

RECOMMANDATION UIT-R S.1325-2

**Méthodes de simulation pour la détermination des statistiques relatives
au brouillage à court terme entre des systèmes à satellite non géostationnaire
du service fixe par satellite utilisant les mêmes fréquences dans le même sens
et d'autres systèmes du service fixe à satellite non géostationnaire
ou géostationnaire**

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

(1997-2000-2001)

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 systèmes SFS non OSG sont placés en orbites circulaires;
- j) que les données relatives au nombre et à la position précise des stations terriennes ne sont généralement pas disponibles auprès de l'UIT,

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 système 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 système non OSG dans un réseau à satellite 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 système non OSG sur la liaison montante;

4 d'envisager d'utiliser la méthode exposée à l'Annexe 2 pour calculer la puissance epfd_↓ produite par un système non OSG sur une station terrienne OSG en exploitation afin d'évaluer la conformité aux limites opérationnelles additionnelles contenues dans l'article 22 du Règlement des radiocommunications (RR);

5 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_↑ et de la puissance epfd_↓ d'un système non OSG. L'Annexe 3 décrit différentes approches permettant d'associer la méthode indiquée à l'Annexe 1 au calcul de la puissance epfd_↑ et de la puissance epfd_↓ 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 systèmes 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.

NOTE 8 – Le Bureau des radiocommunications utilisera un logiciel conforme aux indications de la Recommandation UIT-R S.1503 pour vérifier la conformité des limites de puissance epfd à l'Article 22 du RR.

NOTE 9 – Les Annexes à la présente Recommandation s'appliquent aux systèmes non OSG à orbite circulaire.

ANNEXE 1

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

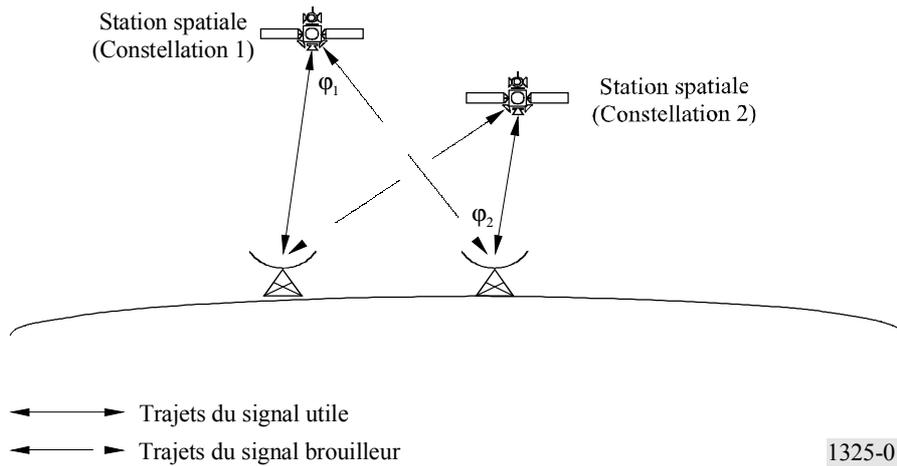
1 Description de la méthode et du principe de simulation

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



1325-01

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

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

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) (fraction numérique)
- $G_r(\varphi_2)$: gain à la réception (intensité relative) (fraction numérique)
- φ_1 : angle entre l'axe de visée de l'émetteur et la direction du récepteur (degrés)
- φ_2 : angle entre l'axe de visée du récepteur et la direction de l'émetteur (degrés)

- λ : longueur d'onde de l'émetteur (m)
 R_i : longueur du trajet brouilleur (m)
 k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ W/(Hz · K))
 T : température de bruit (K)
 L_p : facteur de découplage de polarisation (fraction numérique ≥ 1)

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:

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

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 (cas d'une liaison montante) ou par toutes les stations spatiales (cas d'une liaison descendante) 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 de réception en direction de chaque station terrienne pour calculer le brouillage total sur la liaison montante, $epfd_{\uparrow}$. De la même manière, on doit tenir compte de la discrimination d'antenne de la station terrienne de réception en direction de chaque station spatiale non OSG, pour calculer le brouillage total sur la liaison descendante, $epfd_{\downarrow}$.

L' $epfd$ est définie comme étant la somme des puissances surfaciques produites au niveau d'une station de réception du système brouillé (située à la surface de la Terre ou en orbite, selon le cas) par toutes les stations d'émission du système brouilleur, compte tenu de la discrimination hors-axe d'une antenne de réception de référence que l'on suppose pointée vers sa direction nominale.

$$epfd = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^{i=N_a} 10^{P_i/10} \frac{G_t(\varphi_{1i})}{4\pi R_i^2} \frac{G_r(\varphi_{2i})}{G_{r_{max}}} \right) \quad (2a)$$

où:

- N_a : nombre de stations d'émission du système à satellites brouilleur visibles depuis la station de réception du système à satellites brouillé (la station étant située, selon le cas, à la surface de la Terre ou en orbite)
 i : indice de la station d'émission considérée appartenant au système à satellites brouilleur
 P_i : puissance RF en entrée de l'antenne de la station d'émission considérée appartenant au système à satellites non OSG (dBW)

- BW_{tx} : largeur de bande en émission (Hz)
- $G_t(\varphi_{1_i})$: gain de l'antenne d'émission de la station considérée du système à satellites non OSG en direction de la station de réception (intensité relative, fraction numérique)
- $G_r(\varphi_{2_i})$: gain de l'antenne de réception de la station de réception en direction de la $i^{\text{ème}}$ station d'émission considérée du système à satellites non OSG (intensité relative, fraction numérique)
- $G_{r_{max}}$: gain maximum de l'antenne de la station de réception (fraction numérique)
- φ_1 : angle entre l'axe de visée de la station d'émission considérée du système à satellites non OSG et la direction de la station de réception
- φ_2 : angle entre l'axe de visée de la station de réception et la direction de la $i^{\text{ème}}$ station d'émission considérée du système à satellites non OSG
- R_i : distance entre la station d'émission considérée du système à satellites non OSG et la station de réception (m).

En fonction de I_0/N_0 , la puissance $epfd$ peut être exprimée comme suit:

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

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

$$10^{epfd/10} = \sum_i \frac{P_{t_i}}{BW_{tx}} \frac{G_t(\varphi_{1_i})}{4\pi R_i^2} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \right) \frac{G_r(\varphi_{2_i})}{G_{r_{max}}} \left/ \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \right) \right. \quad (2d)$$

où $epfd$ est exprimé en dB(W/(m² · 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:

$$10^{epfd/10} = \sum_i \frac{I_{0_i}}{N_0} \left/ \left(G_{r_{max}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \right) \right. \quad (2e)$$

soit:

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

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

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 noeuds, 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:

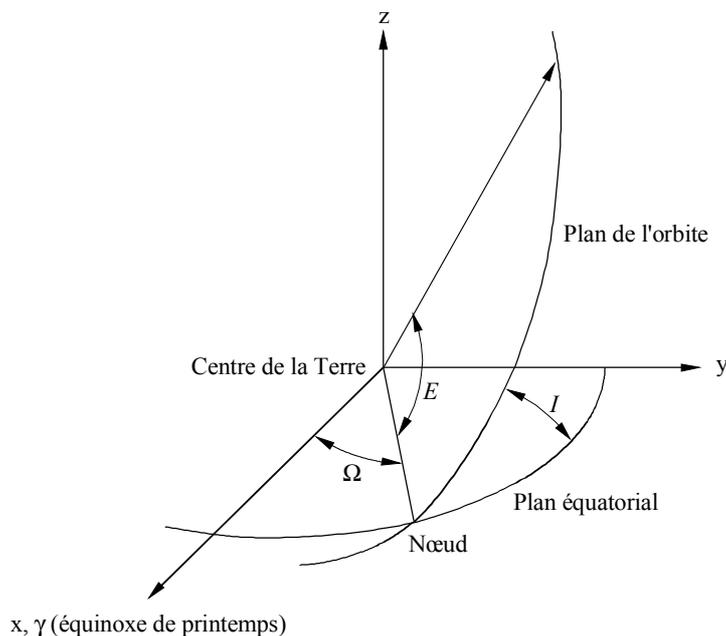
$$\frac{m_{sv} v^2}{r} = \frac{G M_e m_{sv}}{r^2} \quad (3)$$

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



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 noeud ascendant de l'orbite (RAAN, *right ascension of the ascending node*). 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 noeuds 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:

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

2.1.2 Perturbations

Pour les satellites OSG:

Inclinaison de l'orbite du satellite

Des satellites en orbite depuis un certain temps peuvent connaître une légère inclinaison de leur orbite. Une déviation se produit alors généralement, qui ne doit pas dépasser une certaine limite.

La déviation du faisceau d'antenne à partir de sa direction de pointage nominale

Les facteurs suivants contribuent au total de la variation de la zone à la surface de la Terre illuminée par le faisceau du satellite:

- variations liées au maintien en position du satellite;
- variations consécutives aux tolérances de pointage, dont l'importance s'accroît pour les zones de couverture présentant de faibles angles d'élévation;
- effet dû à l'erreur de lacet, qui augmente à mesure que l'ellipse du faisceau s'accroît.

Les effets de toutes ces variations possibles doivent être évalués au cas par cas, puisque l'incidence totale sur la zone couverte dépend de la géométrie du faisceau du satellite: il ne serait donc pas raisonnable de caractériser par une valeur unique la variation de la zone couverte dans toutes les situations.

Dans le cas des satellites non OSG, la vitesse de précession exacte en longitude subit une faible dérive due aux erreurs de maintien en position longitudinale. Cet effet doit être modélisé et intégré dans les simulations.

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

L'identification des faisceaux utilisés par un satellite non OSG en un lieu et un moment quelconque dépend à la fois de la stratégie de poursuite et de l'emplacement des stations terriennes non OSG. Les stratégies de poursuite sont décrites dans le § 2.3.2. On trouvera dans les paragraphes suivants la description de techniques permettant de déterminer les positions des stations terriennes non OSG. Il convient d'utiliser pour chaque système non OSG la technique la plus appropriée.

Il est nécessaire pour la simulation, de connaître la position des stations terriennes non OSG, à la surface de la Terre qui peuvent fonctionner à des fréquences et à des polarisations identiques. Dans certains cas, il se peut qu'on ne connaisse ni le nombre ni la position exacte des stations terriennes non OSG.

Si l'on modélise chaque station terrienne non OSG dont la liaison montante et/ou descendante est susceptible de brouiller la liaison montante et/ou descendante d'une station terrienne victime donnée, le temps de simulation deviendra sans doute excessif. Il sera souvent possible de limiter le nombre de stations terriennes non OSG prises en compte par le modèle, ce qui diminuera de manière substantielle le temps de simulation, sans perte significative de la précision des statistiques calculées de puissance $epfd$. Dans la plupart des cas, les contributions les plus importantes à la puissance $epfd$ seront apportées par les liaisons montantes et descendantes des stations terriennes non OSG les plus proches de la station terrienne victime, alors que les contributions dues aux liaisons montantes et descendantes des autres stations terriennes non OSG diminueront progressivement à mesure qu'augmente leur distance à la station terrienne victime. On peut par exemple réduire le temps nécessaire à une simulation complète en effectuant une première simulation rapide comprenant un nombre limité de stations terriennes non OSG disposées de manière symétrique autour de la station terrienne victime, avant d'ajouter un anneau concentrique de stations terriennes non OSG pour effectuer une nouvelle simulation rapide. On répètera ce processus jusqu'à ce que les statistiques de puissance $epdf$ produites par ces passes successives de simulation rapide n'augmentent pas de manière significative. Il conviendra alors d'utiliser le modèle résultant pour la simulation définitive.

2.3.1.1 Distribution connue des stations terriennes non OSG

On connaît dans certains cas la position exacte de toutes les stations terriennes non OSG. Il convient alors d'utiliser ces positions pour les systèmes non OSG, car elles en constituent la configuration la plus précise.

2.3.1.2 Distribution uniforme des stations terriennes non OSG

On suppose que chaque cellule présente une distribution uniforme des stations terriennes non OSG.

Pour la simulation, on peut spécifier la position des stations terriennes non OSG sur la base d'un nombre prévu de stations terriennes situées sur une zone unitaire de la Terre appartenant à une région géographique donnée.

La distribution des stations terriennes non OSG doit être effectuée de façon uniforme à la surface de la Terre, connaissant la densité par km^2 des stations terriennes non OSG utilisant les mêmes fréquences et les mêmes polarisations, et la distance moyenne au centre des cellules créées par le système non OSG.

Pour produire une distribution uniforme des stations terriennes non OSG sur la liaison montante, il convient d'utiliser la méthode suivante:

Etape 1: Calculer le nombre n_{es} de stations terriennes non OSG réellement en fonctionnement que représente la station terrienne considérée, en utilisant la formule suivante:

$$n_{es} = d_{es} \cdot d_{es} \cdot \sigma_{es}$$

où:

d_{es} : distance moyenne entre les stations terriennes non OSG utilisant les mêmes fréquences et les mêmes polarisations (km)

σ_{es} : densité par km² des stations terriennes non OSG utilisant les mêmes fréquences et les mêmes polarisations.

Il convient ensuite, pour effectuer le calcul de brouillage, d'attribuer comme suit un niveau de p.i.r.e. équivalente à chaque station terrienne non OSG équivalente:

Etape 2: Calculer de la manière suivante la p.i.r.e. à utiliser pour chaque station terrienne non OSG représentative:

$$e.i.r.p.rep = e.i.r.p.es + 10 \log_{10} n_{es}$$

où:

$e.i.r.p.rep$: p.i.r.e. d'une station terrienne non OSG représentative (dBW)

$e.i.r.p.es$: p.i.r.e. par station terrienne non OSG (dBW)

n_{es} : nombre de stations terriennes non OSG réellement en fonctionnement.

$$e.i.r.p.es = P_t + G_t$$

où:

P_t : puissance émise par la station terrienne non OSG (dB)

G_t : gain de la station terrienne non OSG en direction du satellite non OSG (dBi).

Etape 3: A chaque distance d_{es} en latitude et distance d_{es} en longitude dans la zone de service OSG, placer une station terrienne non OSG représentative rayonnant une puissance $e.i.r.p.rep$.

2.3.1.3 Distribution probabiliste des stations terriennes non OSG

On peut fonder l'assignation des positions des stations terriennes non OSG sur une loi probabiliste. On peut choisir les attributions de ressources de manière continue et aléatoire, ou de manière globale avant le début de la simulation (en fonction par exemple de la géographie ou du moment considéré). Une séquence d'amorçage aléatoire doit être utilisée pour pouvoir répéter la simulation dans les mêmes conditions.

2.3.1.4 Distribution des stations terriennes non OSG fondée sur la population

On peut utiliser les densités publiées de population à la surface de la Terre pour déterminer la distribution géographique des stations terriennes non OSG. Les stratégies de poursuite doivent être utilisées plus fréquemment pour les stations terriennes présentant les plus fortes densités de population.

2.3.1.5 Distribution de stations terrestres non OSG fondée sur une exigence particulière

Il est probable que la distribution de stations terrestres non OSG dépendent du type de service fourni (le marché ciblé peut être rural ou urbain par exemple). Il convient d'utiliser un modèle plus précis de distribution des stations terrestres non OSG si l'on connaît un tel modèle.

2.3.2 Stratégie de poursuite

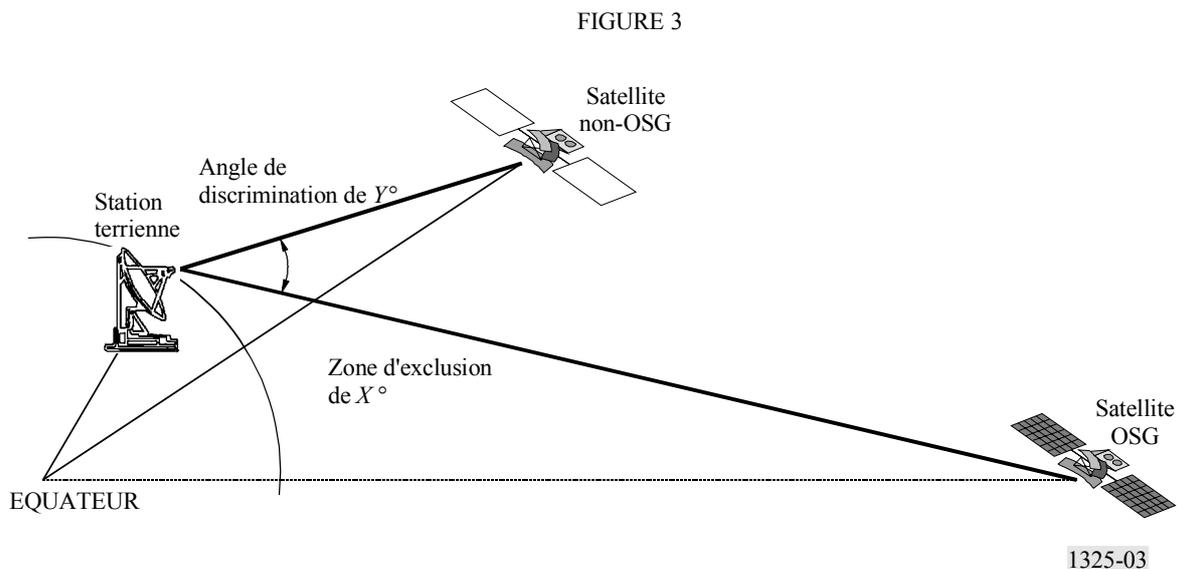
2.3.2.1 Evitement de l'arc OSG

Certains systèmes non OSG ont été conçus afin de réutiliser une fréquence déjà largement utilisée par des systèmes OSG. Cette réutilisation de fréquence est possible grâce à plusieurs techniques, dont certaines sont décrites ci-après.

2.3.2.1.1 Evitement de l'arc OSG fondé sur la latitude

Afin de diminuer le niveau de brouillage, certains systèmes utilisent une technique permettant d'éviter le couplage entre le faisceau principal de leurs satellites et le faisceau principal de la station terrestre OSG. Une zone d'exclusion à $\pm X^\circ$ est définie autour de l'équateur. Lorsqu'un satellite non OSG pénètre dans la zone d'exclusion, le trafic du faisceau pour lequel il y a un couplage de faisceau principal est transféré à un autre satellite ne se trouvant pas dans cette zone.

De plus, ces systèmes ont été conçus de telle façon qu'il y ait un angle de discrimination minimum de Y° au niveau de la station terrestre entre les satellites OSG et les satellites non OSG.



On utilise souvent cette technique pour les systèmes en orbite moyenne.

2.3.2.1.2 Evitement de l'arc OSG fondé sur un angle entre un satellite non OSG et l'arc OSG

La technique de protection de l'arc OSG mise en œuvre pour d'autres systèmes consiste à interrompre les faisceaux lorsque l'angle de séparation entre l'arc OSG et un satellite non OSG, vu d'un point terrestre quelconque d'une cellule, est inférieur à α° .

Cette valeur α dépend du système, mais on la prend généralement égale à 10° .

2.3.2.1.3 Evitement de l'arc OSG fondé sur la conception du système

Des techniques particulières ont été mises en œuvre pour certains systèmes, en fonction de la conception de ces derniers. Il peut y avoir plusieurs types de protection de satellite OSG.

2.3.2.2 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.

2.3.2.2.1 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} :

$$(\vec{r} \cdot \vec{v})_{min}$$

correspond à la valeur minimale appliquée
à tous les satellites situés au-dessus de
l'angle d'élévation minimum (15)

Cette procédure est illustrée à la Fig. 4. 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).

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

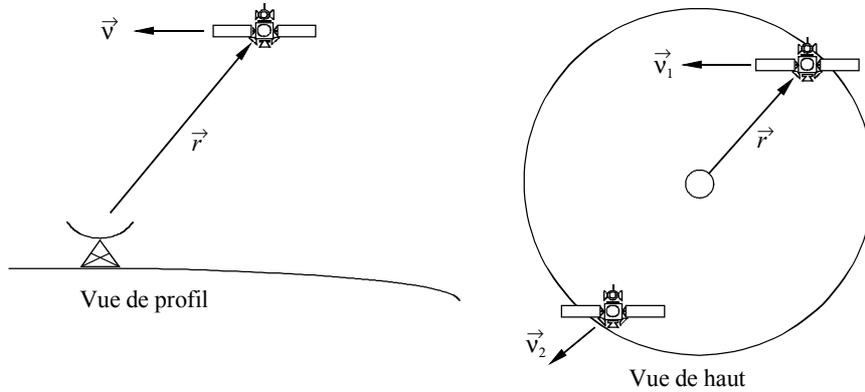
Cette stratégie de sélection nécessite un plus grand nombre de transferts que celle qui est fondée sur la durée de présence la plus longue mais elle peut servir à améliorer la qualité de fonctionnement des liaisons du système non OSG. Le satellite actif est choisi parmi ceux qui possèdent un répéteur 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.

Lorsqu'on applique la diversité satellite, il faudra appliquer le même processus de sélection à tous les satellites que nécessite cette diversité. Ainsi, le prochain satellite choisi sera celui correspondant à la seconde élévation la plus élevée, le troisième sera celui correspondant à la troisième élévation la plus élevée, etc.

FIGURE 4

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



1325-04

2.3.2.2.3 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 OSG 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.

2.3.2.2.4 Sélection de la station spatiale fondée sur une attribution de ressources particulière

Il faudra choisir une attribution de ressources plus particulière pour les systèmes non OSG si celle-ci diffère des trois attributions susmentionnées.

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 R (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:

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

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 $P_t(R_w)$ 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:

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

où:

$G_{rw}(0)$: gain maximal à la réception du signal utile au niveau de l'antenne utile

$G_{tw}(0)$: gain maximal à la transmission du signal utile au niveau de l'antenne utile

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:

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

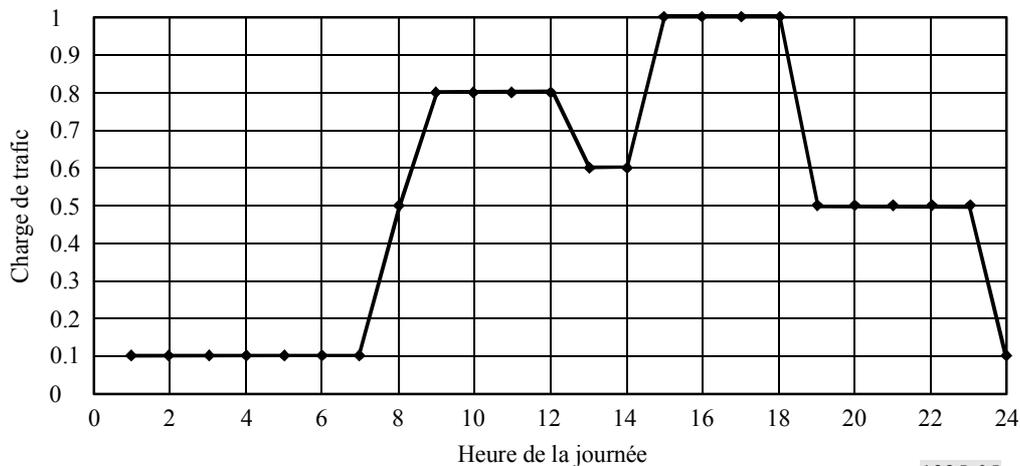
2.3.4 Trafic

2.3.4.1 Nature variable avec le temps du trafic

La nature variable avec le temps du brouillage causé par un système non OSG et subi par un système OSG ou non OSG doit être prise en compte pour modéliser le brouillage de façon précise. La variation de trafic dépend de l'heure locale en vigueur au niveau de la station terrienne non OSG. Pour un système non OSG utilisant l'accès multiple par répartition en code (AMRC), la puissance émise par porteuse dépend de la charge de trafic sur une porteuse donnée: elle peut ainsi varier au cours d'une journée en fonction de la demande de trafic. Il s'agit d'une caractéristique spécifique à l'accès AMRC.

On propose ici un modèle de trafic de référence. S'il existe un modèle de demande de service correspondant plus précisément au système non OSG considéré, il peut être préférable d'utiliser celui-ci plutôt que le modèle de référence de trafic donné dans la Fig. 5.

FIGURE 5
Modèle de trafic



1325-05

On tient compte du coefficient de trafic dans l'expression de la puissance émise maximale:

$$P_t = P_{max} \times C_{trafic}$$

où:

- P_t : puissance émise (W)
- P_{max} : puissance émise maximale (W)
- $C_{traffic}$: coefficient de trafic dépendant de l'heure locale.

Les coefficients de trafic ne sont applicables qu'au mode d'accès AMRC.

Il convient de noter que la charge de trafic non OSG peut parfois être corrélée au trafic OSG, suivant le type de services offerts par les deux systèmes. Le brouillage causé lors des périodes durant lesquelles le trafic OSG est très faible aura vraisemblablement des incidences différentes sur la qualité de fonctionnement du réseau OSG. Si le satellite OSG utilise également l'accès AMRC, les statistiques de puissance $epfd$ calculées prenant en compte les variations de trafic non OSG pourraient, dans certains cas, conduire à des résultats pouvant ne pas correspondre entièrement aux statistiques de brouillage qu'observent les opérateurs OSG durant les heures de trafic élevé.

2.3.4.2 Dépendance géographique du trafic

Le modèle de trafic de référence indiqué au paragraphe précédent ne dépend que de l'heure considérée. Les statistiques de trafic sont également susceptibles de varier en fonction de la position géographique, des marchés visés ainsi que d'autres facteurs. Pour atteindre une précision accrue, il peut être nécessaire de disposer d'un modèle de trafic supplémentaire tenant compte de la position géographique, des marchés visés et d'autres facteurs. Ce modèle dépendra toutefois du type de services fournis par les systèmes, du système lui-même et du pays considéré.

Si, pour un système non OSG donné, il existe un modèle de trafic correspondant plus précisément à sa demande de service et dépendant des positions géographiques et du marché visé, il est possible d'utiliser ledit modèle. Si aucune donnée précise n'est disponible, on pourra considérer que la demande de trafic est identique partout sur la Terre, ce qui constitue une hypothèse prudente. Dans ce cas, le modèle de trafic utilisé ne dépendra plus que de l'heure considérée.

2.4 Paramètres d'antenne

2.4.1 Paramètres d'antenne de station terrienne 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 8 du RR;
- Recommandation UIT-R S.465;
- Recommandation UIT-R S.580;
- Recommandation UIT-R S.1428.

La Recommandation UIT-R S.1428 a été élaborée pour tenir compte d'une description plus détaillée, quoique prudente, de la forme de diagramme, de façon à pouvoir l'utiliser de manière plus réaliste pour les calculs de brouillage relatifs aux systèmes non OSG du SFS.

2.4.2 Paramètres d'antenne de station spatiale non OSG

Pour réaliser une analyse de brouillage, il faut modéliser les antennes de faisceau multiple de satellite non OSG grâce à l'utilisation d'un des diagrammes ci-après (en fonction de leur disponibilité) proposés dans la Recommandation UIT-R S.1528:

- diagrammes d'antenne mesurés;
- diagrammes d'antenne de référence proposés;
- une fonction analytique modélisant les lobes latéraux du satellite non OSG.

2.4.3 Diagrammes d'antenne de station spatiale OSG

Le diagramme d'antenne de référence du satellite OSG à utiliser pour réaliser l'analyse de brouillage doit être conforme à la Recommandation UIT-R S.672, c'est-à-dire reposer sur les paramètres suivants:

- dans la bande 14/11 GHz, un diagramme d'antenne présentant un gain de 32,4 dBi, un niveau de lobes latéraux $L_S = -20$ dB* et une ouverture de faisceau de 4°;
- dans la bande 30/20 GHz, un diagramme d'antenne présentant un gain de 40,7 dBi, un niveau de lobes latéraux $L_S = -10$ dB* (ce qui constitue une exception par rapport aux indications de la Recommandation UIT-R S.672) et une ouverture de faisceau de 1,55°.

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 la même polarisation 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).

* Lorsque $L_S = -10$ dB, il convient d'utiliser les valeurs $a = 1,83$ et $b = 6,32$ pour les équations de l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R S.672 relatives aux faisceaux circulaires à alimentation unique. Quelle que soit la valeur de L_S , l'équation du faisceau principal parabolique doit démarrer à zéro.

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));
- Modèle de trafic utilisé (voir le § 2.3.4);
- Description de la stratégie de sélection utilisée pour les stations spatiales non OSG (fondée sur la durée de présence la plus longue, l'angle d'élévation le plus élevé, l'angle de séparation le plus important pour l'arc OSG, la diversité satellite, etc.) (voir le § 2.3.2.2);
- Mise en oeuvre de la technique d'évitement de l'arc OSG si le système non OSG le nécessite (voir le § 2.3.2.1);
- Densité prévue de stations terriennes non OSG situées dans différentes régions géographiques de la zone de service du réseau non OSG, si la localisation des stations terriennes non OSG est inconnue (voir le § 2.3.1);
- Perturbations (voir le § 2.1.2).

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), ou de l'epfd (dB(W/(m² · 40 kHz))), 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, ou du niveau de crête de l'epfd (puissance epfd en fonction du temps);
- nombre d'occurrences de dépassement d'un niveau prédéfini du rapport I/N (et durée des phénomènes) ou de l'epfd. Par exemple, si le niveau prédéfini est de X dB, le phénomène commence lorsque le niveau de brouillage dépasse X 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:

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

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

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

avec:

- a : vitesse angulaire du satellite dans un système de coordonnées fixes par rapport à la Terre (système de coordonnées de référence géosynchrone géocentrique) (rad/s)
- 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) (rad/s)
- I : inclinaison de l'orbite du satellite (rad)
- 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 (rad)
- R_e : rayon de la Terre (6 378 km) (m)
- h : altitude du satellite (m)
- ε : angle d'élévation de l'antenne de la station terrienne (rad)
- $\Phi_{3 \text{ dB}}$: ouverture du faisceau d'antenne de la station terrienne à 3 dB (rad)
- N_{hits} : nombre d'occurrences observées dans le faisceau de la station brouillée à 3 dB ($N_{hits} = 5$)
- Δt : pas temporel de simulation (s).

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.

Avec des orbites semblables dans le système 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 noeud 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.

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

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 noeud. L'angle entre les ascensions initiales du noeud 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 du satellite, 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 OSG:

- Lorsqu'un satellite non OSG 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 satellite:

- 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. Étant 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 $1,5^\circ$. Étant 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 OSG 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 systèmes SFS non OSG à orbite circulaire et des réseaux SFS OSG fonctionnant dans des bandes de fréquences inférieures à 30 GHz

1 Introduction

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

Ces algorithmes peuvent être utilisés pour calculer la fonction de densité cumulative de la puissance $epfd$ générée par le système non OSG. Les cas de brouillage suivants sont étudiés:

- brouillage de la liaison montante causé par les stations terriennes émettrices d'un système non OSG à une station spatiale de réseau OSG;
- brouillage de la liaison descendante causé par les stations spatiales émettrices d'un système 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 $epfd_{\downarrow}$ et de la puissance $epfd_{\uparrow}$ à l'emplacement du cas le plus défavorable localisé.

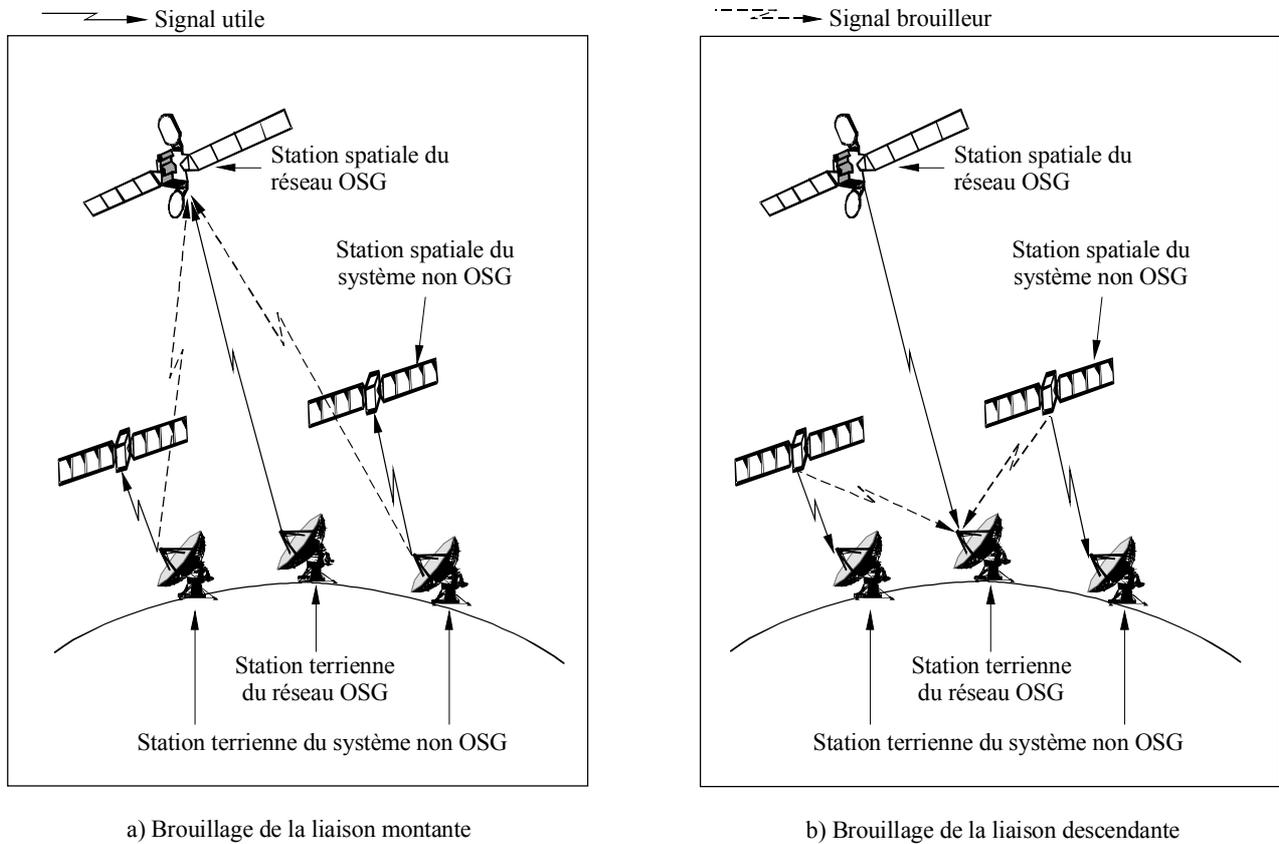
2 Scénario de brouillage

Le système non OSG est le réseau brouilleur. Le scénario de brouillage est représenté sur la Fig. 6:

FIGURE 6

Scénario de brouillage

Brouillage causé par un système non OSG à un réseau OSG



1325-06

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 rotation 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 système non OSG

Pour les stations spatiales du système non OSG (voir la Fig. 7), les constantes sont les suivantes:

N : nombre de stations spatiales du système 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)

$$= E_{i,0} + \omega t$$

Ω_{ri} : rotation de la ligne des noeuds (noeud ascendant) (rad/s)

$$= -\frac{3}{2} J_2 \cos(I) R_e^2 \frac{\sqrt{r\mu}}{r^4}$$

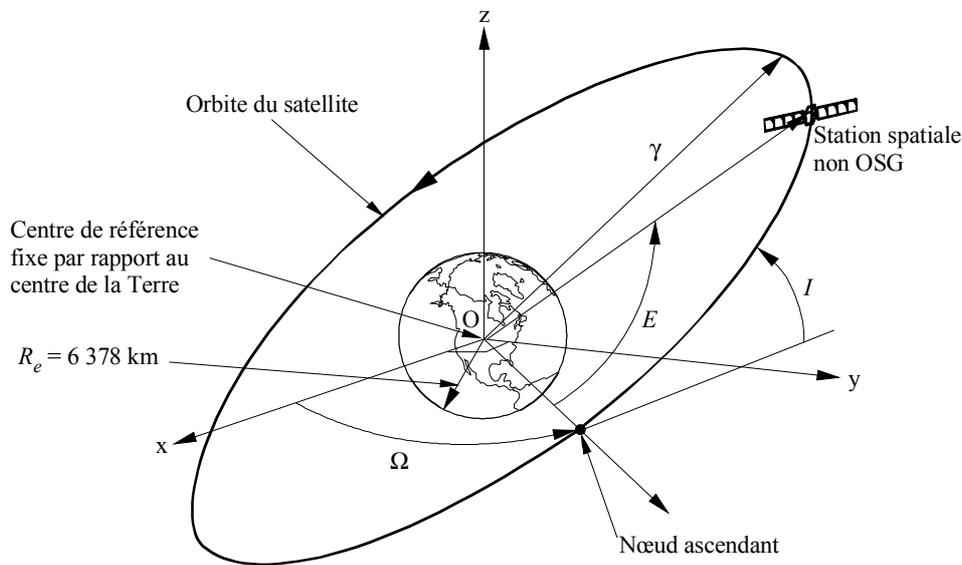
$\Omega_{i,t}$: RAAN du satellite au moment du calcul (rad)

$$= \Omega_{i,0} + \Omega_{ri} t$$

\vec{ON}_i : vecteur des coordonnées d'un satellite non OSG dans la référence fixe par rapport au centre de la Terre:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos(E_{i,t}) \cdot \cos(\Omega_{i,t}) - \cos(I) \cdot \sin(E_{i,t}) \cdot \sin(\Omega_{i,t}) \\ \cos(E_{i,t}) \cdot \sin(\Omega_{i,t}) + \cos(I) \cdot \sin(E_{i,t}) \cdot \cos(\Omega_{i,t}) \\ \sin(E_{i,t}) \cdot \sin(I) \end{bmatrix}$$

FIGURE 7
Configuration géométrique du satellite



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

1325-07

La perturbation non OSG peut être prise en compte par le calcul des constantes relatives à la constellation non OSG, puisque la position des satellites est susceptible de varier lorsque l'on tient compte des perturbations.

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 des satellites non OSG à l'instant initial (rad). Elle peut aussi être considérée comme sa longitude

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_r : rotation de la ligne des noeuds de la RAAN (rad/s)

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

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

$$= \Omega_0 + \Omega_r t$$

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

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos(E_{i,t}) \cdot \cos(\Omega_{i,t}) - \cos(I) \cdot \sin(E_{i,t}) \cdot \sin(\Omega_{i,t}) \\ \cos(E_{i,t}) \cdot \sin(\Omega_{i,t}) + \cos(I) \cdot \sin(E_{i,t}) \cdot \cos(\Omega_{i,t}) \\ \sin(E_{i,t}) \cdot \sin(I) \end{bmatrix}$$

La perturbation OSG peut être prise en compte par le calcul des constantes relatives à la constellation OSG, puisque la position des satellites, ainsi que la direction de pointage de l'antenne du satellite OSG, sont susceptibles de varier lorsque l'on tient compte des perturbations.

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)

\vec{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 système 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

d : distance moyenne entre le centre des stations terriennes non OSG utilisant les mêmes fréquences et les mêmes polarisations (km).

4 Calcul du brouillage

Le § 4.1 décrit une méthode permettant d'identifier la position la plus défavorable déterminant le niveau de puissance epfd le plus important. On peut toutefois calculer la puissance epfd en quelconque autre endroit de la surface de la Terre et à la position du satellite OSG associé.

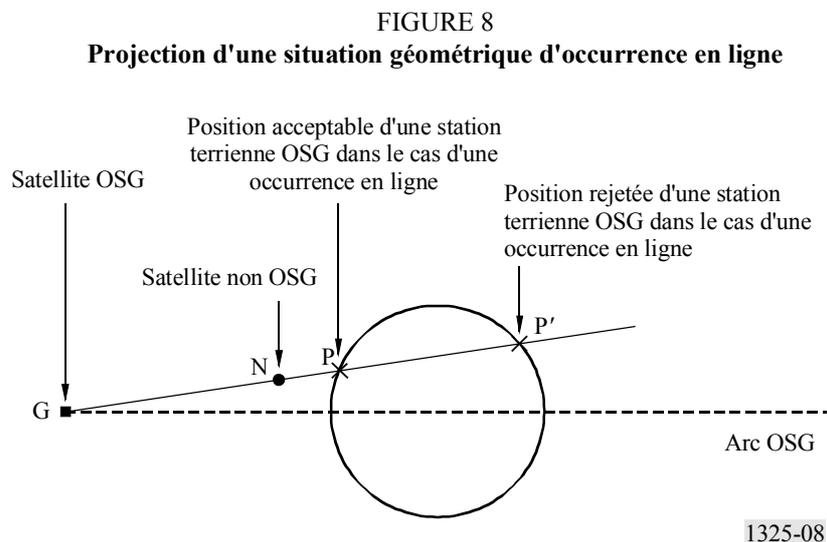
4.1 Etape 1: identification du cas le plus défavorable

Il est nécessaire d'identifier le cas le plus défavorable, c'est-à-dire la localisation de l'endroit où la puissance epfd subie par les stations du réseau OSG est maximale. Lorsque l'on examine les situations de brouillage entre des systèmes non OSG et réseaux OSG, le cas le plus défavorable correspond à une occurrence en ligne ou quasi en ligne.

L'identification du cas le plus défavorable pour le brouillage en liaison descendante consiste à trouver la localisation de la station terrienne OSG subissant la puissance maximale. Dans la méthode proposée, cette recherche repose sur une analyse géométrique permettant le calcul relatif à une situation d'occurrence en ligne. La situation dans le cas le plus défavorable dépend aussi du niveau des lobes latéraux de l'antenne du satellite non OSG au moment de l'occurrence en ligne.

Pour évaluer la configuration géométrique la plus défavorable, cause du cas de brouillage le plus défavorable, les satellites géostationnaires sont répartis à chaque degré le long d'un arc de 360° de longitude. Pour chaque station spatiale OSG, il est possible de tracer une ligne droite reliant cette station à une station spatiale non OSG; en cas d'intersection, elle coupe la Terre aux points P et P'.

Les coordonnées de points P et P' sont déterminées par la résolution d'un système d'équations décrivant l'intersection d'une droite (passant par la station spatiale OSG et la station spatiale non OSG) et une sphère (représentant la Terre). La résolution de ces équations conduit à deux solutions, dont une seulement est acceptable: la position de la station terrienne OSG à considérer est celle pour laquelle la distance entre la station terrienne OSG et la station spatiale OSG est minimale.



On retient alors la famille de points P pour la localisation des stations terriennes OSG dans le cas le plus défavorable. Ce premier critère dépend donc de la géométrie de la constellation.

Le second terme, également prédominant pour le calcul de la puissance $epfd$ maximale, est le niveau de la puissance rayonnée par l'antenne du satellite non OSG en direction de la station terrienne OSG. Si l'antenne est modélisée par un diagramme (sans modélisation des lobes latéraux), la localisation du cas le plus défavorable ne dépend que de la géométrie de la constellation et correspond nécessairement à une configuration géométrique d'occurrence en ligne. Dans les cas où l'antenne est modélisée par une fonction tenant compte des lobes latéraux, ou lorsqu'elle est caractérisée par un diagramme d'antenne réel, il conviendra d'examiner les effets des lobes latéraux.

La station spatiale non OSG en ligne avec la station spatiale OSG et la station terrienne OSG génère une puissance surfacique par les lobes latéraux de son antenne d'émission, en direction de la station terrienne OSG. La puissance surfacique générée est plus grande lorsque le gain de l'antenne de la station spatiale non OSG en direction de la station terrienne OSG présente une valeur crête des lobes latéraux. Ce second critère dépend donc du diagramme d'antenne de la station spatiale non OSG.

Pour se trouver exactement dans le cas le plus défavorable, il faut que la puissance émise soit maximale. C'est pourquoi, lors de la mise en œuvre de la modélisation du trafic, celui-ci doit être maximum lorsque se produit l'occurrence en ligne afin que soit généré le niveau de puissance $epfd$ le plus élevé possible.

La configuration du cas le plus défavorable pour le réseau non OSG dépend de la géométrie de la constellation non OSG ainsi que du niveau des lobes latéraux de l'antenne de la station spatiale durant la situation d'alignement.

Pour évaluer l'identification du cas le plus défavorable de brouillage en liaison montante, il est nécessaire de déterminer la position du réseau OSG correspondant à la puissance $epfd$ maximale. On évalue en un point quelconque de l'arc géostationnaire la puissance $epfd$ produite par les émissions de toutes les stations terriennes d'un système non OSG du SFS. Il serait trop long de calculer les statistiques de puissance $epfd$ pour toutes les positions de stations spatiales et toutes les directions de pointage envisageables. Il est donc nécessaire de définir une méthode permettant de déterminer les endroits subissant la puissance $epfd$ maximale. La puissance $epfd$ dépend de la densité des stations non OSG visibles par la station spatiale OSG eu égard à son ouverture d'antenne.

D'autre part, la taille du faisceau illuminé au sol est d'autant plus grande que la station spatiale OSG pointe loin du point subsatellite. Lorsque l'on tient compte de la discrimination d'antenne de la station spatiale OSG, la direction de pointage de la puissance $epfd$ maximale correspond au cas où il y a une forte densité de stations terriennes non OSG dans la zone de couverture et un nombre maximum de contributions provenant des lobes latéraux lointains.

La puissance maximale $epfd$ sera donc subie par une station spatiale OSG pointant loin de son point subsatellite.

La localisation du cas le plus défavorable est choisie comme étant le point de mesure le plus défavorable et sera utilisée pour l'Etape 2 du programme de simulation.

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

La Fig. 9 décrit les scénarios susmentionnés dans une configuration de référence.

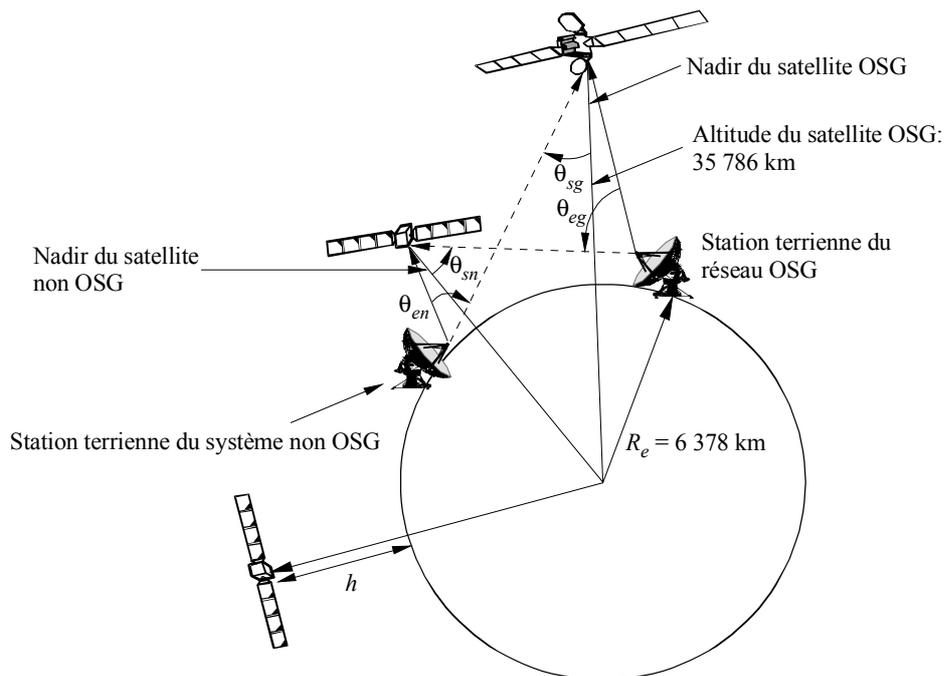
4.2.1 Calcul du brouillage sur la liaison montante

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 système 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 système 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 système non OSG (rad)
- $d_{en,sg}$: distance entre la station terrienne brouilleuse du système 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 système non OSG (dBi)

- $G_{tx,en}(\theta_{en})$: gain de l'antenne émettrice de la station terrienne brouilleuse du système 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 système 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)
- $= c/f$
- $C_{traffic}$: coefficient de trafic dépendant de l'heure locale (dB).

FIGURE 9
Configuration de référence



h : altitude du satellite non OSG

1325-09

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 système non OSG dans la porteuse utile d'un réseau OSG reçue par la station spatiale géostationnaire est:

$$pfd_{I,\uparrow} = P_{tx,en} + C_{traffic} + 10 \log(\Delta f) + G_{tx,en}(\theta_{en}) - 10 \log(4\pi d_{en,sg}^2) - 60$$

La puissance surfacique brouilleuse totale, appelée $epfd_{\uparrow}$ 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, est calculée comme suit:

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

où:

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

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 système non OSG, et entre la direction de la station terrienne du système non OSG vers laquelle pointe la station spatiale du système 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 système non OSG (rad)
- $G_{rx,eg}(\theta_{eg})$: gain de l'antenne réceptrice de la station terrienne du réseau OSG en direction de la station spatiale brouilleuse du système non OSG (dBi)
- $G_{tx,sn}(\theta_{sn})$: gain de l'antenne émettrice de la station spatiale du système 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 système non OSG (dB(W/Hz))
- Δf : largeur de bande de référence (Hz)

* 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 système 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:

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

k étant l'indice de chaque station terrienne brouilleuse du système non OSG visible depuis la station spatiale du réseau OSG et dont la porteuse cause un brouillage à la porteuse utile (k variant de 1 à n , n étant le nombre total de stations terriennes du système non OSG du SFS).

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.

$d_{eg,sn}$: distance entre la station terrienne du réseau OSG et la station spatiale brouilleuse du système non OSG (km).

$C_{traffic}$: coefficient de trafic dépendant de l'heure locale (dB).

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

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

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

$$epfd_{\downarrow} = 10 \log_{10} \left(\sum 10^{pfd_i/10} \cdot G_{rx,eg}(\theta_{eg_i}) / G_{max} \right)^*$$

4.2.2.1 Méthode pour réduire le temps de simulation

Pour réduire le temps de simulation, il convient de limiter le nombre de satellites non OSG considérés pour le calcul de $epfd_{\downarrow}$ aux satellites présentant la contribution la plus importante. On peut mettre en oeuvre pour la simulation un cône d'exploitation permettant de choisir les n satellites non OSG.

Dans les cas où le niveau le plus élevé de puissance $epfd_{\downarrow}$ générée par le système brouilleur non OSG (voir la Fig. 10) survient lorsqu'un satellite non OSG est en situation d'alignement (ou de quasi-alignement) avec un satellite du système brouillé (voir la Fig. 11) ainsi qu'avec la station terrienne de ce système, on choisit de centrer le cône autour de la direction de pointage de la station terrienne du système brouillé.

Ainsi, à partir d'une certaine valeur angulaire définissant le cône, la puissance $epfd$ générée par un satellite non OSG en dehors du cône et subie par la station terrienne (voir la Fig. 11) sera inférieure à un niveau minimal donné $epfd_{min}$.

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

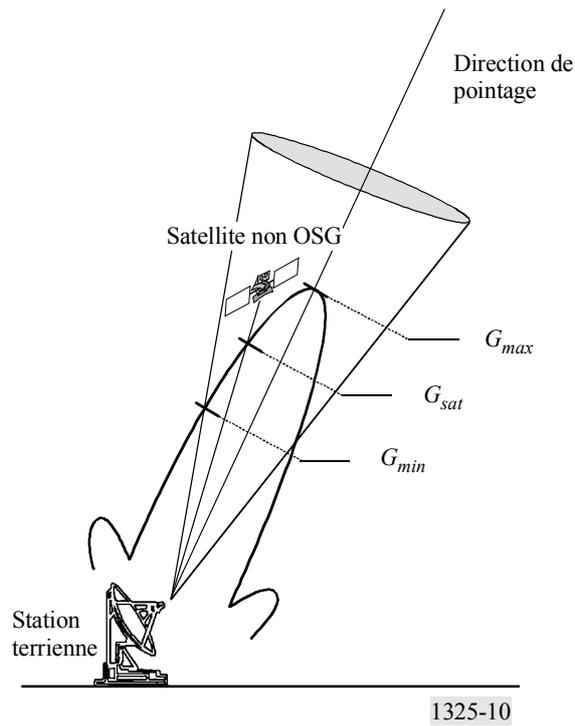
$$I_{0\downarrow} = pfd_{I,\downarrow} - 10 \log(4\pi/\lambda^2) + G_{rx,eg}(\theta_{eg})$$

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

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

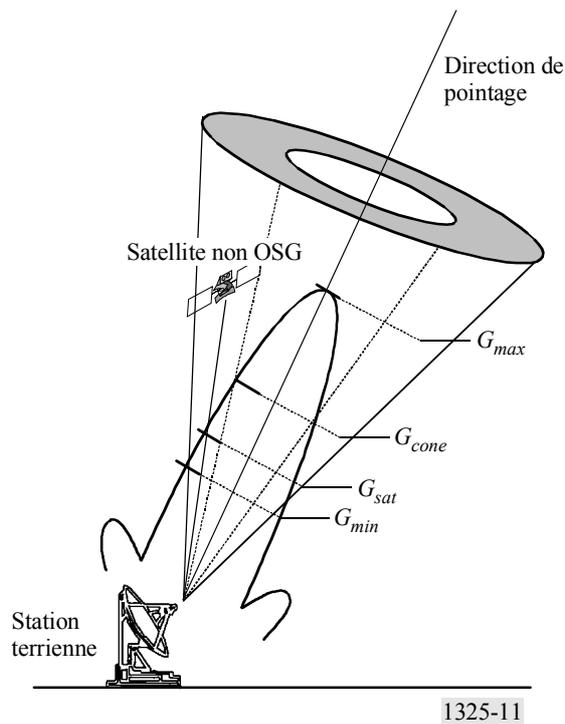
ℓ étant l'indice de chaque station terrienne brouilleuse du système non OSG visible depuis la station spatiale du réseau OSG et dont la porteuse cause un brouillage à la porteuse utile (ℓ variant de 1 à m , m étant le nombre total de stations terriennes du système non OSG du SFS).

FIGURE 10



Si le niveau maximum de puissance $epfd_{\downarrow}$ générée par le système brouilleur non OSG se produit lorsqu'un satellite non OSG se trouve en bordure de la zone d'exclusion, on définit un anneau autour de celle-ci.

FIGURE 11



Lorsque des satellites sont visibles à l'intérieur du cône (ou de l'anneau), on évalue la contribution de chaque satellite visible, puis on les additionne pour calculer la puissance $epfd$ générée au niveau de la station terrienne.

Lorsque tous les satellites visibles se trouvent hors du cône (ou de l'anneau), la puissance totale générée au niveau de la station terrienne peut être négligeable, ou peut être fixée à la valeur $epfd_{min}$. On choisit cette valeur en fonction de la conception du système (type de constellation, nombre de satellites, position des orbites, taille des antennes, etc.).

On règle la valeur de la puissance $epfd_{min}$ de façon progressive jusqu'à ce que les variations des statistiques $epfd$ à court terme issues des simulations successives deviennent négligeables.

Le temps de simulation est ainsi considérablement réduit, sans diminution significative de la précision des statistiques de puissance $epfd$.

4.2.2.2 Application au calcul des limites opérationnelles additionnelles (AOL, *additional operational limits*)

Les limites AOL sont définies pour des niveaux de puissance $epfd$ donnés. On fixe la limite inférieure à -182 dB(W/(m² · 40 kHz)) pour une antenne de 3 m, et à -185 dB(W/(m² · 40 kHz)) pour une antenne de 10 m. L'objet de cette simulation est d'analyser la puissance $epfd$ générée par un système non OSG au dessus de cette limite inférieure de puissance $epfd$. Dans ce cas, on peut choisir une valeur $epfd_{min}$ inférieure de 1 dB à ces limites opérationnelles additionnelles inférieures, ce qui conduit à une bonne précision des résultats.

5 Méthode de calcul de la puissance de bruit brouilleuse totale émanant d'un système non OSG unique

Le système 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 pdf 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 système non OSG, conformément aux indications du § 2.1.1 de l'Annexe 1.

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

Etape 3: Détermination de la distribution géographique des stations terriennes du système non OSG en utilisant les méthodes décrites au § 2.3.1 de l'Annexe 1.

Etape 4: Calcul de la densité de puissance à l'émission de chaque station terrienne du système non OSG.

Etape 5: Sélection de la station spatiale du système non OSG conformément aux indications du § 2.3.2.2 de l'Annexe 1.

Etape 6: Calcul, pour chacune des stations terriennes du système non OSG, de l'angle entre la direction de la station spatiale du système 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 système non OSG en direction de la station spatiale du réseau OSG.

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

Etape 9: Calcul de la puissance surfacique brouilleuse reçue par la station spatiale du réseau OSG en provenance de chacune des stations terriennes du système non OSG.

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

Etape 11: Calcul de l'epfd sur la liaison descendante pour le diamètre d'antenne choisi, conformément aux indications du § 4.2.2 de la présente Annexe.

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 système non OSG, conformément aux indications du § 2.1.1 de l'Annexe 1.

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

Etape 3: Détermination de la distribution géographique des stations terriennes du système non OSG en utilisant les méthodes décrites au § 2.3.1. de l'Annexe 1;

Etape 4: Calcul de la densité de puissance à l'émission de chaque station spatiale du système non OSG.

Etape 5: Sélection de la station spatiale conformément aux indications du § 2.3.2.2 de l'Annexe 1.

Etape 6: Calcul, pour chacune des stations spatiales du système non OSG, de l'angle entre la direction de la station terrienne du système 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 système non OSG en direction de la station terrienne du réseau OSG.

Etape 8: Calcul de la distance entre chacune des stations spatiales du système 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 système 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 système non OSG.

Etape 11: Calcul de l'epfd sur la liaison descendante pour le diamètre d'antenne choisi, conformément aux indications du § 4.2.2 de la présente Annexe.

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

5.2.1 Méthode de Monte Carlo pour le choix de l'emplacement des stations au sol OSG et de la couverture de leur satellite OSG associé.

La méthode peut faire partie du calcul de la fonction de densité cumulative de la puissance $epfd_{\downarrow}$.

Dans cette méthode, on simule un nombre x d'emplacements de stations au sol répartis aléatoirement, ainsi que les satellites OSG associés dont on distribue aléatoirement les longitudes.

On calcule la localisation des stations au sol en choisissant de manière aléatoire une latitude entre -90° et 90° , et une longitude entre 0° et 360° . Le choix de la longitude s'appuie sur une distribution de probabilité uniforme entre 0° et 360° . Par contre, la distribution de la latitude n'est pas uniforme, du fait de la sphéricité de la Terre. Les équations suivantes traduisent la variation de la zone en fonction de la latitude.

$$\text{Latitude} = F(\text{Rand}(), y) \quad (19)$$

où:

$\text{Rand}()$ retourne un nombre aléatoire uniformément distribué entre 0 et 1. Chaque fois que la fonction $\text{Rand}()$ est appelée, une nouvelle valeur aléatoire indépendante est déterminée.

$F(a, y)$ retourne une valeur de latitude comprise entre $-y$ et y pour une valeur de a entre 0 et 1. $F(a, y)$ s'écarte d'une distribution uniforme pour tenir compte du fait qu'aux latitudes élevées, la zone couverte à la surface de la Terre correspondant à un pas de latitude et de longitude donné diminue.

$$F(a, y) = (180/\pi) \arcsin(\sin(y \pi/180) \times (2a - 1)) \quad (20)$$

Une fois la station au sol choisie, on vérifie qu'elle se trouve sur la terre ferme. Dans le cas contraire, cet emplacement n'est pas conservé au nombre des emplacements de simulation. De nouvelles localisations sont simulées jusqu'à obtenir une station au sol se trouvant sur la terre ferme. De la même façon, il ne faudra choisir aucun emplacement pour lequel l'angle d'élévation est inférieur à e degrés, e , étant l'angle d'élévation minimal en exploitation du réseau OSG.

On choisit la longitude OSG à partir d'une distribution uniforme des longitudes sur l'arc OSG présentant au moins 10° d'angle d'élévation vu de l'emplacement des stations au sol OSG.

L'estimation temporelle du brouillage causé par les systèmes non OSG du SFS s'appuie sur des courbes de distribution de probabilité cumulative $epfd_{\downarrow}$ pour diverses localisations à la surface de la Terre et diverses positions des satellites OSG correspondants.

On simule la localisation de l'emplacement qui reçoit le niveau maximum de brouillage $epfd_{\downarrow}$ ainsi que l'ensemble des courbes de fonction de densité cumulative $epfd_{\downarrow}$ relatives à la localisation des stations au sol et à leur satellite OSG associé. Il suffit de disposer d'un millier de courbes pour représenter l'enveloppe de 99% des cas relatifs à chaque point de la fonction de densité cumulative, avec un niveau de confiance extrêmement élevé. Le Tableau 1 indique les intervalles de confiance pour un certain nombre d'essais.

TABLEAU 1

Probabilité de confiance pour un pourcentage de cas et un nombre d'essais donnés

Nombre d'essais	Pourcentage de cas		
	99%	99,50%	99,90%
1	0,01000	0,00500	0,00100
2	0,01990	0,00997	0,00200
4	0,03940	0,01985	0,00399
8	0,07726	0,03931	0,00797
16	0,14854	0,07707	0,01588
32	0,27502	0,14820	0,03151
64	0,47440	0,27443	0,06203
128	0,72375	0,47355	0,12020
256	0,92369	0,72285	0,22596
512	0,99418	0,92319	0,40086
1 024	0,99997	0,99410	0,64103
2 048	1,00000	0,99997	0,87114
4 096	1,00000	1,00000	0,98339
8 192	1,00000	1,00000	0,99972

ANNEXE 3

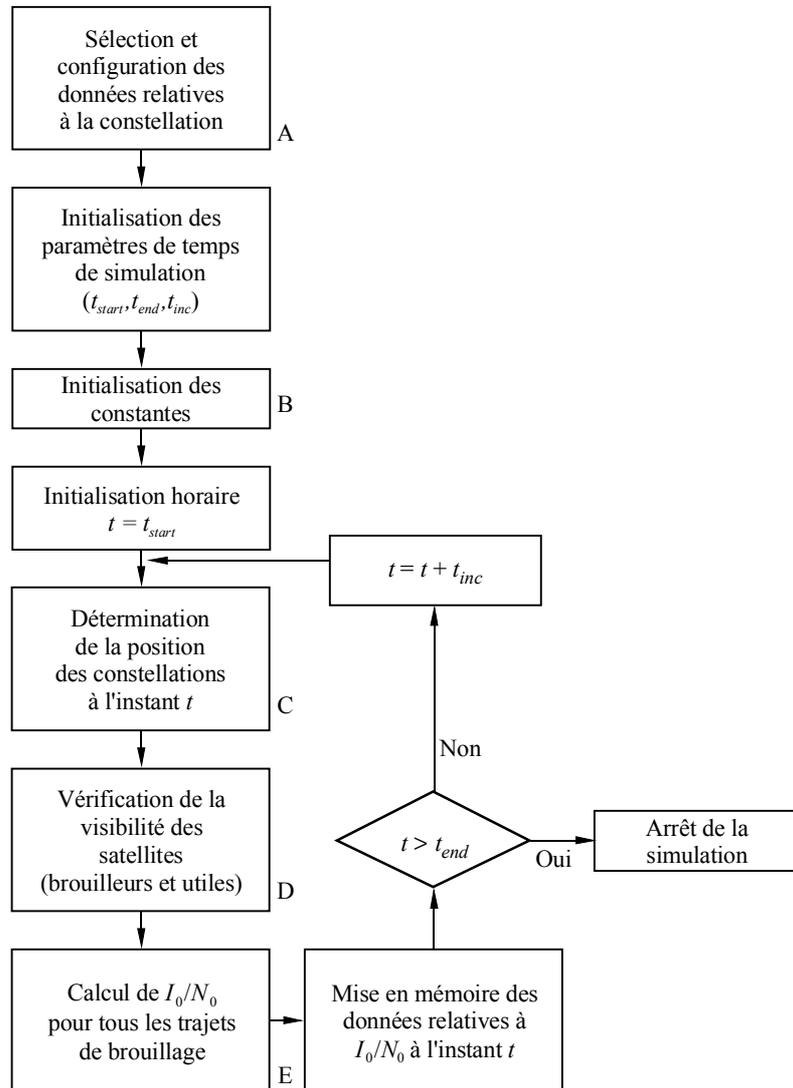
Description de la méthode de calcul indiquée à l'Annexe 1, avec exemple**1 Introduction**

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 réseau à satellites OSG.

2 Description de la méthode de calcul

La Fig. 12 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 ou à l'epfd, en fonction du temps, obtenues pour chacun des quatre scénarios, mais cette phase d'évaluation n'est pas considérée dans la présente Annexe.

FIGURE 12
Application de la méthode



1325-12

Dans le diagramme ci-dessus, on peut remplacer le terme I_0/N_0 par le terme $epfd$.

2.1 Bloc A – Sélection et configuration des constellations

Dans cette phase du programme (voir la Fig. 12, 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 § 2.3.3 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 2

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 2, 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.

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 § 2.3.2 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 ou de la puissance $epfd$ 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 les Tableaux 3 et 4). Les niveaux de brouillage sont mis en mémoire pour analyse ultérieure.

TABLEAU 3

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 descendante	$I_0/N_0 = C_{12\downarrow} C_{traffic} \frac{G_{t1\downarrow}(\varphi_1) G_{r2\downarrow}(\varphi_2)}{4\pi (R_{12\downarrow})^2}$
Const_1 liaison montante → Const_2 liaison montante	$I_0/N_0 = C_{12\uparrow} C_{traffic} \frac{G_{t1\uparrow}(\varphi_1) G_{r2\uparrow}(\varphi_2)}{4\pi (R_{12\uparrow})^2}$
Const_2 liaison descendante → Const_1 liaison descendante	$I_0/N_0 = C_{21\downarrow} C_{traffic} \frac{G_{t2\downarrow}(\varphi_1) G_{r1\downarrow}(\varphi_2)}{4\pi (R_{21\downarrow})^2}$
Const_2 liaison montante → Const_1 liaison montante	$I_0/N_0 = C_{21\uparrow} C_{traffic} \frac{G_{t2\uparrow}(\varphi_1) G_{r1\uparrow}(\varphi_2)}{4\pi (R_{21\uparrow})^2}$

On utilise les équations du Tableau 4 pour le calcul de l'epfd a chaque pas temporel.

TABLEAU 4

Calcul de la puissance epfd

Trajet de brouillage	Niveau de brouillage
Const_1 liaison descendante → Const_2 liaison descendante	$epfd = 10 \log \sum_i 10^{\frac{P_i \cdot C_{traffic}}{10}} \frac{G_{t1\downarrow}(\varphi_1) G_{r2\downarrow}(\varphi_2)}{4\pi(R_{12\downarrow})^2}$
Const_1 liaison montante → Const_2 liaison montante	$epfd = 10 \log \sum_i 10^{\frac{P_i \cdot C_{traffic}}{10}} \frac{G_{t1\uparrow}(\varphi_1) G_{r2\uparrow}(\varphi_2)}{4\pi(R_{12\uparrow})^2}$
Const_2 liaison descendante → Const_1 liaison descendante	$epfd = 10 \log \sum_i 10^{\frac{P_i \cdot C_{traffic}}{10}} \frac{G_{t2\downarrow}(\varphi_1) G_{r1\downarrow}(\varphi_2)}{4\pi(R_{21\downarrow})^2}$
Const_2 liaison montante → Const_1 liaison montante	$epfd = 10 \log \sum_i 10^{\frac{P_i \cdot C_{traffic}}{10}} \frac{G_{t2\uparrow}(\varphi_1) G_{r1\uparrow}(\varphi_2)}{4\pi(R_{21\uparrow})^2}$

Pour le trajet Const_1 liaison descendante → Const_2 liaison descendante par exemple, les variables intervenant dans les Tableaux 3 et 4 sont les suivantes:

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

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

$R_{12\downarrow}$: distance entre un émetteur de Const_1 (sur la liaison descendante) et un récepteur de Const_2 (sur la liaison descendante) (m)

$C_{traffic}$: coefficient de trafic appliqué à une station terrienne et dépendant de l'heure locale.

Le présent paragraphe doit être modifié si une commande de puissance en fonction de la distance est utilisée pour au moins une des constellations étudiées.

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 ou l'epfd étant sauvegardés 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 la présente Annexe 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 5 et 6; l'une des stations terriennes OSG (ET1 OSG) est située comme indiqué au Tableau 3, 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 ou $epfd1(t)$: série temporelle du rapport I_0/N_0 ou de la puissance epfd sur la liaison montante au récepteur non OSG pour les deux stations terriennes copositionnées (non OSG et ET1 OSG)

I_0/N_0 2 ou $epfd2(t)$: série temporelle du rapport I_0/N_0 ou de la puissance epfd sur la liaison montante au récepteur non OSG pour les deux stations terriennes séparées (non OSG et ET2 OSG)

I_0/N_0 A ou $epfdA(t)$: série temporelle du rapport total I_0/N_0 ou de la puissance epfd 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 ou $epfdA(t)$, est donné par la formule suivante:

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

$$epfd(t_i) = epfd1(t_i) + epfd2(t_i)$$

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↓

L'Article 22 (Tableaux 22-1A à 22-1D, Tableaux 22-2, 22-3, Tableaux 22-4A à 22-4C et Tableau 22-4A1) définit les limites 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 sur la liaison montante et aux valeurs de la puissance epfd sur la liaison descendante.

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

$$epfd = \sum_i 10^{\frac{P_{ti}}{10}} \frac{G_t(\varphi_i)}{4\pi R^2} \frac{G_r(\theta_i)}{G_{max}} \quad (21)$$

où:

- i : indice de la source de brouillage
- P_{ti} : puissance émise disponible (W)
- $G_t(\varphi_i)$: gain à l'émission (intensité relative)
- $G_r(\theta_i)$: gain de l'antenne réceptrice du récepteur qui subit le brouillage dans la direction de la $i^{\text{ème}}$ source de brouillage (dBi)
- G_{max} : gain maximal à la réception du récepteur qui subit le brouillage (dBi).

Le rapport brouillage-bruit I_0/N_0 est calculé comme suit:

$$\begin{aligned} \frac{I_0}{N_0} &= \frac{P_t}{BW_{tx}} G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{kT} \frac{1}{L_p} \\ &= \frac{P_t}{BW_{tx}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{G_t(\varphi_1)}{4\pi R^2} \frac{1}{L_p} \frac{1}{kT} G_r(\varphi_2) \end{aligned} \quad (22)$$

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 ($1,38 \times 10^{-23}$ W/(Hz · K))
 T : température de bruit (K)
 L_p : facteur de découplage de polarisation

La puissance epfd (W/(m² · Hz)) provenant de la $i^{\text{ème}}$ 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:

$$epfd_i = \frac{P_{t_i}}{BW_{tx_i}} \frac{G_{t_i}(\varphi_1)}{4\pi R_i^2} \frac{1}{L_p} \frac{G_r(\varphi_2)}{G_{max}} \quad (23)$$

en supposant que $p_i = 10 \log \left(\frac{P_t}{BW_{tx}} \right)$.

Par conséquent, compte tenu des équations (22) et (23), la puissance epfd (W/(m² · Hz)) provenant de la $i^{\text{ème}}$ source peut être exprimée en termes de rapport I_{0_i}/N_0 issu de la $i^{\text{ème}}$ source comme suit:

$$epfd_i = \frac{I_{0_i}}{N_0} \frac{4\pi \times 10^6}{\lambda^2} \frac{k T}{G_{max}} \quad (24)$$

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 (21).

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 réseau à satellites OSG. L'exemple dont il est question dans la présente Annexe fait intervenir un système LEO-A et un réseau OSG. Les données associées aux constellations figurent au Tableau 5.

TABLEAU 5

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 noeud 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 8 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 8 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 6 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 6

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. 13 à 18 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. 13 et 14 permettent de connaître le rapport I_0/N_0 en fonction du pourcentage de temps pendant lequel les valeurs correspondantes sont observées. La Fig. 13 donne ce rapport pour une configuration dans laquelle le système non OSG brouille le réseau OSG, tandis que la Fig. 14 correspond à la configuration inverse.

Les Fig. 15 et 16 indiquent le nombre d'événements (et leur durée) pendant lesquels le rapport I_0/N_0 dépasse un niveau prédéterminé. La Fig. 15 permet de connaître l'incidence exercée par le système non OSG sur le réseau OSG (il y a occurrence lorsque I_0/N_0 dépasse –16 dB); la Fig. 16 illustre l'effet du réseau OSG sur le système non OSG (il y a occurrence lorsque I_0/N_0 dépasse –1 dB).

Les Fig. 17 et 18 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. 17 porte sur une période d'une heure graduée, avec graduation par intervalles de 15 min. La Fig. 18 donne le détail de l'événement de brouillage de crête représenté à la Fig. 17.

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. 12 et 13 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 7 indique les résultats des calculs de brouillage dans le cas d'un système non OSG brouilleur pour le réseau OSG considéré. Les valeurs de crête de la Fig. 13 et les valeurs de brouillage calculées et indiquées dans le Tableau 7 sont identiques.

FIGURE 13
Brouillage causé par un système non OSG à un réseau OSG

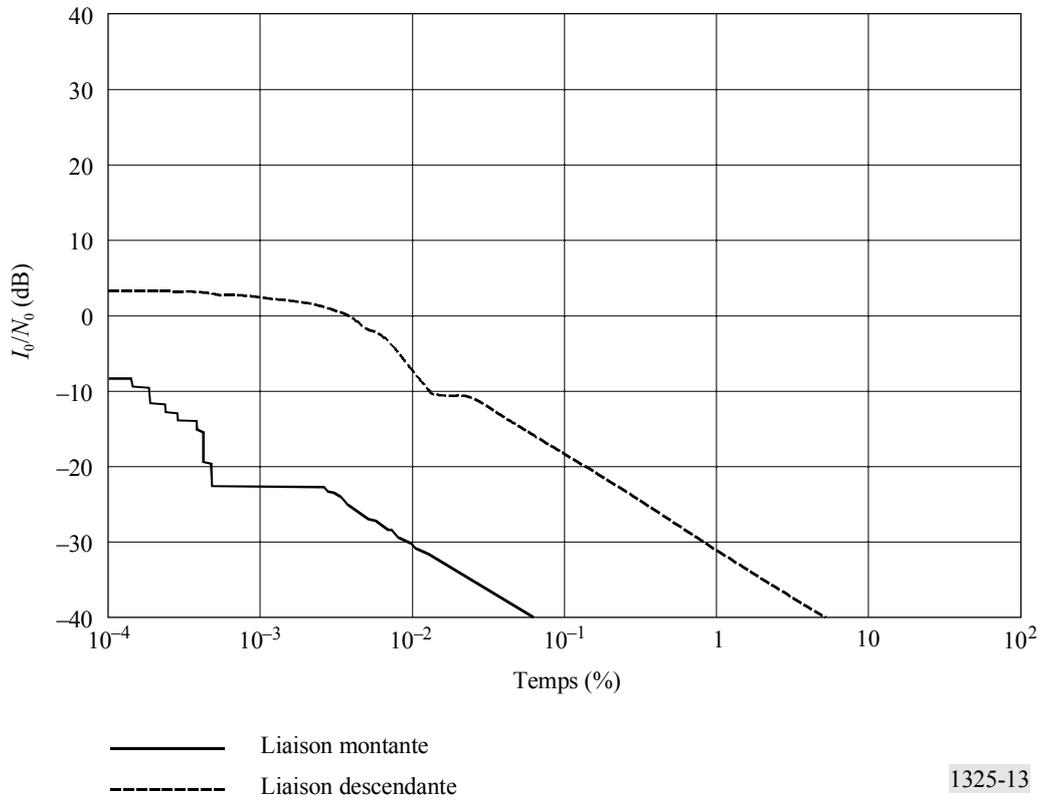


FIGURE 14
Brouillage causé par un réseau OSG à un système non OSG

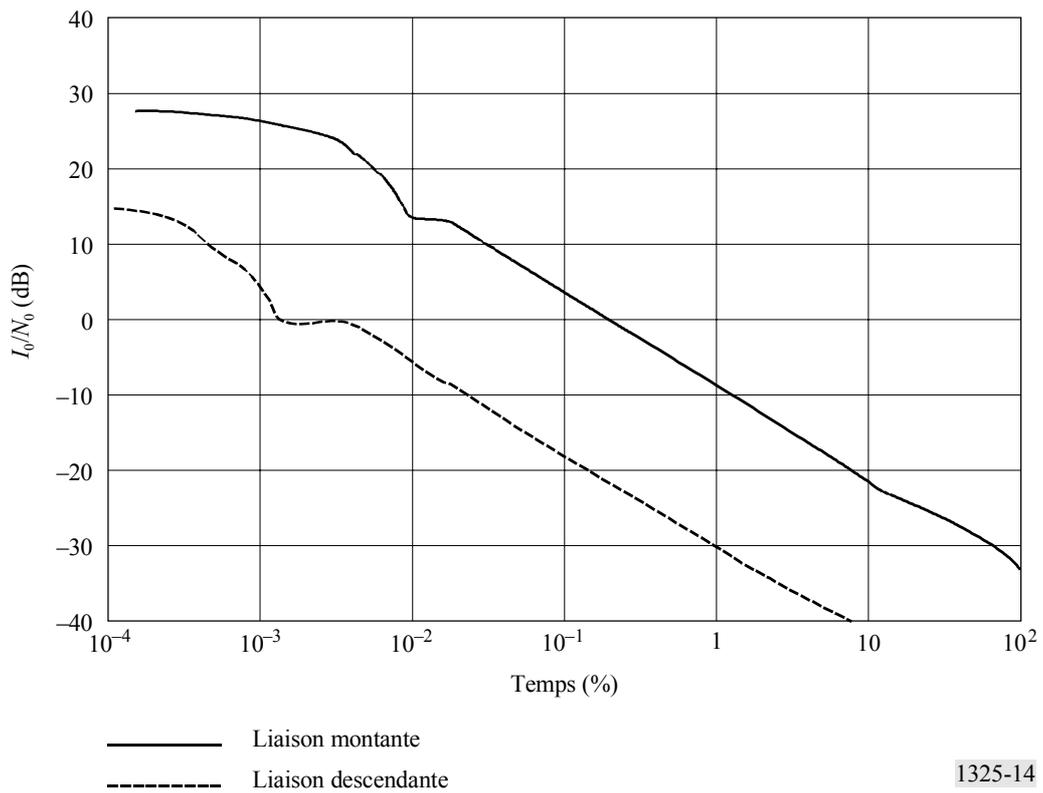
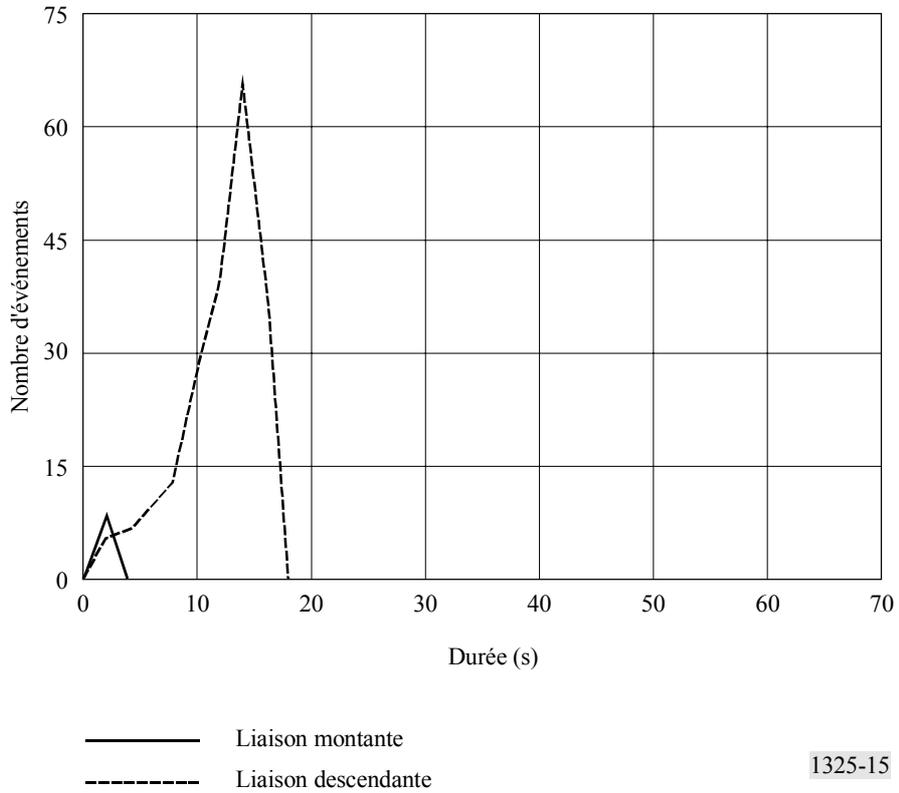


FIGURE 15

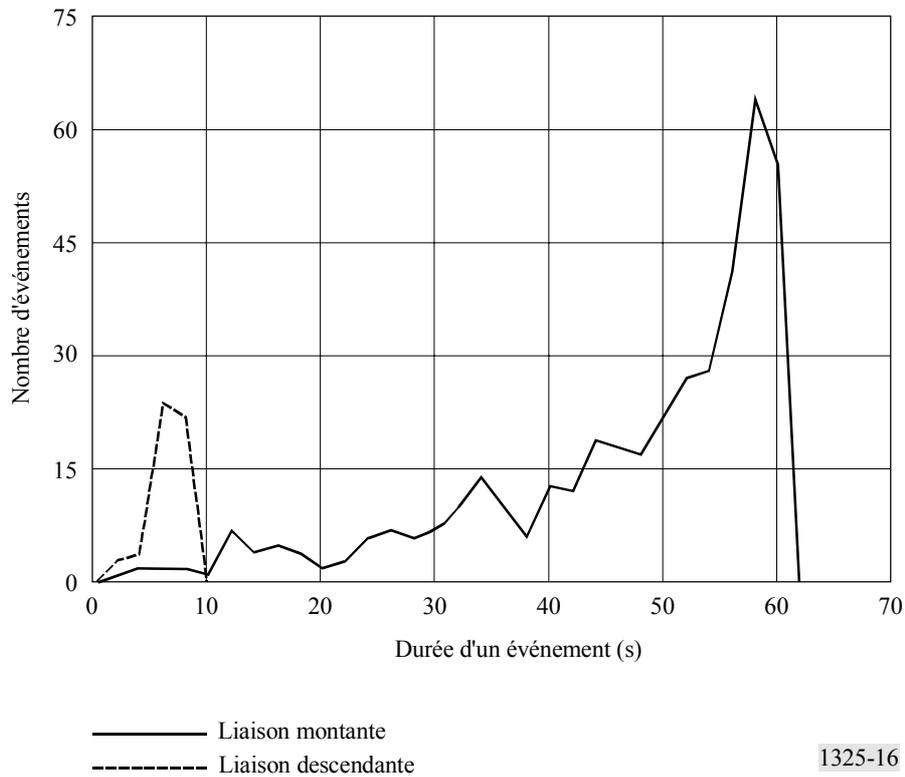
Durée des événements de brouillage causés par un système non OSG à un réseau OSG



1325-15

FIGURE 16

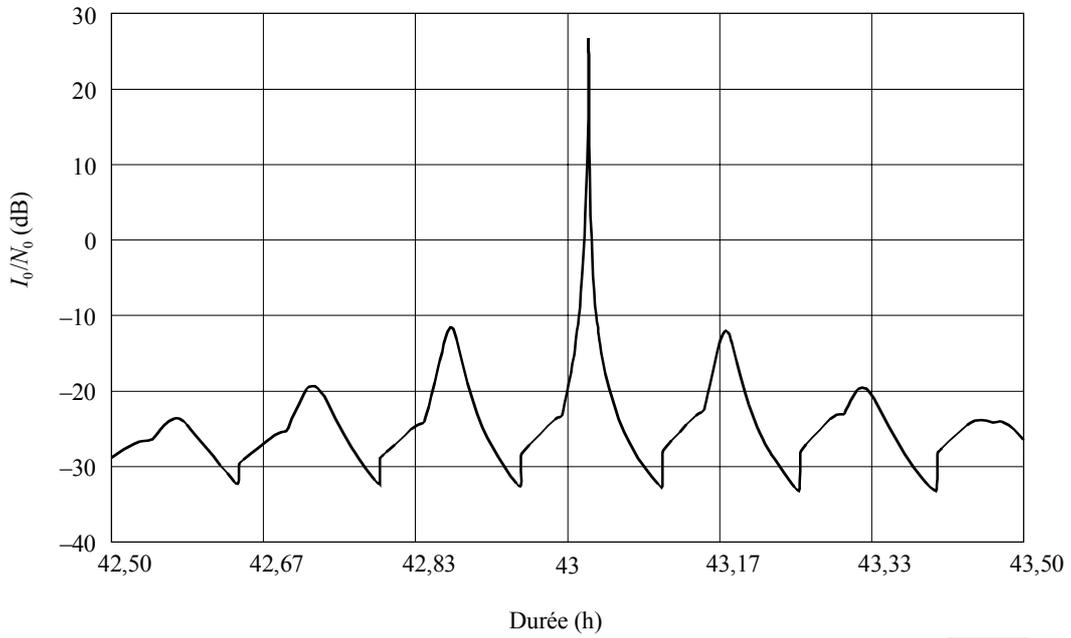
Durée des événements de brouillage causés par un réseau OSG à un système non OSG



1325-16

FIGURE 17

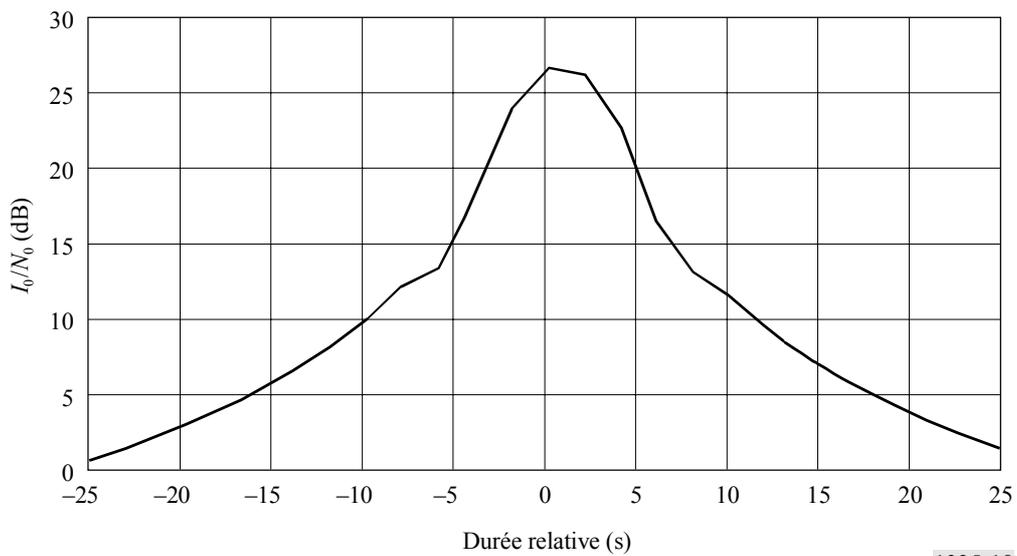
**Profil chronologique du brouillage occasionné par un réseau OSG
à la liaison montante d'un système non OSG**



1325-17

FIGURE 18

Détail d'un événement de brouillage de crête de la Fig. 17, centré sur l'instant $t = 43$ h 74 s



1325-18

TABLEAU 7

**Calcul du niveau de brouillage sur un trajet direct causé par
un système non OSG à un réseau 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
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 8 indique les résultats des calculs de brouillage causé par un réseau OSG à un système non OSG. Les valeurs de crête de la Fig. 14 et les niveaux de brouillage calculés et indiqués dans le Tableau 8 sont identiques.

TABLEAU 8

**Calcul du niveau de brouillage sur un trajet direct causé par un réseau OSG
à un système non OSG**

	Liaison montante OSG sur liaison montante non OSG	Liaison descendante OSG sur liaison descendante non OSG
P_r/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 LEO et MEO.
 - 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.
 - 8 Des études complémentaires sont nécessaires pour adapter cette Recommandation au cas des orbites non circulaires.
-