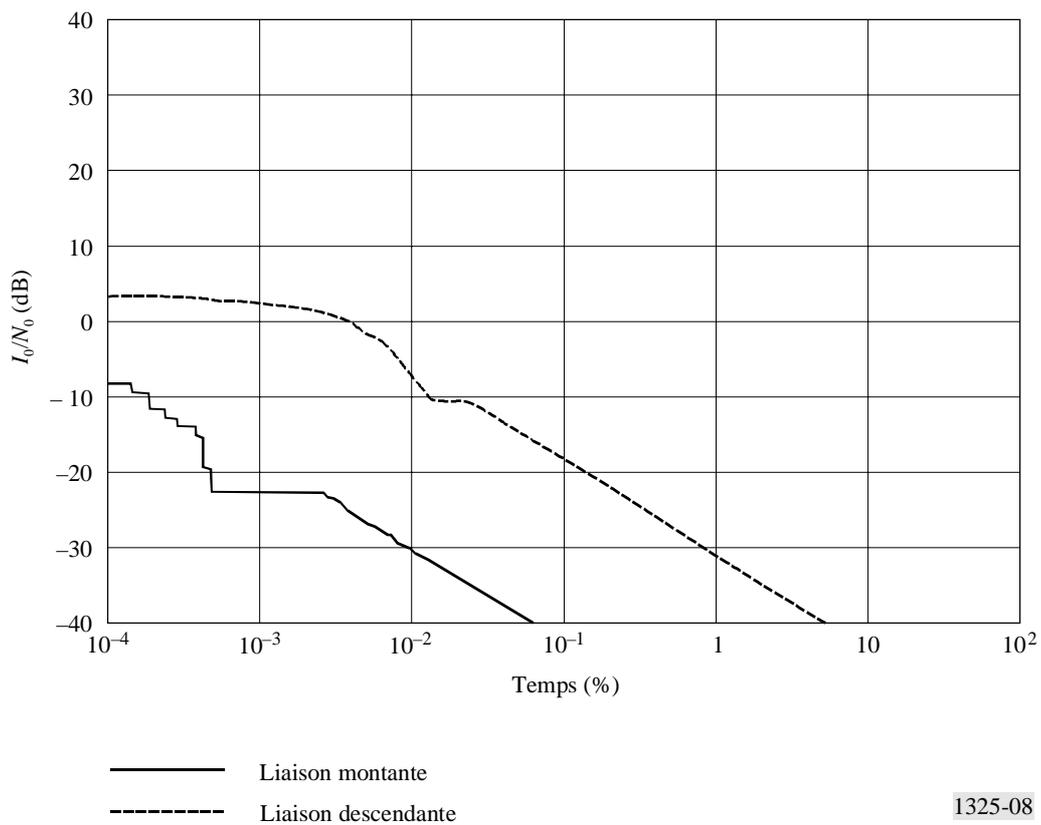
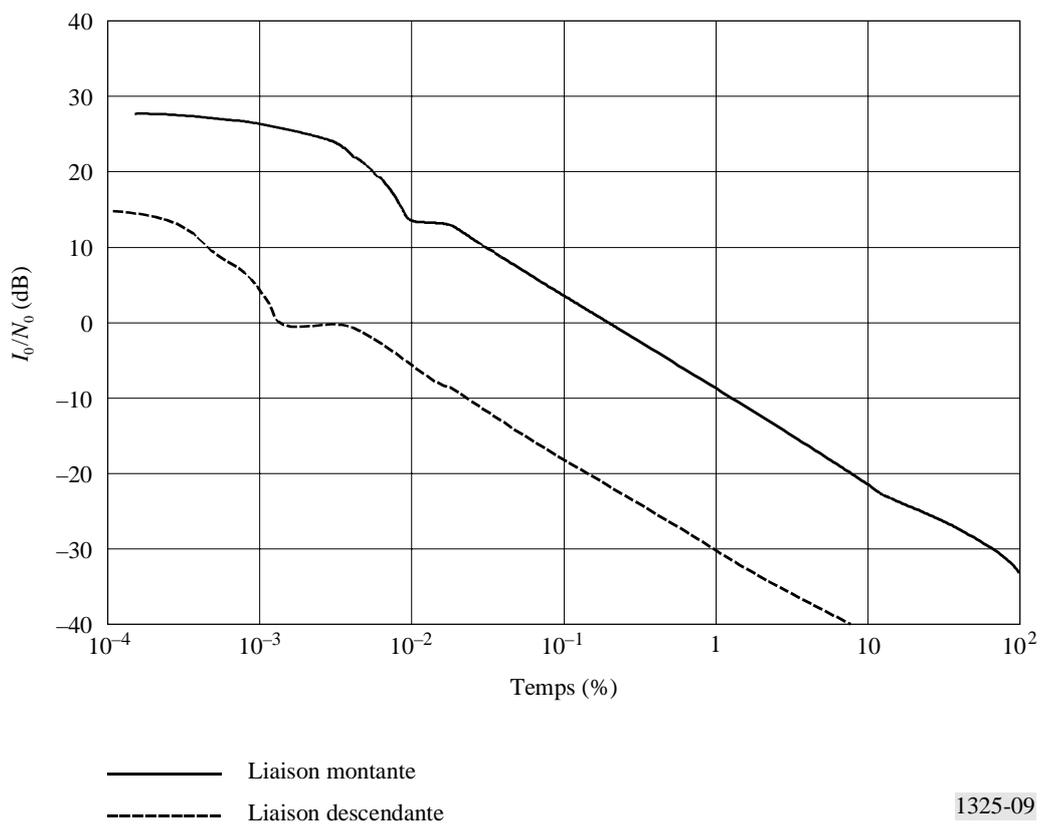


FIGURE 9

Brouillage causé par un réseau OSG à un réseau non OSG



Les Fig. 10 et 11 indiquent le nombre d'événements (et leur durée) pendant lesquels le rapport I_0/N_0 dépasse un niveau prédéterminé. La Fig. 10 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. 11 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. 12 et 13 retracent le profil chronologique du rapport I_0/N_0 dans le sens liaison montante OSG vers liaison montante non OSG. Ces graphiques sont établis pour la période de temps pendant laquelle le niveau de brouillage atteint son maximum. La Fig. 12 porte sur une période d'une heure graduée, avec graduation par intervalles de 15 min. La Fig. 13 donne le détail de l'événement de brouillage de crête représenté à la Fig. 12.

FIGURE 10

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

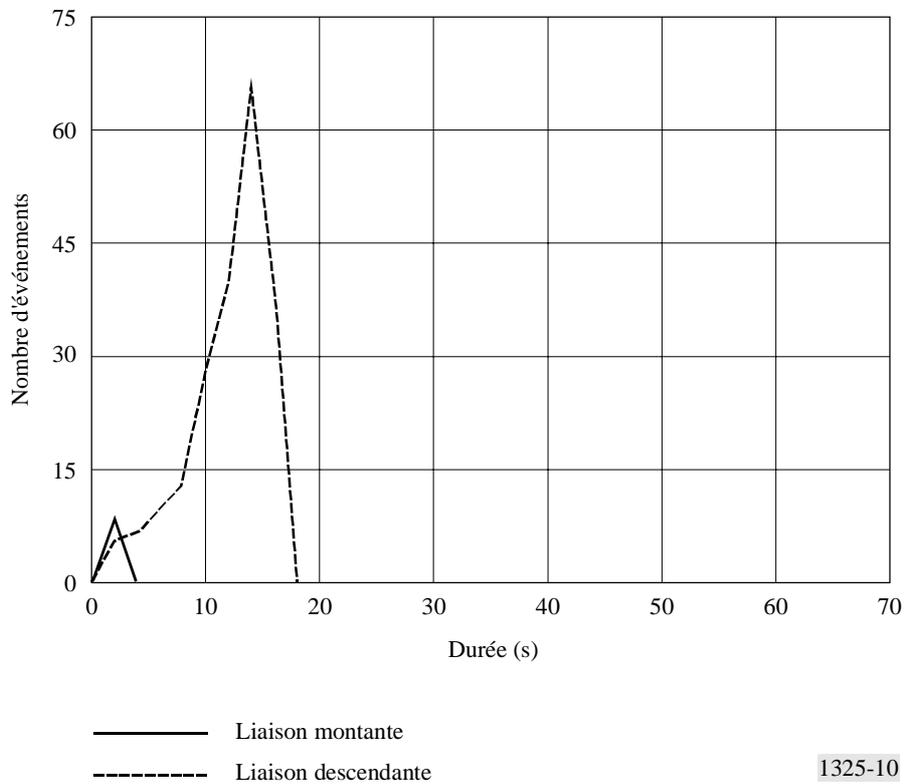


FIGURE 11

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

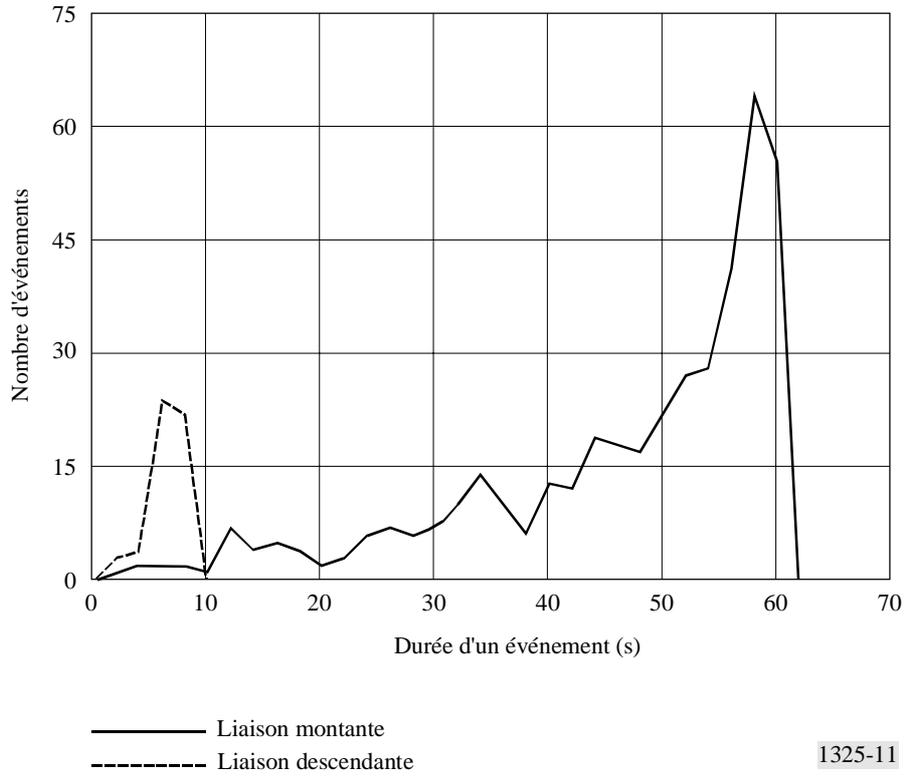


FIGURE 12

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

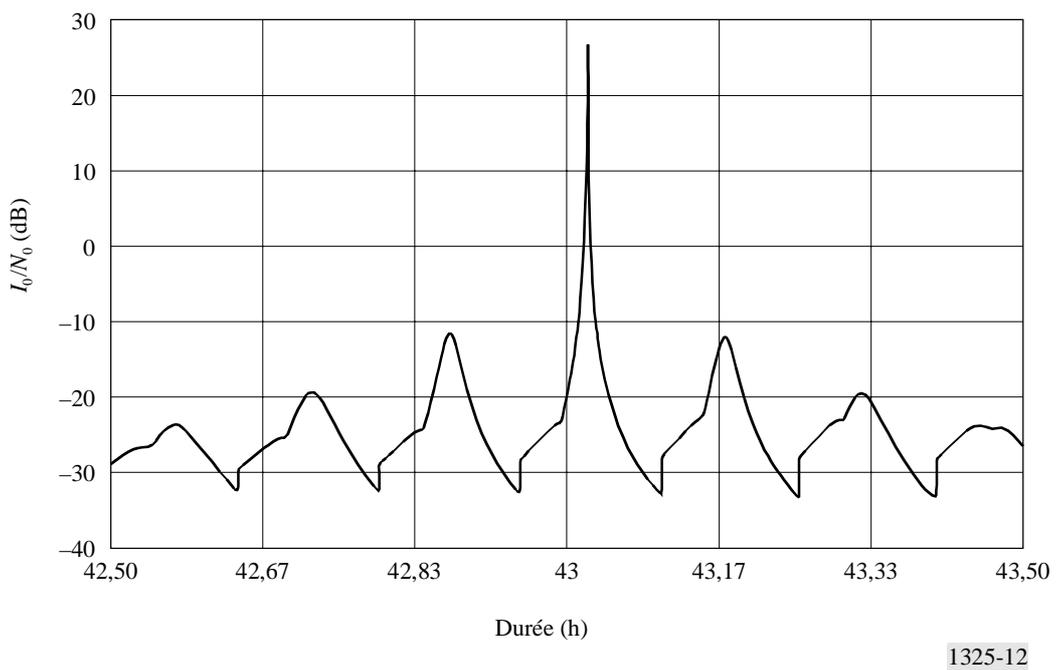
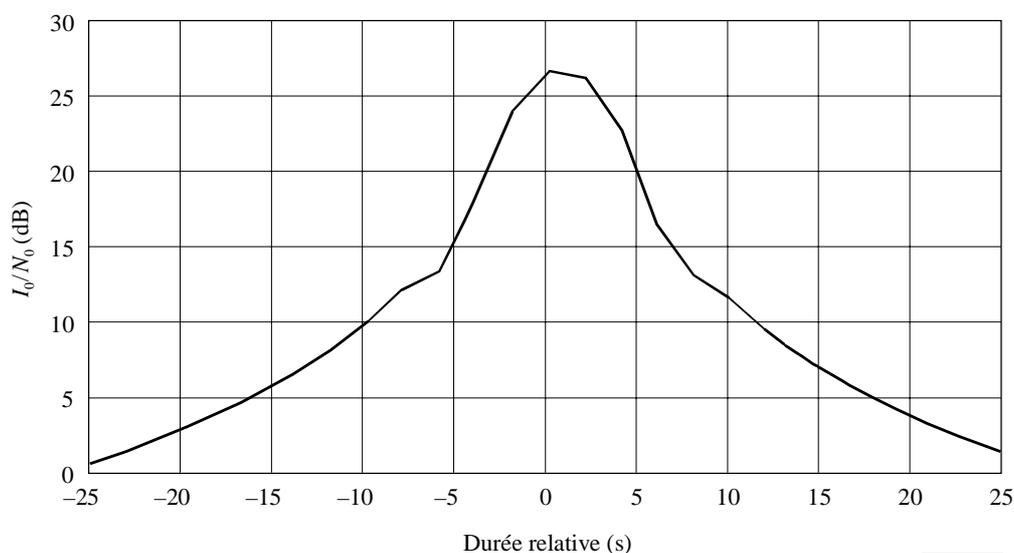


FIGURE 13

Détail d'un événement de brouillage de crête de la Fig. 12, centré sur l'instant $t = 43$ h 74 s



1325-13

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. 8 et 9 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. 8 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 causé par un réseau OSG à un réseau non OSG. Les valeurs de crête de la Fig. 9 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 4

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 un résultat statistique non biaisé.
- 2 Prévoir à l'Annexe 1, § 2.7, une discussion du choix du pas temporel de simulation pour les diverses constellations, c'est-à-dire pour les constellations à orbite elliptique (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 visibles par 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.
- 5 Prise en compte à l'Annexe 3, § 2.2, de systèmes faisant appel à la commande de puissance en fonction de la distance entre une station terrienne non OSG et un satellite non OSG.
- 6 Examen de la question de savoir s'il est approprié d'inclure un exemple des méthodes dans la Recommandation.
- 7 Examen de la question de savoir s'il est souhaitable d'inclure dans la Recommandation des précisions sur la mise en œuvre, par exemple les constantes d'optimisation figurant à l'Annexe 3, § 2.2. Il convient aussi de voir dans quelle mesure certains paramètres peuvent être supposés constants, compte tenu de certains facteurs tels qu'antennes à gain de crête adaptable, commande de puissance et orbites elliptiques.